

О РОЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В ДИНАМИКЕ МОЩНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ВИХРЕЙ

С.Н.Артеха¹, Е.Гольбрайх², Н.С.Ерохин¹

¹Институт космических исследований РАН, Москва, ул.Профсоюзная 84/32, 117997, Россия ; ²Центр МГД-исследований Бен-Гурион университета, Бер-Шева, Израиль sergey.arteha@mtu-net.ru

Проблема зарождения, усиления и устойчивого существования мощных атмосферных вихрей типа тропических циклонов, ураганов и торнадо имеет как большое теоретическое, так и практическое значение. В настоящей работе сделана попытка с единых позиций взглянуть на эти кризисные явления с учетом важной роли электромагнитных сил. Рассмотрена электромагнитная модель тропических циклонов (ТЦ), включающая плазмоподобные подсистемы. Обращено внимание на целый ряд общеизвестных важных наблюдательных данных и дополнительных косвенных фактов, которые не объясняются общепринятыми чисто термодинамическими и гидродинамическими теориями ТЦ.

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования природы интенсивных атмосферных вихрей разрушительного характера типа тропических циклонов, ураганов, тайфунов, "пыльных дьяволов" и торнадо (смерчей) проводятся уже более 160 лет [1,2]. Это обусловлено большим теоретическим интересом к данным явлениям и практической важностью рассматриваемой проблемы (многочисленные человеческие жертвы и экономический ущерб: в среднем от одного тайфуна убытки оцениваются сотнями миллионов долларов). К настоящему времени достигнут значительный прогресс, в частности, определен ряд характерных внешних проявлений указанных кризисных процессов, выделен ряд факторов, без которых невозможна интенсификация ТЦ (необходимые условия). Например, в энергетическом балансе ТЦ важную роль играет скрытая теплота испарения; при этом температура океана в области зарождения ТЦ должна быть не меньше 26°C. С торнадо ситуация менее ясна, хотя имеются свидетельства некоторой корреляции торнадогенеза на территории США с изменением температуры поверхности Тихого океана.

Как правило, в исследованиях ТЦ основное внимание уделяется термодинамическому и гидродинамическому подходам. Однако, несмотря на многочисленные экспериментальные исследования ТЦ, накопленную базу экспериментальных данных, несмотря на наличие развитых теоретических моделей и компьютерных программ, проблема еще далека от своего окончательного разрешения. В идеале хотелось бы иметь теоретическую модель, которая объясняет и описывает основные черты изучаемых кризисных процессов, дает исчерпывающий ответ, в частности, на следующие вопросы: как зарождаются мощные атмосферные вихри и за счет каких механизмов поддерживается длительная квазистационарная фаза ТЦ; как и почему они исчезают; почему в одних случаях формируется тропическое возмущение, а в других, близких по состоянию, ничего не возникает; почему не все возмущения усиливаются до стадии ТЦ; в чем причина географической, временной и частотной асимметрии этих явлений; ка-

ковы их предвестники; как построить алгоритм долгосрочного прогноза траектории ТЦ.

К развитым на настоящий момент теориям (в различных модификациях) можно отнести представления, основанные на динамической (плюс термической) гипотезе, и концепцию самоорганизации. Динамическая гипотеза об образовании ТЦ при взаимодействии атмосферных фронтов холодных и теплых потоков опирается на термическую гипотезу, считающую основной энергетической причиной вихревого атмосферного движения высвобождение теплоты при конденсации водяного пара [3,4]. Реальные расчеты, однако, опираются на несколько внешне задаваемых (часто несамосогласованных) условий, включая использование внешнего поддерживаемого источника тепла (и конвекции), наличие крупномасштабной начальной флуктуации, гипотезу о взаимном усилении вихря и конвекции за счет трения о поверхность. Сложность этих теорий и наличие большого числа внешне задаваемых (фактически подгоночных) параметров затрудняет использование указанных моделей для прогнозов [5].

Альтернативная теория основана на концепции самоорганизации, а физическим механизмом, который обеспечивает изменение режима конвекции и возникновение мощных вихревых структур из мелкомасштабной спиральной турбулентности, является крупномасштабное вихревое динамо (обратный каскад турбулентности) [6].

Помимо указанных выше, в ТЦ наблюдается целый комплекс электромагнитных явлений, которым пока не уделяется должного внимания специалистов. Например, были зарегистрированы исключительно сильные электростатические поля ($10^5 - 10^6$ В/м [7]).

На важную роль электромагнитных полей обращалось внимание давно [1], было накоплено много экспериментальных данных [8,9], делались попытки учесть электромагнитные взаимодействия (ЭВ) и построить предварительные модели, например, EMHD [10]. Роль этих взаимодействий в динамике мощных вихревых структур исследована еще недостаточно. В данной работе ЭВ рассматриваются применительно к ТЦ в следующих целях : 1) обратить внимание на совокупность экспериментальных данных, не включенных в общепринятые развитые мо-

дели; 2) показать роль магнитного поля в формировании мощных вихрей, в поддержании их квазистационарной фазы и в закономерностях траекторий движения. Это позволит в последующем построить модели вихрей с учетом электромагнитных процессов, как в макро-, так и в микромасштабах, а также разработать предложения по экспериментальной проверке моделей и создать предпосылки для анализа возможностей воздействия на формирование и динамику мощных вихревых структур в атмосфере.

2. ФАКТЫ И НАБЛЮДЕНИЯ

Попробуем наряду с теми данными, которые хорошо укладываются в известные теории (без учета электромагнитных взаимодействий в вихревых структурах), рассмотреть "странные" или кажущиеся случайными факты, а также факты, составляющие "исключение из правил". Возможно, для приведенного ниже набора экспериментальных данных тоже можно найти свою систему выводов, но, по нашему мнению, наиболее логично это реализовать на основе модели вихря с учетом ЭВ. Начнем со статистических характеристик тайфуногенеза [5]. Длительные наблюдения и учет количества ТЦ в акваториях разных океанов приводит к следующим примечательным результатам.

1) В Северном полушарии зарождается и развивается в среднем в два раза больше ТЦ (от 4 раз в 1966 году до 1,5 раза в 1972 году), чем в Южном полушарии. Если считать, что основную роль в формировании крупномасштабных вихрей играет сила Кориолиса, то для осесимметричной Земли этот факт выглядит несколько странным. Ссылаясь на распределение температуры океана непоследовательно, поскольку в системе Земля – Солнце для осесимметричной Земли, казалось бы, среднегодовые вариации температуры в Северном и Южном полушариях должны быть близкими друг другу. Следовательно, как некоторая асимметрия распределения температуры океана, так и асимметрия в статистическом распределении ТЦ должны быть следствием определенного единого фактора, нарушающего осесимметричность системы, связанной с Землей.

2) Совсем непонятной с точки зрения существующих теорий оказывается асимметрия Западного и Восточного полушарий: в Восточном полушарии число возникающих ТЦ в два раза больше, чем в Западном полушарии (коррекции, связанные с разницей площадей океана и суши, не меняют положение дел). Снова следует вывод о существовании фактора, нарушающего симметрию теперь уже Восточного и Западного полушарий Земли.

3) Привязка к температурным условиям на поверхности океана не может полностью определять физику этих вихревых процессов. Так, на севере ТЦ наблюдаются и выше 35° северной широты, а на юге – нет. Поскольку среднее время существования вихря около недели, а в течение даже намного большего периода времени во многих частях океанов существуют нужные температурные условия (отток энергии должен начаться с поверхности), то странно, что на

юге ТЦ не возникают вовсе (сохранение высокой температуры означает недостаточность одного этого условия). Совершенно непонятным (в рамках традиционных представлений) кажется полное отсутствие ТЦ в нужной приэкваториальной зоне океана вблизи Южной Америки и вблизи Африки со стороны Атлантики. По регионам средние размеры ТЦ также отличаются: тихоокеанские являются наиболее крупными, а атлантические вихри несколько меньших размеров, но с большей скоростью вращения (встречаются также микротайфуны). И уж совсем непонятно наличие полярных тайфунов в районе Гренландии (правда, пока нет единого мнения, тайфуны это или нет). В качестве начального импульса для ТЦ не могут выступать и температурные контрасты в зоне конвергенции, так как многие ТЦ возникают в самой середине зоны пассатов с достаточно однородной воздушной массой.

4) Представление о том, что единственным источником энергии ТЦ является теплота конденсации водяного пара, а механизм трансформации движений в вихревые, закрученные потоки обусловлен трением о подстилающую поверхность океана, тоже нельзя считать безусловно обоснованным. Часто ТЦ даже при выходе на сушу существуют длительное время, не говоря уже о том, что значительная часть ТЦ "гибнет" над океаном. Не вполне понятно также, каким образом "возникающее от поверхности" вращательное движение в одном направлении может перейти в часто наблюдаемое на большей высоте вращение противоположного направления (антициклон над тайфуном). Предположим, что эти явления разные, с разными энергоисточниками и механизмами генерации вращения. Тогда приходим к принципиальному выводу о том, что и без прямого участия океана (как термодинамически неравновесной среды) возможно зарождение, развитие и поддержание крупных зон вращательного движения.

5) Если бы единственным энергетическим механизмом поддержания вихря было прямое механическое потребление тепловой энергии от океана, то должно происходить падение температуры по ходу движения ТЦ от его переднего фронта к заднему. Между тем наблюдаемое распределение температуры (давления и ряда других параметров) в ТЦ оказывается близким к осесимметричному. Следовательно, должен существовать ранее не исследованный "осесимметричный" механизм, перераспределяющий энергию и поддерживающий тенденцию для всех параметров вихря к установлению осесимметричного распределения. Здесь уместно отметить следующее. Вполне естественно предположить, что все устойчивые "вращательные" атмосферные вихри (циклоны, антициклоны, тайфуны, смерчи) имеют единую природу, т.е. порождаются одинаковыми причинами. Действительно, они схожим образом возникают и развиваются, относительно долгое время существуют в квазистационарной фазе и перемещаются как единое целое, пересекая местности с весьма разнообразным рельефом. Далее, не только ТЦ могут переходить в обычный циклон, но возмо-

жен и обратный переход, когда субтропический циклон переходит в ТЦ. Можно полагать, что эти вихри управляются единым (негидродинамическим и нетермодинамическим) механизмом, поскольку одной силы Кориолиса (обусловленной вращением Земли или наличием спиральности движения) совершенно недостаточно для объяснения структуры вихря. Существуют не только циклоны, но и антициклоны. Смерчи (торнадо) иногда имеют антициклоническое вращение и наблюдаются в разных частях Земли. Опускание "хобота" смерча сверху вниз указывает на то, что для генерации и усиления вихревого движения совершенно необязателен контакт аэродинамического течения с подстилающей поверхностью.

От критики существующих моделей ТЦ и их увязок с приведенными выше фактами перейдем теперь к наблюдениям и предложениям, которые свидетельствуют о существенной роли электромагнитных процессов в динамике интенсивных атмосферных вихрей.

1) Если посмотреть на карты магнитного поля Земли B и сопоставить их с картой зарождения и существования ТЦ, то обнаружится удивительное совпадение: ТЦ отсутствуют в тех областях, где вертикальная составляющая $H_z < 10^{-5}$ Тл (или дополнительное условие отсутствия ТЦ: напряженность нормального геомагнитного поля $H_n < 3,2 - 10^{-5}$ Тл). Что это, случайное совпадение или тот самый фактор, нарушающий осесимметричность системы Земля в атмосферных явлениях? Вспомним, что магнитная ось не совпадает с осью вращения Земли, а наклонена к ней на $11,5^\circ$ и смещена от центра Земли на 1140 км в сторону Тихого океана (по-видимому, "ревущие сороковые" на юге тоже связаны с указанным обстоятельством, поскольку здесь магнитное поле B достигает тех же величин, что и в областях тайфуногенеза).

2) Наибольшая тангенциальная скорость ветра в ТЦ наблюдается не вблизи поверхности Земли, а на некоторой высоте. По-видимому, именно здесь, а не у поверхности, действует основной механизм, вызывающий генерацию циклонического вращения. Затем, начиная с некоторой высоты, включается другой механизм, приводящий к антициклоническому вращению. При этом оказывается, что области действия указанных механизмов близки к областям локализации зарядов противоположных знаков. Возможно, это неслучайное совпадение.

3) Странными, не осесимметричными являются струи оттоков вверх ТЦ. Кроме того, их направление не является случайной функцией. Можно предположить, что большое влияние на данные струи оказывают заряженные частицы, стремящиеся дрейфовать к полюсам. В случае тихоокеанских тайфунов образуются две симметричные струи: по-видимому, электрические заряды здесь "чувствуют" и Северный и Южный магнитные полюса. В то же время в атлантических ураганах, как правило, образуется только одна струя. Наверное, эта особенность обусловлена относительной близостью Северного

магнитного полюса. К сожалению, пока нет данных о преимущественных зарядах этих струй оттоков, которые должны иметь избыточные заряды.

Таким образом видим, что учет электромагнитных явлений в ТЦ и в других кризисных атмосферных процессах может прояснить все вышеизложенные наблюдения. При этом на циклоническое вращение вихря наибольшее влияние оказывает низко лежащая (4 – 8) км отрицательно заряженная область, а антициклоническое движение определяется высоко лежащей (10 – 16) км положительно заряженной областью. Если возникающие заряженные области действительно играют большую роль в формировании, поддержании и движении вращающихся атмосферных образований, то более понятным становится и ряд других фактов. Например, циклоны возникают чаще антициклонов потому, что более плотной (расположенной ниже) отрицательной области проще поддерживать вращение всей атмосферной области в системе циклона, чем менее плотной (вследствие большей высоты расположения) положительной области "раскрутить" систему антициклона, а "организовать" меньшую по размерам систему всегда проще. По этой же причине средние размеры антициклонов оказываются больше, чем средние размеры циклонов, поскольку различен порог на размеры заряженных подсистем для поддержания вращения. По-видимому, влага способствует образованию отрицательно заряженной области, и потому над водной поверхностью чаще возникают циклоны. Температура в "глазе" ТЦ обычно повышена всего на $(0 - 2)^\circ\text{C}$, а иногда эта разность вообще незаметна, в то время как на высоте 12 км (местонахождение положительно заряженной области) повышение температуры достигает 10°C и выше, то есть механизмы ТЦ не привязаны к поверхности.

Ось циклона или антициклона, как правило, не вертикальна, а сильно наклонена к поверхности Земли. Напомним, что магнитное поле Земли также наклонено к поверхности, а из физики плазмоподобных систем следует, что заряженная область стремится иметь ось вращения по магнитному полю. В реальности наклон оси, прецессию и движение системы как целого определяют несколько факторов: гидродинамическая вращающаяся подсистема (связанная внизу с Земной поверхностью, а сверху с соответствующим потоком) и вращающаяся заряженная подсистема, стремящаяся двигаться по законам магнитной гидродинамики в самосогласованных неоднородных электрическом и магнитном полях. Именно поэтому чисто гидродинамические модели не могут описать такие движения в атмосфере. В отличие от обычных циклонов в ТЦ, где одновременно присутствуют две противоположно заряженные области, ось практически вертикальна. Возможно, данное обстоятельство обусловлено электрическими силами, которые стремятся расположить противоположно заряженные вращающиеся области друг под другом, симметризуя систему.

Одним из факторов, влияющих на уменьшение размеров вращающихся образований в ряду тайфуны – ураганы – торнадо, может являться увеличение вертикальной составляющей магнитного поля Земли. Именно поэтому торнадо наблюдаются в основном в субтропиках и умеренной зоне (второй важный фактор для горизонтального размера торнадо – движение в предгорьях, а не над океаном). Если идея электромагнитной природы ТЦ верна, то должна наблюдаться некоторая корреляция между появлением дополнительных заряженных частиц в атмосфере Земли и зарождением тропических депрессий (возмущений).

Еще одно наблюдение. Вблизи экватора на довольно низких высотах регистрируются высокоэнергетические частицы. Если бы они имели космическое происхождение, то в результате отклонения магнитным полем Земли их выпадения происходили бы ближе к полюсам. При отсутствии повышенной радиоактивности земной коры остается предположить, что такие частицы являются следствием развития кризисных атмосферных процессов (например, тайфунов). Процессы в ионосфере могут оказывать активное влияние на тайфуногенез. Известно, например, что во время магнитных бурь (или чуть позже) возникают отрицательные ионосферные возмущения в области F_2 (уменьшается отношение концентраций $n(O_2) / n(N_2)$), наблюдается разогрев и падение концентрации электронов n_e). При этом такие возмущения отсутствуют в приэкваториальной области [11], усиливаясь для высоких широт. Однако, иногда они наблюдаются только на средних широтах. Должно наблюдаться и взаимно обратное явление – отклики кризисных атмосферных процессов в ионосфере. Упомянем еще один факт: торнадо часто наблюдается в предгорьях. Если верно предположение о важной роли электромагнитных процессов, то данный факт можно объяснить наличием дополнительного истечения зарядов от выпуклых высоких горных поверхностей непосредственно в область, содержащую заряды (грозовое облако). В случае верности сделанных предположений открывается перспектива не только лучше прогнозировать зарождение, усиление и движение изучаемых природных вихревых структур, но, возможно, даже управлять различными стадиями их развития и траекторией движения.

3. ПЛАЗМЕННАЯ МОДЕЛЬ ВИХРЯ И НЕКОТОРЫЕ ОЦЕНКИ

Перейдем теперь к оценке электрических и магнитных сил в ТЦ и описанию качественной модели вихря в предтайфунной фазе. Известно, что плотность электрического заряда в ТЦ может достигать величин $(10^{-9} - 10^{-4})$ Кл/м³, а электрические поля составляют: вертикальное $E_z \sim (10^4 - 10^6)$ В/м [7,8], горизонтальное $E_y \leq 10^4$ В/м [9], причем наибольшие поля наблюдаются в стене "глаза" ТЦ и в полосах дождя. Соответственно, электрические силы, действующие в каждом кубическом метре объема тайфуна, в среднем будут порядка $F_e = qE \sim (10^{-5} - 10^2)$ Н.

Магнитные силы $F_m = qvB$ достигают значений до 10^5 Н. Оценим равновесную скорость, которую могут приобрести наночастицы льда радиусом r с зарядом N . Приравняв силы электрическую и Стокса в достаточно реальном случае заряда, равного заряду одной тысячи электронов, находящегося на микронном кристалле льда, получаем скорость 50 м/с. Как видим, скорости наночастиц могут быть довольно большими (тем большими, чем меньше их размер).

Для сопоставления гидродинамических сил с электромагнитными учтем, что заряженные области достигают в радиусе сотен и тысяч километров для ТЦ (и десятков километров для торнадо). При этом силы трения определяются градиентами скоростей. В результате абсолютные скорости ветра в ТЦ могут достигать значительных величин. Оценим центробежные силы $F_c = mv^2/R$: для скорости ветрового потока $v \leq 100$ м/с в стене "глаза" тайфуна с $R=5$ (мы намеренно берем малый радиус, чтобы увеличить центробежную силу) получаем силу $F_c \leq 2,6$ Н/м³. Силы Кориолиса имеют тот же порядок величины. Для градиента давления с характерным размером L имеем оценку $\nabla P \sim (1 \text{ км} / L) \cdot (\delta P / 50 \text{ Гпа}) \cdot 5 \text{ Н/м}^3$. Далее плотность электрической энергии (как плотность энергии заряженной области $W_1 = q \varphi / 2$, так и поля $W_2 = \epsilon E^2 / 2$) составляет по порядку ту же величину, что и плотность кинетической энергии ветровых потоков в ТЦ. Таким образом, электромагнитные силы сопоставимы с гидродинамическими и должны учитываться при анализе динамики вихря. Заметим еще, что уже обычная конвекция приводит к восходящему потоку газа, поэтому для "нетривиальной" топологии движения в тайфуне нужен дополнительно только механизм создания и поддержания вращательного движения, которое может обеспечиваться электромагнитными силами.

Чтобы понять, как и почему возникает вращательное движение, напомним известное явление из физики плазмы (так называемый $L - H$ переход). В плазменных устройствах самой различной конфигурации часто возникает вращение плазмы с большими скоростями $v \sim (0,2 - 0,8) v_s$, где v_s – скорость звука в плазме. Возникновение в присутствии магнитного поля B вращения в квазинейтральной плазме обусловлено следующим [12]. Центробежная сила по-разному действует на ионы и электроны вследствие различия их масс. В какую бы сторону относительно вектора B не возникло вращение, в результате частичного разделения зарядов возникнет электрическое поле E , направленное радиально, а в скрещенных полях E, B возникает азимутальный дрейф только одного направления и будет поддерживаться только вращение с частотой $\Omega \parallel B$. Разумеется, подобное разделение зарядов является малым, а электрическое поле слабым. Однако, если в системе есть избыток зарядов одного знака, то определяемое им электрическое поле может быть значительным, а скорость установившегося вращения весьма большой. При этом, несмотря на общий избыток заряда одного знака, его радиальное распре-

деление может на некотором радиусе менять знак и могут быть две области (вблизи оси и на периферии) с разными направлениями вращения. Таким образом, качественной моделью вихря может служить модель частично ионизированной плазмы в магнитном поле. Градиент температуры вносит дополнительный вклад во вращение вследствие температурно-градиентного дрейфа.

Для математического описания данной модели можно воспользоваться как подходом магнитной гидродинамики, так и кинетическим подходом. Если интересоваться только стационарным решением, то интеграл столкновений в кинетическом описании будет тождественно равен нулю, и основная задача состоит в нахождении стационарного распределения частиц с учетом того, что среда является многофазной и многокомпонентной, а частоты вращения компонент могут слегка отличаться друг от друга. Далее по аналогии с [12], для развитой фазы ТЦ можно записать стационарную систему интегродифференциальных уравнений, включающую электрическое поле, эффективные потенциалы зарядов, локальные частоты вращения компонент, степень ионизации ионов, силы вязкости, возмущения магнитного поля, обусловленные токами в вихре, перенос влаги и фазовые переходы пар – вода, закон Ома для заряженных подсистем. Из уравнений видно, что при наличии двух областей (с разными знаками избыточного заряда) заряженные частицы вблизи оси вращаются в сторону, противоположную заряженным частицам, удаленным от оси, т.е. имеем торообразную структуру вихря, вблизи оси которого может существовать область относительного затишья ("глаз" тайфуна). Если же имеется только одна сравнительно небольшая заряженная область (грозовое облако), то получаем более быстрое цилиндрическое вращение в одну сторону почти сразу от оси (торнадо). Хотя при большой скорости вращения в торнадо также возможно образование структуры типа ТЦ с "глазом" посередине. Для очень мощного ТЦ может реализоваться совсем экзотическая ситуация, когда внутри малой центральной заряженной области происходит разделение зарядов и образуются две противоположно заряженные области. Такое метастабильное состояние ТЦ с двумя "глазами" будет существовать, пока не произойдет релаксация зарядов и останется один "глаз". К сожалению, из качественного стационарного решения для предтайфунной стадии, учитывая необходимые характеристики атмосферы, можно численно оценить только характерные скорости или адиабатическое поведение в зависимости от некоторых параметров. Чтобы рассмотреть сам процесс возникновения, роста и установления ТЦ, а также поведение его в движении (траекторию), нужно переходить к математическому описанию явления в рамках последовательной ЕМНД-теории.

Большой интерес представляет процесс организации мощной облачной структуры ТЦ (где сосредотачивается значительное число зарядов). Здесь также большую роль могут играть силы электромаг-

нитной природы. Вспомним, например, известное явление диэлектрофореза, когда на частицу действует сила $F = 0,5 (\epsilon_1 - \epsilon_2) \partial E / \partial r$, перемещающая частицу с диэлектрической проницаемостью ϵ_1 в среде с проницаемостью ϵ_2 в область более высокого значения напряженности электрического поля. Поскольку диэлектрическая проницаемость водяного пара, и уж тем более воды и льда, существенно отличается от диэлектрической проницаемости воздуха, то упомянутая сила должна играть заметную роль в процессе увеличения локальной влажности, сгущивании облаков к заряженной зоне и удержании облаков в единой структуре. В развитом ТЦ эта сила также принимает участие в формировании движения частиц (примеси, воды, пара, льда) к оси ТЦ (подток). Заметим, что очень часто ТЦ возникают в океане над островами. Это может быть связано с локально повышенным зарядообразованием, связанным с большей нагретостью земной поверхности в окружении океана (увеличение испарения) и большей турбулизацией ветровых потоков (сложный рельеф поверхности островов). В результате действия всех этих механизмов для ТЦ формируется следующая структура заряженных областей (по высоте): между положительно заряженной земной поверхностью и отрицательным слоем тропопаузы вблизи земной поверхности в центре ТЦ существует небольшая область положительного заряда, далее на высоте (4 – 8) км находится наиболее существенная область отрицательного заряда, и, наконец, на высоте (10 – 16) км располагается область положительного заряда (заметим, что для торнадо практически отсутствует в центре нижняя область положительного заряда). Наличие вверху области положительного заряда дает возможность образования над тайфуном антициклона, что часто наблюдается.

В развиваемом подходе можно понять качественно еще одно явление – образование спиральных полос дождя в ТЦ. Сами по себе спиральные структуры не являются неожиданностью, так как приближение частиц к центру происходит именно по спиральям. Значительная устойчивость спиральных полос дождя определяется рядом факторов. Во-первых, в полосах дождя наблюдаются повышенные поля и их градиенты, что как уже указывалось, способствует дополнительному "сгущиванию" облачной структуры (взамен выпадающих осадков). Во-вторых, уже возникшие "зародыши" водяных капель и льда приводят к постепенному выпадению осадков именно в этой области. В-третьих, фактически наночастицы полос дождя ведут себя как пассивная примесь. Их движение несколько отличается от движения воздуха в ТЦ (как правило, отстает от среднего движения). В результате в полосы дождя собирается значительно большее количество испаряющегося водяного пара из тех ближайших секторов, где нет дождя. Теоретически общее число полос дождя может быть определено из баланса собранной (с большей области) и сконденсировавшейся влаги и количества осадков, выпавших в полосах дождя.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе сделана попытка систематизировать некоторые дополнительные "странные" факты, остающиеся за пределами анализа в традиционных теориях ТЦ. Основное внимание уделяется роли заряженных областей в формировании и поддержании вращательных атмосферных явлений и роли магнитного поля Земли в формировании несимметричной структуры тайфуногенеза. Рассмотрена плазменная модель крупномасштабного вихря для описания зарождения и последующей квазистационарной фазы ТЦ.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Hare. On the Causes of the Tornado or Waterspout // *Am. J. Sci. Arts.* 1837, v.2, p.153-161.
2. H. Riehl. *Tropical Meteorology*, McGraw-Hill, 1954, 346 p.
3. А.П. Хаин, Г.Г. Сутырин. *Тропические циклоны и их взаимодействие с океаном*. Л.: Гидрометеоздат, 1983, 271 с.
4. К.В. Ояма. *Об основных проблемах теории и моделирования тропических циклонов*. М.: Мир, 1985, 412 с.
5. Е.М. Добрышман. Некоторые статистические характеристики и особенности тайфунов // *Метеорология и Гидрология*. 1994, № 11, с.83-99.
6. С.С. Моисеев, Р.З. Сагдеев, А.В. Тур и др. Физический механизм усиления вихревых возмущений в атмосфере // *ДАН*. 1983, т. 273, вып. 12, с. 549-553.
7. T.C. Marshall, W.D. Rust. Electrical Structure and Up-draft Speeds in Thunderstorms over the Southern Great Plains // *J. Geophys. Res.* 1995, v. 100, p. 1001-1015.
8. B. Vonnegut. Electrical Theory of Tornadoes // *J. Geophys. Res.* 1960, v. 65, p. 203-212.
9. R.A. Black, J. Hallet. Electrification of the Hurricane. // *J. Atmos. Sci.* 1999, v. 56, p. 2004-2028.
10. E.Y. Krasilnikov. Electromagnetohydrodynamic Nature of Tropical Cyclones, Hurricanes, and Tornadoes. // *J. Geophys. Res.* 1997, v. 102, p. 13571-13580.
11. А.Д. Данилов. *Популярная аэрономия*. Л.: Гидрометеоздат, 1978, 253 с.
12. S.N. Artega. The Effects of the Rotation in Plasma. // *Phys. Plasmas*. 1996, v. 3(8), p. 2849-2858.