

## ЭМПИРИЧЕСКАЯ МАКРОМОДЕЛЬ СОСТОЯНИЯ ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА

Б.Е. Фишман

Биробиджанский государственный педагогический институт, г. Биробиджан

Вероятно, нет необходимости доказывать целесообразность и большое практическое значение решения задачи предвычисления эволюции тропических циклонов (ТЦ). Эта задача все еще не может считаться удовлетворительно решенной и сохраняет свою актуальность. Известны трудности теоретического моделирования физических явлений, происходящих в ТЦ. И хотя считается, что уравнения, описывающие динамику процессов в атмосфере и океане в зоне ТЦ, изучены неплохо, корректное исследование и решение их, даже численное, все еще остается проблематичным.

Имеется ряд причин, приводящих к такому положению. Во-первых, понятно, что уравнения газовой динамики применительно к ТЦ должны описывать физические эффекты в земной атмосфере. Но атмосфера Земли отличается от идеального газа в сосуде, поэтому в модели необходимо учитывать влияние вращения Земли, ускорения силы тяжести, солнечную и отраженную от поверхности Земли радиацию, фазовые переходы воды и т.д. Причем сами уравнения модели должны отобразить неравновесный характер процессов в ТЦ. В результате теоретическая модель ТЦ не просто усложняется. В ней наряду с хорошо обоснованными выражениями, приходится использовать различные слагаемые эмпирического и полуэмпирического характера, вводимые из качественных соображений.

Во-вторых, разнородность структуры уравнений, описывающих ТЦ, приводит к необходимости определить тот «внутренний» масштаб  $\delta$ , на котором существует согласованность различных членов этих уравнений. Действительно, с формальных позиций выражение, содержащее производные, локально по характеру и в предельном смысле характеризует рассматриваемую величину (скорость изменения, градиент и др.) в точке. В то же время выражение, описывающее, например, отраженную от поверхности Земли радиацию, имеет реальный физический смысл как интегральная характеристика некоторой части поверхности, причем ее площадь не может быть меньше некоторого (минимально допустимого) значения, для которого имеет физический смысл то или иное значение альбедо. Понятно, что согласованность различных членов уравнений означает мелкомасштабное усреднение локальных значений рассматриваемых величин (прежде всего, скоростей переноса, давления, температуры, влажности) и их изменений в пределах соответствующего «внутреннего» масштаба  $\delta$ .

В-третьих, в качестве начальных для системы

уравнений в частных производных, описывающих динамику ТЦ, используются данные в геометрически правильной сетке с некоторым шагом  $h$  (обычно используются величина  $h$  порядка сотни километров). При этом для величин  $h$  и  $\delta$  должно выполняться следующее соотношение:

$$h > \delta. \quad (1)$$

Но данные о состоянии земной атмосферы всегда привязаны к реальной сети наблюдений, имеющей геометрически нерегулярный характер. Указанное обстоятельство вынуждает интерполировать данные, получаемые из измерений, в правильную сетку точек на поверхности Земли (или ее части, если прогноз предполагается давать региональный, а не глобальный). При этой интерполяции учитываются статистические характеристики реальных метеорологических полей и полей предыдущего прогноза на момент данного объективного анализа (так по традиции называют задачу интерполяции) [2, 4].

В-четвертых, многие процессы в ТЦ по своей природе стохастичны. Например, таковыми являются все процессы, связанные с турбулентностью, а также микрофизические процессы, происходящие в облачной системе ТЦ (зарождение, рост и взаимодействие облачных капель, снежинок и ледяных частиц, а также их электризация). Заметим, что микрофизические процессы вообще сложны для теоретического описания, поскольку их ход зависит не только от размеров и формы частиц, но и от того, в какой части облаков они происходят. Невозможно адекватно описать эволюцию всех указанных объектов детерминированными дифференциальными уравнениями, да еще и аппроксимировать их на регулярной сетке с шагом в сотни километров.

Наконец, в-пятых, для решения уравнений ТЦ необходимы граничные условия, которые обычно записываются из физических соображений. Так, для нижней границы двух сред (в случае атмосферы и почвы) используются условия теплового баланса, баланса влаги и отсутствия вертикального переноса (скорость воздуха по нормали к поверхности равна нулю). Однако в реальной почве идут процессы перераспределения тепла и влаги. На такое перераспределение влияют теплопроводность почвы, ее влажность, положение вечной мерзлоты и др. В случае же границы атмосферы с морем интенсивность теплообмена зависит от ветра (при большом ветре волнение возрастает, а теплообмен усиливается; сильный шторм перемешивает воду и, поднимая снизу более

холодные массы воды, вызывает охлаждение воздуха). На верхней границе и на боковых границах (если теоретическая модель описывает часть атмосферы), особенно в случае границ, на которых отсутствуют специфические (граничные) физические процессы, граничные условия необходимо специально вычислять. Для этого производится стыковка с прогностической моделью большего масштаба, либо используются результаты объективного анализа метеорологических полей [11].

Таким образом, система уравнений, в том или ином конкретном варианте описывающих ТЦ, представляет собой более-менее обоснованную физическую модель рассматриваемых процессов и с этой стороны особых возражений не вызывает. Однако достаточность любого известного варианта системы уравнений для моделирования эволюции ТЦ представляется сомнительной по следующим обстоятельствам.

1. Не во всех случаях уравнения движения вязкой жидкости имеют единственное решение при заданных граничных и начальных условиях [5].

2. Граничные и начальные условия, используемые в реальных вычислениях, всегда известны лишь приближенно. Они содержат ошибки интерполяции, поскольку непрерывные метеорологические поля определяются на основе данных, собираемых с дискретной нерегулярной сети пунктов наблюдений и вертикальных зондирований [1, 2, 9] и др. Граничные и начальные условия задаются именно этими метеорологическими полями.

3. В численных расчетах уравнений гидродинамики часто имеет место вычислительная неустойчивость, проявляющаяся в том, что малые ошибки в исходных данных (т.е. в граничных и начальных условиях) приводят к заметным погрешностям результатов расчета [1, 9].

4. Обычно используемые уравнения ТЦ реализуют сугубо детерминистическое моделирование физических явлений в ТЦ. Учет в такой модели стохастических явлений, связанных, например, с зонами интенсивного турбулентного обмена или микрофизическими процессами в облаках, осуществляется с помощью полуэмпирических коэффициентов, что не всегда может быть обосновано [8]. Построение же стохастической модели физических явлений в ТЦ является отдельной задачей более высокого уровня сложности, которая пока не реализована. Вместе с тем, известны различные проявления стохастичности процессов в зоне ТЦ (например, формирование торнадо, смерчей, молний и др.).

5. По нашему мнению, ТЦ является целостным самоорганизующимся системным объектом. Как таковой, он не сводится только к сумме своих составляющих – часть свойств ТЦ как системы формируется именно на системном уровне [12]. В то же время описание ТЦ с помощью известных уравнений ТЦ ведется «изнутри», на уровне компонентов ТЦ, что отражается дифференциальным характером данных уравнений.

6. Следует подчеркнуть, что теоретическая модель, основанная на уравнениях гидро- и термодинамики,

строго говоря, неполна. Эта модель совершенно не учитывает электрические, магнитные и электромагнитные поля, в которых ТЦ существует и часть которых он генерирует [6].

Неполнота рассматриваемой теоретической модели была указана и в [6], где отмечалось, что численные и аналитические методы не дают всей картины интегральных движений воздуха в ТЦ. Так, не построено теоретическое описание поля скоростей, индуцированных вихревым шнуром конечной толщины [7].

По традиции, берущей свое начало в классической математике, неполнота теоретической модели воспринимается как ее недостаток. Вместе с тем, в прикладных физических задачах это качество теоретической модели, по нашему мнению, вообще не может квалифицироваться как ее недостаток. Ведь неполные модели, обеспечивая открытость теоретического описания, создают возможность гибкого сопряжения теории с экспериментальными данными.

В прогностической практике именно открытость теоретического описания ТЦ позволяет воспользоваться совокупностью различных моделей (гидродинамической модели Гидрометеорологического центра (ГМЦ РФ), баротропной модели ГМЦ РФ, статистический метод прогноза ДВНИГМИ и др.).

При использовании гидродинамической модели ГМЦ РФ осуществляется прогноз крупномасштабных полей ветра и геопотенциала в Северном полушарии. Начальное поле ветра в ТЦ моделируется осесимметричным вихрем, в котором на любом расстоянии от центра циклона ветер задается аналитически в зависимости от максимальной скорости ветра в ТЦ и радиуса, при котором скорость ветра максимальна. При этом поле геопотенциала в ТЦ находится путем решения «реверсивного» уравнения баланса по методу И.Г. Ситникова и В.А. Зленко (1987).

Согласно [11], в качестве начальных данных при интегрировании исходной системы уравнений используются диагностические и прогностические (с шагом 12 ч) поля геопотенциала H500. В начальный момент времени берется геострофическое поле ветра. Все поля модифицируются в окрестности ТЦ при  $t=0$ . Понятно, что точность расчета прогноза значений максимального ветра в ТЦ и радиуса, при котором скорость ветра максимальна ( $V_{\max}$  и  $r_{\max}$ ), определяется точностью представления геопотенциала и восстановления ветра в окрестностях тропического циклона.

Модернизированный гидродинамический метод, дающий прогноз перемещения тропических циклонов по баротропной модели ГМЦ РФ (1987 г., авторы модели – И.Г. Ситников, В.А. Зленко), позволяет прогнозировать перемещения (координаты положения) ТЦ северо-западной части Тихого океана с дискретностью 6 ч и с заблаговременностью до 3-х сут [11]. Данный способ прогноза был автоматизирован и дополнен прогностическим комплексом по аналоговой схеме (1996 г., авторы Тунеголовец В.П. и др.), позволяющей рассчитать прогностические значения максимального ветра, минимального давления и радиуса зон сильных и ураганных ветров. В настоящее время имеется около 15

методов и прог-ностических процедур, которые, по сути, образуют подсистему прогноза тайфунов в системе предупреждения о тайфунах, выходящих на Дальний Восток РФ<sup>1</sup>.

Оценка качества различных вариантов регрессионного метода прогноза показала, что прогноз траекторий тайфунов в перемещения ТЦ приводит к величине средних ошибок прогноза положения  $\overline{\Delta R}$  порядка  $\overline{\Delta R} = 191$  км в прогнозах на 24 ч и  $\overline{\Delta R} = 367$  км – на 48 ч (расчеты проводились на данных сезонов 1994-1995 гг.). Эти оценки значительно лучше, чем для инерционных прогнозов по той же выборке данных и попадают в градации «хороших» (24 ч) и «удовлетворительных» (48 ч). В аналоговом методе прогноза перемещения ТЦ заблаговременностью до 3 сут значения средних ошибок  $\overline{\Delta R}$  составляют 223 км на 24 ч, 545 км на 48 ч и 803 км на 72 ч, что несколько хуже, чем в регрессионном методе, но по-прежнему лучше инерционных прогнозов на все сроки. Метод можно считать «удовлетворительным» при заблаговременности 24 ч и 48 ч.

Приведенные значения величин средних ошибок прогноза положения  $\overline{\Delta R}$  характерны для существующих методов. Если сравнить эти показатели с параметрами ТЦ (диаметр порядка нескольких сотен километров и

центральная область, или «глаз урагана», с диаметром порядка нескольких десятков километров), то можно сделать вывод о необходимости продолжать разработку методов прогноза положения и других характеристик ТЦ.

Практически все указанные методы используют открытость теоретического описания ТЦ: а) привлекаются модельные представления о полях геопотенциала и ветра в окрестностях тропического циклона; б) анализируются известные реализации ТЦ из имеющегося архива исторических циклонов; в) рассмотрение аналогичных синоптических ситуаций и т.д.

По нашему мнению, такое положение дел закономерно. Любой ТЦ является слишком сложной системой и его вряд ли удастся когда-нибудь хорошо описать замкнутой системой модельных уравнений. Таким образом, имеет смысл модернизировать существующие методы прогноза характеристик ТЦ и разрабатывать новые, изначально строя их как открытые. В этом смысле показательным является метод Н.Е. Кочина, применяемый в прикладных аэро- или гидродинамических  $\overline{\Delta R}$  исследованиях, например, при построении моделей циклонов и антициклонов [13].

Метод моделирования Н.Е. Кочина включает в себя 2 этапа. Сначала на основании экспериментальных данных конструируется эмпирическая модель, описывающая интегральный характер течения среды. Затем ее движение

---

<sup>1</sup> Перечислим имеющиеся методы:

- численный метод прогноза траекторий ТЦ (разработка Росгидрометцентра, авторы: Ситников И.Г., Зленко В.А. - 1988 г.);
- статистический метод прогноза интенсивности тайфунов с заблаговременностью до 72 ч (разработка ДВНИГМИ, автор Тунеголовец В.П. - 1988 г.);
- метод прогноза траекторий ТЦ по уточненной баротропной модели (разработка Росгидрометцентра, авторы: Ситников И.Г., Зленко В.А., Похил А.Э. - 1997 г.) для западной части Тихого океана; альтернативный прогноз сильных осадков по территории Приморского края (авторы: Моисеенко Г.С., Тунеголовец В.П. - 1998 г.);
- альтернативный прогноз сильных осадков по территории Хабаровского края (авторы: Моисеенко Г.С., Тунеголовец В.П. - 1998 г.);
- статистический способ прогноза интенсивности и перемещения тропических циклонов с заблаговременностью до 3-х суток (автор: Тунеголовец В.П. - 1998 г.);
- аналоговый способ прогноза перемещения тропических циклонов с заблаговременностью до 3-х суток (авторы: Баранов Г.Г., Дубина В.А., Тунеголовец В.П. - 1998 г.);
- синоптико-статистический способ прогноза эволюции тропических циклонов при выходе их в умеренные широты (автор: Кузин В.С. - 1998 г.);
- прогноз перемещения тропических циклонов северо-западной части Тихого океана по гидродинамической модели Ситникова И.Г. и Зленко В.А. (Росгидрометеоцентр, модификация: Тунеголовец В.П. - 1998 г.);
- комплексный регрессионно-аналоговый метод прогноза с заблаговременностью до 72 ч перемещения, давления в центре, максимального ветра и зон с сильными, ураганскими и максимальными ветрами в тропических циклонах, оказывающих влияние на Японское море. Приморский край и о. Сахалин (автор: Тунеголовец В.П. - 1998 г.);
- аналоговый метод прогноза с заблаговременностью до 72 ч перемещения, давления в центре в тропических циклонах (автор: Тунеголовец В.П. - 1998 г.);
- аналоговый метод прогноза с заблаговременностью до 72 ч перемещения, давления в центре, максимального ветра и зон с сильными, ураганскими и максимальными в ТЦ ветрами в тропических циклонах (автор: Тунеголовец В.П. - 1998 г.);
- усовершенствованный аналоговый метод прогноза с заблаговременностью до 72 ч перемещения, давления в центре, максимального ветра и зон с сильными, ураганскими и максимальными в ТЦ ветрами в тропических циклонах (автор: Тунеголовец В.П. - 2000 г.);
- трехуровневый синоптический метод прогноза перемещения тайфунов с учетом вклада адвекции тепла (автор: Кузин В.С. - 1999 г.).

рассматривается более подробно с помощью теоретической модели, использующей законы аэро- или гидродинамики. Получаемые из модели следствия сравниваются с фактическими данными. При наличии расхождений вводятся поправки в модель первого этапа. Таким образом, в методе Н.Е. Кочина неполнота теоретической модели является условием, необходимым для ее «привязки» к имеющимся данным.

Интерпретируя смысл метода Н.Е. Кочина, можно сказать, что для описания такого системного объекта, как ТЦ, недостаточно языка дифференциальных уравнений (1) - (4). Приходится дополнительно использовать язык эмпирических уравнений с неопределенными коэффициентами, значения которых получают, например, с помощью метода наименьших квадратов, метода максимального правдоподобия или любого иного метода, оптимизирующего качество эмпирического моделирования. Но такое положение дел типично для сложных систем. Их даже иногда определяют как такие, которые можно описать не менее чем на двух различных математических языках, например на языке теории дифференциальных уравнений и одновременно на языке алгебры [12].

В работе [6] была предложена феноменологическая модель ТЦ, описывающая интегральные движения среды в зоне ТЦ (в русле идеи метода Н.Е. Кочина). В согласии со второй кинематической теоремой Гельмгольца (см., например, [10]), было принято предположение о том, что вихревые трубки тока, формирующие общий вихрь ТЦ, как бы «наматываются» на тороидальную поверхность.

Для простоты также считалось, что ТЦ в целом стационарен, неподвижен и осесимметричен с вертикальной ориентацией оси симметрии. Тогда в зоне ТЦ возникает система вихрей 1, напоминающая тор и вращающаяся в соответствии со знаком циркуляции вихревых трубок (рис. 1). В результате взаимодействия вихревых трубок в центре тора образуется полый вихрь.

Вращение вихревого тора, согласно теореме Бернулли [3], вызывает уменьшение давления, и влажный воздух будет подниматься в полости вихря. Если высота подъема влажного воздуха больше высоты конденсации, то возникает движение вихревых трубок вдоль своих осей, так как, согласно закону сохранения вихревых линий, они движутся вместе с частицами воздуха. Таким образом, в зоне ТЦ воздух участвует в трех движениях: вокруг вихревых трубок, вдоль них и вокруг центрального полого вихря. При наличии переноса ТЦ добавляется четвертое (поступательное) движение.

Параметры представленной модели необходимо согласовать с характеристиками реального ТЦ, после чего можно переходить к выполнению второго этапа метода Н.Е. Кочина.

Приведенная феноменологическая модель ТЦ не предназначена для объяснения причины зарождения ТЦ, роли температуры воды; она не учитывает несимметричность распределения параметров (за исключением давления, распределение которого в ТЦ обладает осевой симметрией). Однако эта модель отражает многие характерные черты ТЦ. В частности, согласно [6], на ее основе можно объяснить:

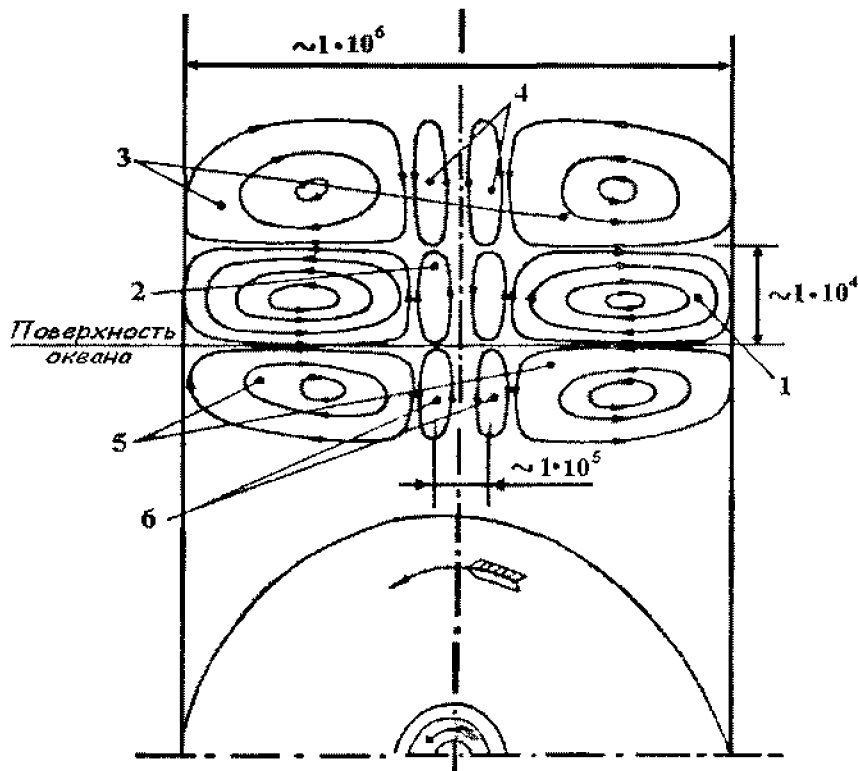


Рис. 1. Схема движений среды в зоне ТЦ: 1 – главное вихревое кольцо, 2 – внутреннее вихревое кольцо, 3, 4 – стратосферное вихревое кольцо, 5, 6 – вихревое кольцо в океане (по [6])<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Размеры ТЦ меняются в широких пределах, и на рисунке они приведены с точностью до порядка

1) наличие ветра, усиливающегося по мере приближения к центру ТЦ и меняющего свое направление после прохождения «глаза» ТЦ;

2) приток воздуха в нижних слоях ТЦ и его отток в верхних слоях;

3) спиральные образования возникают при поднятии влажного воздуха до высоты конденсации в вихревых шнурах, движущихся вдоль поверхности океана;

4) стену облаков и зону дождей, образующиеся при подъеме влажного воздуха вблизи центра ТЦ;

5) облачные образования в стене глаза ТЦ, напоминающие ярусы в театре, – вихревые шнуры, поднимающиеся по стенке полого вихря;

6) область громадных волн вблизи внешней границы «глаза» ТЦ, обвязанную встрече нагонных ветровых волн, движущихся по спирали к центру ТЦ во внешнем вихревом кольце и по спирали от центра ТЦ во внутреннем;

7) наиболее сильный ветер, наблюдающийся как раз за кромкой стены облаков, т. е. в зоне соприкосновения вихревых колец 1 и 2 (рис. 1);

8) глаз ТЦ, образуемый полым вихрем, причем нисходящее движение воздуха в глазе ТЦ, безоблачное небо на большей части глаза легко объясняются наличием внутреннего кольца 2;

9) нисходящее движение воздуха в глазе ТЦ, обязанное внутреннему вихревому кольцу 2;

10) редкие облака, наблюдающиеся иногда в глазе ТЦ на высоте около 2,5 км, которые возникают при движении вверх влажного воздуха на соответствующих участках внутреннего вихревого кольца;

11) слабый ветер в глазе ТЦ, связанный с тем, что круговое движение внутреннего вихревого кольца 2 происходит под влиянием кольца 1, и окружные скорости воздуха уменьшаются по мере приближения к центру ТЦ.

Несмотря на привлекательность рассмотренной феноменологической модели, она представляет интерес, в основном, для дальнейших исследований. По нашему мнению, основная причина того, что она пока не имеет выход в прогностическую практику, заключается в неустойчивости вихревой макросистемы рассматриваемой модели. Известно, что стохастический характер турбулентного механизма развития неустойчивости струй и вихрей в атмосфере существенно изменяет картину течений, так что в реальности она может значительно отличаться от той, которая представлена на рис. 1. Возможно, следует говорить о том, что на рис. 1 представлена картина движений среды в зоне ТЦ, усредненная по достаточно большому промежутку времени.

Заметим также, что применение рассмотренной модели в реальной системе предупреждения о тайфунах в настоящее время маловероятно еще и потому, что эмпирические данные, необходимые для данной модели, не обеспечиваются имеющейся сетью.

Вместе с тем, имеется большой поток объективной визуальной информации с искусственных спутников Земли (ИСЗ) метеорологического назначения об облачном поле ТЦ. В принципе можно восстанавливать пространственное распределение облаков и осадков по данным сети метеорологических радиолокаторов (МРЛ).

Учитывая возможность использования столь информативных каналов поступления метеорологической информации, представляется естественным попытаться построить эмпирическую макромодель состояния ТЦ, опирающуюся на указанную информацию. Такая попытка, описанная ниже, опирается на следующее.

Соотношение характерных значений геометрических параметров ТЦ, представленных на рис. 1, показывает, что размеры области, охватываемой вертикальными движениями в ТЦ и определяемой толщиной тропосферы, на порядок меньше, чем горизонтальные размеры ТЦ. С другой стороны, картина облачного поля ТЦ всегда представляет собой горизонтальную или наклонную проекцию его облачной системы, причем в этой проекции практически отсутствует информация о вертикальной структуре. Таким образом, представляется естественной попытка рассмотреть ТЦ в первом приближении как плоскую макроструктуру. При этом становится возможным представить ТЦ как целостный объект с достаточно простой двумерной структурой (здесь простота означает использование несложного математического описания с некоторым достаточно небольшим набором параметров).

Уже визуальный анализ картины облачного поля ТЦ, даваемой метеорологическим ИСЗ, показывает, что для описания геометрических особенностей наблюдаемой горизонтальной структуры облачной системы ТЦ может быть использована следующая эмпирическая макромодель состояния:

$$r = v(r, t) \cdot t, \quad (2)$$

$$\varphi = -\omega(r, t) \cdot t, \quad (3)$$

где использованы полярные координаты  $r$  и  $\varphi$ , а знак минус в уравнении (2) учитывает направление вращения облачных масс в ТЦ.

Исключая из системы уравнений (2) и (3) параметр  $t$ , можно получить выражение искомой эмпирической макромодели состояния ТЦ.

$$r = -\frac{v(r, t)}{\omega(r, t)} \cdot \varphi = -a(r, \varphi) \cdot \varphi \quad (4)$$

Заметим, что, согласно выражению (4), данная макромодель определяется единственной функцией  $a(r, \varphi)$ , физический смысл которой – отношение радиальной проекции скорости эффективного движения облачных масс к угловой скорости вращения облачных масс в точке с координатами  $r$  и  $\varphi$ .

На рис. 2 представлена картина облачного поля ТЦ Luis (08.09.1995) и три спирали типа (3) с фиксированными значениями  $a(r, \varphi)$ .

Поочередное наложение указанных спиралей на картину облачного поля ТЦ Луис показало, что центральная зона облачного поля ТЦ неплохо соответствует спирали с  $a(r, \varphi)=3$ , средняя часть – спирали с  $a(r, \varphi)=4$ , а периферия – спирали с  $a(r, \varphi)=5$ .

Для построения эмпирической макромодели состояния реальных ТЦ необходимо: 1) разработать на условных данных алгоритм оценки положения центра собственной системы координат ТЦ по условным

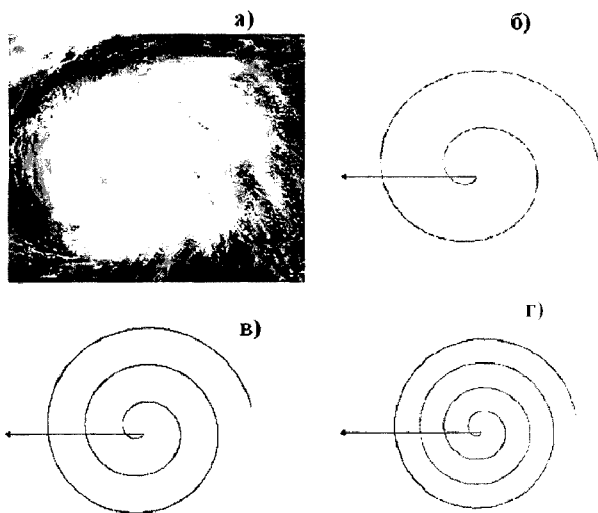


Рис. 2. Картина облачного поля ТЦ Луис (08.09.1995) – а) и спирали типа (3) с параметрами: б)  $a(r, \varphi)=5$ ; в)  $a(r, \varphi)=4$ ; г)  $a(r, \varphi)=3$

данным; 2) разработать алгоритм определения нулевого направления собственной полярной системы координат ТЦ по условным данным; 3) разработать алгоритм оценивания зависимости  $a(r, \varphi)$  по условным данным; 4) разработать алгоритм съема первичных данных с картины облачного поля ТЦ; 5) адаптировать алгоритм оценки положения центра собственной системы координат ТЦ по первичным данным; 6) адаптировать алгоритм определения нулевого направления собственной полярной системы координат ТЦ по первичным данным; 7) оценить устойчивость и погрешность результатов решения задач по пп. 5 и 6.

В основу предлагаемой эмпирической макромоделли была заложена следующая гипотеза характеризующая предполагаемое назначение модели.

1. В данной макромоделли ТЦ представляется как целостный системный объект со спиральной структурой, описываемой небольшим количеством макрохарактеристик (зависимость  $a(r, \varphi)$ ; положение центра собственной системы координат; нулевое направление собственной полярной системы координат). Указанные макрохарактеристики могут быть оценены по эмпирическим данным, получаемым с ИСЗ метеорологического назначения и/или с помощью сети МРЛ.

2. Оценки положения центра собственной системы координат ТЦ, полученные по первичным данным нескольких последовательных наблюдений, могут обеспечить текущую информационную базу для инерционного прогноза траектории движения данного ТЦ.

3. Определение текущего нулевого направления собственной полярной системы координат ТЦ может дать возможность накапливать информацию, необходимую для упреждающей коррекции прогноза траектории движения данного ТЦ.

4. Эмпирическая зависимость  $a(r, \varphi)$ , определенная по первичным данным для данного ТЦ, может обеспечить получение оценки текущего состояния ТЦ (уже достигнутой фазы его развития) и информационной базы

для прогноза дальнейшего развития ТЦ.

5. В случае необходимости полностью реализованная эмпирическая макромоделли состояния данного ТЦ может использоваться для формирования более сложной эмпирической модели, описывающей интегральный характер трехмерного течения среды. Таким образом может быть реализовано двухэтапное построение эмпирической модели, которая, в свою очередь, становится базой для теоретической модели, использующей законы аэро- или гидродинамики.

Ограничения предлагаемой макромоделли. Еще раз подчеркнем, что данная эмпирическая макромоделли состояния ТЦ не предполагает использование уравнений гидродинамики, поскольку результаты описания двумерных течений не адекватны структуре плоской проекции трехмерных течений. Одновременно такой подход не позволяет отразить такие свойства ТЦ, как приток воздуха в нижних слоях ТЦ и его отток в верхних слоях; стену облаков и зону дождей в стене глаза ТЦ; наиболее сильный ветер, наблюдающийся за кромкой стены облаков в стене глаза ТЦ; нисходящее движение воздуха в глазе ТЦ и слабый ветер в глазе ТЦ.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Вербжицкий В.М. Численные методы. Математический анализ и дифференциальные уравнения: Учебное пособие. М.: Высшая школа, 2001. 288 с.
2. Гандин Л.С. Объективный анализ метеорологических полей. М.: Гидрометеоиздат, 1966. 256 с.
3. Гилл А. Динамика атмосферы и океана. М.: Мир, 1986. Т. 1. 399 с. Т. 2. 416 с.
4. Гордин В.А. Воздушные связи, или как оценивать корреляционные функции // <http://edu.mcsme.ru/Project/OL/correlf.htm>.
5. Дезин А.А., Зеленьяк Т.И., Масленников В.И. О некоторых математических задачах в гидродинамике // Дифференциальные уравнения с частными производными. Новосибирск: Наука, 1980. С. 21-31.
6. Казанцев Ю.В. Тороидальная вихревая модель тропического циклона. Тр. ДВРНИ, 1984. Вып. 115 // Тропическая метеорология. С. 45-50.
7. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука, 1977. 407 с.
8. Ламли Дж., Пановский Г. Структура атмосферной турбулентности. М.: Мир, 1966. 248 с.
9. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. М.: Наука, 1980. 264 с.
10. Тамм И.Е. Основы теории электричества. М.-Л.: ГИТТЛ, 1949. 627 с.
11. Тунеголовец В.П. Стихия ДВ. Тайфуны <http://rus.hydromet.com/~danger/ohotsee.html>.
12. Фишман Б.Е. Оптимальность и развитие систем. Часть 1. Системы/ Учебное пособие для студентов БГПИ. Биробиджан, 2001. 72 с.
13. Kotschin N. Ueber einen Fall der adiabatischen Bewegung. Z. Phys., Bd. 17, N. 1. 1923. S. 73-78.