

О связи крупномасштабных вихревых атмосферных процессов с электромагнитными явлениями

Содержание

1 Введение	3
2 Некоторые наблюдательные данные	5
3 Движение плазмоподобных подсистем	11
4 Электромагнитные силы и спиральные характеристики тропических циклонов	13
5 Упрощенная модель генерации вращения плазмоподобных подсистем для квазистационарной фазы тропических циклонов	16
6 Заключение	18

Abstract

It is described systemized data which testify the important role of electromagnetic phenomena in crisis large-scale atmospheric processes like typhoons (TC). The necessity to take into account the plasma subsystems influence on characteristics of tropical cyclones forming and their trajectories is shown. It is investigated the electromagnetic forces influence on the hydrodynamical helicity generation in TC and its modulation. The simplified model describing nanoparticles and ions motion in TC with account electromagnetic forces is presented.

1 Введение

Электромагнитные явления повсеместно распространены в окружающем нас мире. Выразительным примером здесь служит электрическая активность, проявляющаяся в кризисных атмосферных явлениях. Среди подобных атмосферных явлений наиболее впечатляющими по масштабам являются ураганы, тайфуны или тропические циклоны (которые мы будем в дальнейшем именовать ТЦ). Настоящая статья в основном и посвящена исследованию этих крупномасштабных вихревых атмосферных явлений.

Напомним, что же представляют собой ТЦ. По высоте их размеры достигают 20 км (в среднем – 16 км). Размеры по горизонтали зависят от географического положения: в Атлантике диаметр ураганов составляет от 200 км до 900 км (в среднем диаметр – 600 км), а в Тихом океане диаметр тай-

фунов составляет от 600 км до 2000 км (средняя величина – 900 км). Глаз тайфуна имеет горизонтальный размер от 5 км до 50 км (но бывает и до 150 км), толщина облачной стены глаза ТЦ порядка 20 км. В глазе тайфуна воздух совершает нисходящее движение и нагревается. На нижних (по высоте z) уровнях воздух с периферии движется к глазу тайфуна и в окрестности стены глаза совершает восходящее движение. В нижней части ТЦ обычно наблюдается циклоническое движение, которое на уровнях $P < 150$ гПа сменяется антициклоническим движением.

Систематическим исследованием природы ТЦ, пыльных дьяволов и торнадо (или смерчей) занимаются уже более 160 лет [1,2] и во многих странах мира на эти цели тратятся огромные силы и достигнутый значительный прогресс в данной области исследования [1–7] (например, определение ряда необходимых условий для процесса интен-

фикации ТЦ), ситуация остается далекой от создания исчерпывающей алгоритмической теории [8,9]. При этом в основном развиваются гидродинамические теории. Однако, несмотря на возможности краткосрочного угадывания траекторий, они пока не способны дать ответ на ряд ключевых вопросов, касающихся механизмов зарождения и интенсификации ТЦ, поддержания их стационарной фазы, наличия географической, временной, частотной и других асимметрий.

Возможно, вследствие излишней специализации в науке целый комплекс явлений (а именно электромагнитные явления), наблюдаемых в ТЦ, остается без должного внимания специалистов в области ТЦ. В то же время, например, экспериментальные наблюдения свидетельствуют о наличии протяженных заряженных областей в структуре ТЦ и сильных электромагнитных полей в области ТЦ и торнадо [10–14]. Во всех подобных явлениях можно усмотреть механизм воспроизводства заряженных частиц посредством трения. Даже в явлении иной природы, таком как пылевые бури, имеет место интенсивная генерация зарядов на пылинках при их трении друг о друга. По-видимому, трение льдинок друг о друга играет большую роль в снежных смерчах и смерчах, образующихся иногда между облаками. Большое количество воды, втянутое смерчем, гасит его. Возможно, это связано с увеличением размеров капель (с соответствующим уменьшением отношения их поверхности к объему, играющему роль в механизме трения) и с ослаблением механизма разделения зарядов в более плотной среде. В ряде явлений присутствует явный механизм образования ионов: например, смерчи случаются над мощными пожарами или при извержениях вулканов (в этих случаях смерчи привязаны к конкретному источнику поддержания ионов и быстро разрушаются, как только теряется с ним контакт).

Ранее проведенные оценки [9,15] доказывают важную роль электрических сил в подтоке к оси, в левитации частиц, то есть в организации восходящих потоков и облачной структуры. С магнитной силой ситуация сложнее — она намного меньше остальных существующих сил. Хотя на самом деле общепринятое простое сравнение сил в физике может помочь для выяснения характера процессов только на небольшом линейном участке. Понять это можно на простом примере. Пусть точная сила, вызывающая заданное поведение системы есть \mathbf{f}_0 . Ничего не изменится, если к этой силе будет добавлено любое число N иных сил \mathbf{f}_i , сколь угодно больших по абсолютной величине, лишь бы сумма их всех давала ноль. На самом деле природа всегда скрывает от нас эту единственную точную силу \mathbf{f}_0 , а проявляет для нас сразу все подобные силы в некоторых комбинациях: $\mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \dots + \mathbf{F}_n$, где $\mathbf{F}_1 = \mathbf{f}_0 + \mathbf{f}_1 + \dots + \mathbf{f}_j$, ..., $\mathbf{F}_n = \mathbf{f}_{k+1} + \dots + \mathbf{f}_N$. Естественно, что сопоставление между собой сил

\mathbf{F}_i не имеет отношения к поиску точного выражения \mathbf{f}_0 . Конечно, если бы мы знали точные аналитические выражения сил \mathbf{F}_i , то в математике разработаны строгие процедуры линеаризации. Однако, во-первых, для ТЦ мы не знаем точных выражений для всех сил. Во-вторых, многие процессы в ТЦ носят существенно нелинейный характер. И, наконец, вопрос можно переформулировать по-другому. Уравнения гидродинамики содержат в себе реализацию любого наперед заданного процесса (при соответствующих начальных и граничных условиях). Уж если при отсутствии "направленных" сил система может перейти в состояние ТЦ, то, как меняется вероятность перехода именно к интересующему нас состоянию ТЦ при действии сил, целенаправленно осуществляющих такой переход (то есть сил, "в бесконечное число раз больших", чем ноль!)? Кроме того, надо учесть, что всегда существуют временные и пространственные масштабы, для которых иногда происходят локальные нарушения выбранных нами (даже самых строгих и корректных) приближений. На этих малых участках фазовых траекторий происходит систематический тренд состояния под действием "целенаправленных" сил. Таким образом, в общем нелинейном случае пренебрежение "целенаправленными" силами закономерно только в том случае, если интегральный эффект от их действия за время существования данного процесса мал по сравнению с реально наблюдаемыми проявлениями исследуемого процесса. С этой точки зрения учет магнитных сил также необходим, так как они участвуют в формировании и поддержании четко фиксированной структуры ТЦ. На самом деле при обычном гидродинамическом описании "скрытым образом" все равно всегда задается направление развития системы (либо через искусственное задание большой начальной завихренности, либо задавая желаемый вид искомого решения). Однако, если этот ключевой момент уже задан "вручную", то что, спрашивается, мы ищем? Хотелось бы найти именно физический механизм, ответственный за переход к ТЦ и поддержание его структуры.

Выполненная работа ни в коем случае не претендует на полное замещение существующих развитых теорий, а, скорее, дополняет их исследованием еще одной грани этих сложных атмосферных явлений. Так, если подходить к проблеме образования ТЦ с точки зрения концепции самоорганизации [6–7], то необходимо выполнить дополнительные исследования влияния электромагнитных сил на характеристики флуктуаций и их модуляцию в пределах ТЦ. Процессы в ионосфере могут оказывать самое активное влияние на тайфуногенез. Должно наблюдаться и взаимно обратное явление — отклики данных атмосферных процессов в ионосфере [16]. Известно, например, что над областями интенсивного тайфуногенеза наблюдаются долгоживущие струк-

туры, обнаруживаемые по изменениям концентрации озона и др. Раскрытие роли энергообмена ТЦ с открытой системой — ионосферой — требует дополнительного исследования. Для этого также необходима систематизация наблюдательных данных.

Основные цели работы следующие:

- Обратить внимание исследователей на совокупность опытных данных (не включенных в общепринятые развиваемые направления), касающихся роли магнитного поля Земли и электромагнитных процессов в ТЦ, роли взаимодействия ТЦ с открытой системой — ионосферой;
- Исследовать вклад электромагнитных сил в характеристики спиральности в ТЦ;
- Построить упрощенную модель квазистационарной фазы ТЦ.

2 Некоторые наблюдательные данные

Для начала приведем некоторые данные по характерным гидродинамическим параметрам ТЦ [3]. Центральная зона ТЦ (глаз и стена тайфуна) занимает область $z < 15$ км, $r < 50$ км. В ней вблизи стены глаза наблюдаются следующие характерные величины: градиента давления $|\nabla P| \sim 4 \cdot 10^{-2}$ Н/м³, азимутальной скорости $v_\varphi \sim 50$ м/с, вертикальной скорости $v_z \sim 20$ м/с. В глазе ТЦ имеем относительное затишье и все величины гораздо меньше: например, радиальная v_r и вертикальная v_z скорости $v_r \sim 2$ м/с, $v_z \sim 0.2$ м/с. Величина объемной центробежной силы на средних уровнях (при $\langle \rho \rangle \approx 0.6$ кг/м³) в стене глаза порядка $\langle \rho \rangle v_\varphi^2/r \sim 3 \cdot 10^{-2}$ Н/м³, где $\langle \rho \rangle$ — средняя по высоте плотность воздуха. Для объемной силы Кориолиса на нижних уровнях в окрестности глаза тайфуна получаем оценку $F_k \approx 3.2 \cdot 10^{-3} \cdot (\text{Н/м}^3) \cdot (v_\varphi/50 \text{ м/с})$. В пограничном слое $v_\varphi \sim 30$ м/с, радиальная скорость $v_r \sim 10$ м/с. Средний градиент давления в пограничном слое создает объемную силу величиной $F_p \sim 4 \cdot 10^{-3}$ Н/м³. Средняя (наибольшая по объему) часть ТЦ расположена в области $1 \text{ км} < z < 10 \text{ км}$, $50 \text{ км} < r < 500 \text{ км}$. В ней имеем оценку $|\nabla P| \sim 2 \cdot 10^{-3}$ Н/м³. Характерные скорости воздуха в этой зоне следующие: $v_\varphi \sim 30$ м/с, $v_r \sim 1$ м/с. Зоне оттока соответствует область $10 \text{ км} < z < 15 \text{ км}$, $50 \text{ км} < r < 500 \text{ км}$. В ней при оценках можно полагать: $v_\varphi \sim v_r \sim 10$ м/с, $v_z \sim 5$ см/с, $|\nabla P| \sim 2 \cdot 10^{-4}$ Н/м³, $\langle \rho \rangle \sim 0.4$ кг/м³.

В отличие от тропических циклонов мощные вихри типа смерчей и торнадо имеют существенно меньшие размеры, однако в них скорости ветров значительно больше. Типичный горизонталь-

ный размер торнадо находится в диапазоне от 100 м до 1000 м, в вертикальном направлении он простирается до высот $z \sim (1 \div 14)$ км. Максимальные скорости ветра в торнадо достигают значений $(100 \div 300)$ м/с и выше. Внутри воронки смерча регистрируются сильные нисходящие потоки. Обусловленная градиентом давления объемная сила имеет порядок $F_p \approx 80 (\text{Н/м}^3) \cdot (\delta P/40 \text{ гПа}) \cdot (50 \text{ м/г})$. Характерная скорость ветра в приземной части торнадо $v_m \sim 100 \cdot (\delta P/50 \text{ гПа})^{1/2} \cdot \text{м/с}$.

Приведем также кратко тот "критический" набор данных, который заставляет задуматься о возможной роли электромагнитных факторов в исследуемых атмосферных явлениях [9]. В первую очередь здесь стоит упомянуть географическую асимметрию тайфуногенеза. Так, в северном полушарии зарождается и развивается в среднем в два раза больше ТЦ, чем в южном полушарии. Разделение же на западное и восточное полушарие с точки зрения гидродинамики является чисто условным, но, тем не менее, наблюдается четкая асимметрия тайфуногенеза: в восточном полушарии число возникающих ТЦ в два раза больше аналогичного числа в западном полушарии. Вообще говоря, область зарождения ТЦ находится не просто в приэкваториальной зоне (как должно быть из чисто гидродинамических соображений), а скорее на пересечении приэкваториальной зоны и зоны вблизи геомагнитного экватора (возможно есть порог на вертикальную составляющую геомагнитного поля). Средние размеры ТЦ в Атлантическом и Тихом океанах различаются (антикоррелируют с величиной геомагнитного поля в области их зарождения). Многие Приведем также кратко тот "критический" набор данных, который заставляет задуматься о возможной роли электромагнитных факторов в исследуемых атмосферных явлениях [9]. В первую очередь здесь стоит упомянуть географическую асимметрию тайфуногенеза. Так, в северном полушарии зарождается и развивается в среднем в два раза больше ТЦ, чем в южном полушарии. Разделение же на западное и восточное полушарие с точки зрения гидродинамики является чисто условным, но, тем не менее, наблюдается четкая асимметрия тайфуногенеза: в восточном полушарии число возникающих ТЦ в два раза больше аналогичного числа в западном полушарии. Вообще говоря, область зарождения ТЦ находится не просто в приэкваториальной зоне (как должно быть из чисто гидродинамических соображений), а скорее на пересечении приэкваториальной зоны и зоны вблизи геомагнитного экватора (возможно есть порог на вертикальную составляющую геомагнитного поля). Средние размеры ТЦ в Атлантическом и Тихом океанах различаются (антикоррелируют с величиной геомагнитного поля в области их зарождения). Многие ТЦ возникают в самой середине зоны пассатов с совершенно однородной воздушной массой, то есть фраза о большом

начальном импульсе и температурных контрастах в зоне конвергенции голословна. Неверным является утверждение об единственном механизме поддержания движения через контакт с океаном: часто ТЦ даже при выходе на сушу существуют длительное время, не говоря уже о том, что значительная часть ТЦ гибнет над океаном. Кроме того, над ТЦ наблюдается вращение противоположного направления (антициклон над тайфуном), явно возникающее без контакта с поверхностью океана. Если бы существовал только чисто гидродинамический механизм, приводящий к увеличению момента вращения ТЦ, то существующие достаточно объемные начальные закрутки в обоих направлениях "подхватывались" бы и в обоих полушариях достаточно часто должны были бы наблюдаться ТЦ, вращающиеся как по-, так и против часовой стрелки. А это не так: направление вращения ТЦ является для каждого полушария (северного и южного) фиксированным. Значит, должен существовать механизм, стоящий "над" гидродинамической и термодинамической моделью и помогающий поддерживать четко фиксированную структуру этого явления. Например, хобот смерча опускается сверху, то есть для зарождения и развития вихревого движения совершенно необязателен контакт аэродинамического течения с поверхностью. ТЦ также зарождается не от поверхности, а спускается с некоторой высоты. Наибольшая тангенциальная скорость в ТЦ наблюдается на некоторой высоте, а начиная с некоторой высоты включается другой механизм, приводящий к антициклоническому вращению. При этом области действия указанных механизмов близки к областям локализации зарядов противоположных знаков. Струи оттоков сверху ТЦ не являются осесимметричными и их направление не является случайной функцией. Возможно, большое влияние на эти струи оказывают заряженные частицы, стремящиеся дрейфовать к полюсам. Ось циклона или антициклона средних широт как правило не вертикальна, а сильно наклонена к поверхности Земли. Напомним, что магнитное поле Земли также сильно наклонено к поверхности, а 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 наверху с соответствующим потоком, и вращающаяся заряженная подсистема, стремящаяся двигаться по ЭМГД-законам в самосогласованных неоднородных электрическом и магнитном полях. В ТЦ присутствуют сразу две противоположно заряженные области и ось оказывается практически вертикальной, что может быть связано с электрическими силами, располагающими противоположно заряженные вращающиеся области друг под другом и симметризирующими систе-

му.

Для целей наблюдения и прогноза необходимо знать размеры заряженных областей, их заряды и характеристики движения. Кроме того для выявления ионосферно-магнитосферных связей тайфунов представляет интерес измерение протяженных по высоте азимутальных электрических полей, способных создавать вертикальный дрейф заряженных частиц и их переход на низкие L -оболочки, а также установление пространственного взаиморасположения вихря и его ионосферных отпечатков. Далее, наблюдаемые спутниковой аппаратурой потоки энергичных электронов на низких L -оболочках могут быть обусловлены грозовой активностью мощных облачных систем ТЦ, в которых ускоряющие потенциалы могут достигать значений порядка 10^6 В. Теоретические исследования и экспериментальные наблюдения электромагнитных взаимодействий в ТЦ и их проявлений на ионосферно-магнитосферных высотах, соответствующих пространственно-временным характеристикам, необходимы для разработки новых методов диагностики и дистанционного зондирования крупномасштабных кризисных атмосферных процессов. При этом следует отличать средние (или наиболее характерные) величины от локальных значений величин (могут отличаться на порядки). Заметим, что на границе заряженного облака как правило присутствует экранирующий слой, что затрудняет интерпретацию данных, полученных дистанционно, и получение истинных значений электрических величин. Некоторые типичные значения электрических параметров приведены в [15]. Была обнаружена переориентация кристаллов облаков в сильных электрических полях [17]. Для кучево-дождевых облаков внизу расположен малый положительный заряд, выше — основной отрицательный заряд, над которым находится уже основной положительный заряд. В наэлектризованных облаках неоднородности заряда и градиента электрического потенциала $\nabla\Phi$ могут возбуждаться под действием различных механизмов, в том числе волнами плавучести. После удара молнии характерное время восстановления поля составляет секунды. Для скорости генерации электрического заряда в облаке часто принимают величину $\sim (0.1 \div 1)$ Кл/км².с. Наличие восходящих и нисходящих струй способствует росту заряда, а турбулентность и конвекция — генерации неоднородностей поля, в которых оно может достичь пробойных значений. Наблюдаются также многослойные электрические структуры облачности [12,14]. Так, в эксперименте Wayene [12] зарегистрирована электрическая структура из 8 слоев заряда, расположенных снизу вверх (до 14 км) в следующем порядке: + - + - + - +-. Толщины слоев менялись от 400 м до 2600 м. Объемная плотность электрического заряда варьировалась в пределах

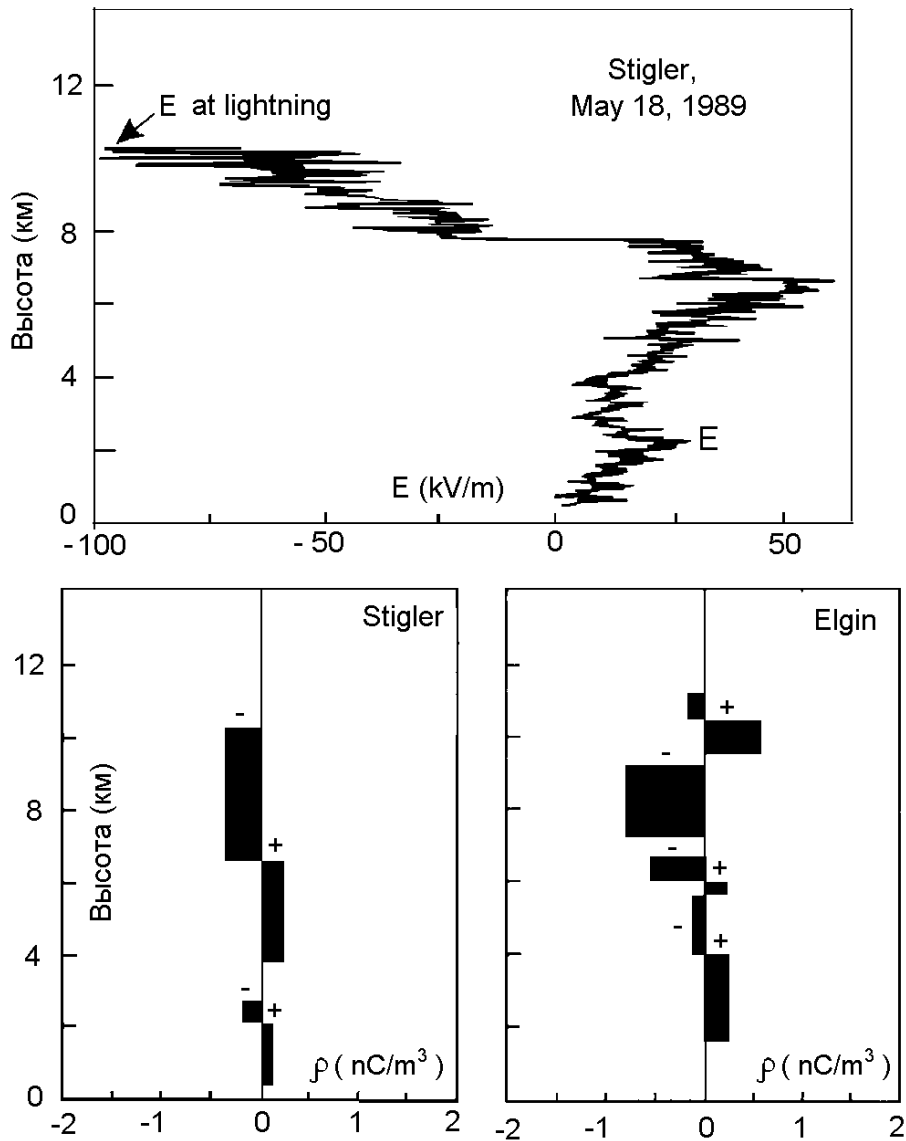


Рис. 1.

$\rho_q \sim (0.1 \div 2.4) \cdot 10^{-9}$ Кл/м³, максимальное поле $\max E_z \approx 115$ кВ/м было на высоте $z \approx 6.3$ км. В случае изолированного суперячейкового шторма (эксперимент Ada) $\max E_z \approx 126$ кВ/м наблюдался на высоте $z \approx 4.8$ км. Расположение заряженных слоев в порядке возрастания высоты было следующим: $+ - + 0 + 0 - 0 - +-$ начиная с $z \approx 3.2$ км и до $z \approx 10.2$ км. Толщины слоев ≤ 700 м, $\max \rho_q \sim 1.34 \cdot 10^{-8}$ Кл/м³. При нормировке величин на характерные значения действующая на заряженную подсистему электрическая объемная сила составит $F_E \sim 10^{-3} \cdot (E \cdot \text{м}/10^5 \text{ В}) \cdot (\rho_q \cdot \text{м}^3/10^{-8} \text{ Кл}) \cdot \text{Н}/\text{м}^3$. В эксперименте Elgin было зафиксировано 7 заряженных слоев, расположенных по высоте в следующем порядке $+ - + - 0 - 0 + -$ начиная с $z = 1.4$ км. Максимум плотности объемного заряда $\rho_q \sim 0.8 \cdot 10^{-9}$ Кл/м³ был на высоте $z \approx 8$ км. Толщина этого слоя порядка 2000 м. Экстремаль-

ные величины электрического поля E_z в этом эксперименте: $E_z \approx 39$ кВ/м на высоте $z \approx 3.8$ км, $E_z \approx -61$ кВ/м было на высоте $z \approx 7.8$ км и $E_z \approx 48$ кВ/м на высоте $z \approx 10.2$ км. Можно привести примеры распределения поля и получающихся итоговых величин объемной плотности заряда по высоте для многослойных структур интенсивного вихря (см. рис. 1).

Типичное поведение поля при интенсификации ТЦ следующее: поле вначале растет очень медленно, затем внезапно достигает своего максимального значения (100–300 кВ/м, а локально и выше). По достижении электрическим полем облака пробойного значения, которое обычно порядка 10^6 В/м (но бывает пробой и при 400 кВ/м), происходит разряд со сбросом накопленного заряда и выделением значительной энергии. Характерная величина заряда, сбрасываемого за один удар молнии, порядка

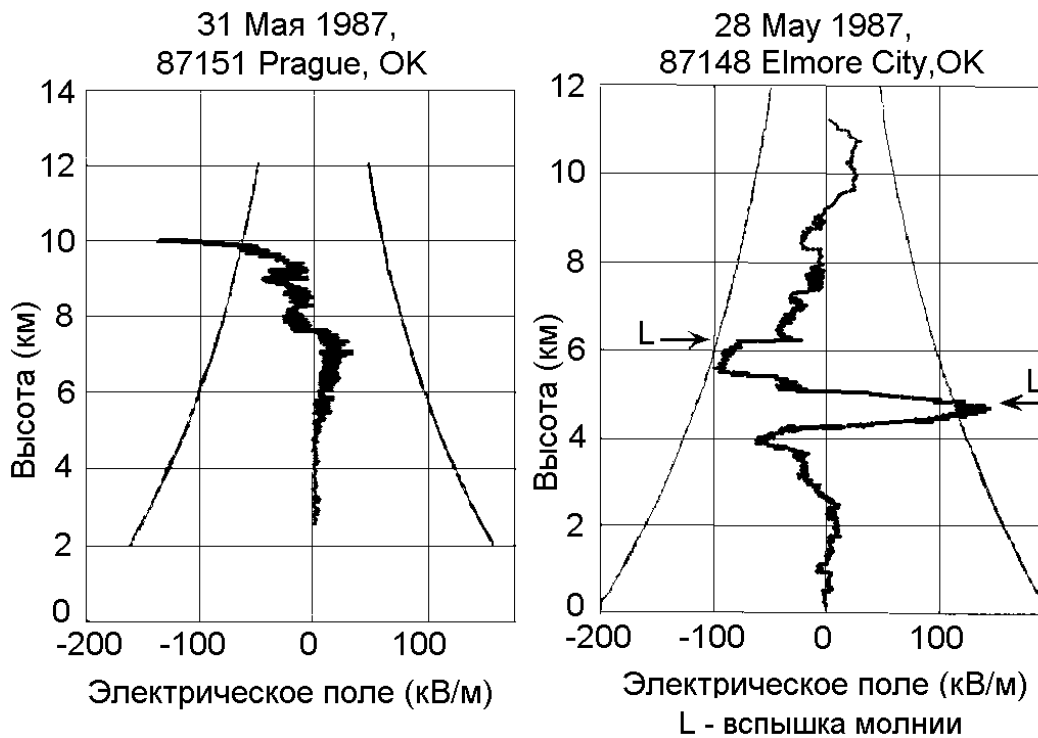


Рис. 2.

(10 ÷ 30) Кл, а в сильных грозах ~ 100 Кл. На рис. 2 показано поведение поля по высоте (плавными кривыми показаны кривые пробоя, *L* – место вспышек молний).

Как известно, в канале молнии диаметром 10 см образуется $10^{13} - 10^{15}$ пар ионов на каждый сантиметр пути. Следует также отметить, что зачастую удары молний проходят по одному каналу, в котором ионы не успевают рекомбинировать за промежуток времени между ударами. Для ТЦ частота молниевых ударов весьма переменна (1 ÷ 700)/час. Эта величина кажется большой, но при учете объема ТЦ она очень мала, что отмечается многими исследователями. Возможно, электрическая структура ТЦ более регулярна, чем в случае гроз умеренных широт, так как принимает участие в поддержании стационарной фазы ТЦ. Отметим, что мелкомасштабный вертикальный ток разряда радиусом r возбуждает магнитное поле величиной $B_{\varphi} \leq 1.2 \cdot 10^{-1} \cdot (I_z/100 \text{ кА}) \cdot (0.6 \text{ м/г}) \text{ Тл}$. В развитом тайфуне азимутальное движение заряженных частиц создает достаточно высокую плотность тороидальной компоненты тока j_{φ} . Нормируя плотность заряда и азимутальную скорость на характерные значения получаем для тороидальной компоненты плотности тока величину $j_{\varphi} = 5 \cdot 10^{-7} (\text{А/м}^2) \cdot (\rho_q \cdot \text{м}^3/10^{-8} \text{ Кл}) \cdot (v_{\varphi} \cdot \text{с}/50 \text{ м})$. При сечении азимутального токового шнура $S_{\varphi} = 500 \text{ км}^2$ имеем следующую оценку крупномасштабного азимутального тока $I_{\varphi} = 250 \text{ А} \cdot (\rho_q \cdot \text{м}^3/10^{-8} \text{ Кл}) \cdot (v_{\varphi} \cdot \text{с}/50 \text{ м}) \cdot (S_{\varphi}/500 \text{ км}^2)$. В свою очередь ток I_{φ} порождает по-

лоидальное магнитное поле, сжимающее токовый шнур.

Взаимодействие ТЦ с более крупной открытой системой – ионосферой и космосом можно условно разделить на два аспекта:

1. воздействие ионосферы и космических факторов на процессы, происходящие в ТЦ [18,19]
2. влияние ТЦ на ионосферу [20–28].

Начнем с первого аспекта. Процессы в ионосфере могут оказывать самое активное влияние на тайфуногенез, хотя возможное влияние ионосферных возмущений и космических факторов на инициацию процесса зарождения тайфунов и ряд других физических процессов в ТЦ изучено недостаточно. Здесь возможно проявление нескольких механизмов, в том числе связанных с трансформацией волн. Во-первых, стоит подробнее разобраться с влиянием солнечных вспышек на зарождение тропических депрессий, включая прямое воздействие космических лучей на инициацию молниевых вспышек. Во-вторых, необходимо обратить внимание на возможность взаимодействия ионосферы с плазмopodobными подсистемами вихря с помощью электромагнитных волн. Кроме того, сами плазмopodobные подсистемы могут меняться при изменении электрического поля изменяться путем появления дополнительного количества аэрозолей. В первую очередь стоит упомянуть прямой механизм влияния солнечной активности (общего солнечного излучения) на климат, учитываемый через солнеч-

ную константу метеорологии. Большую роль играет также ультрафиолет и солнечный ветер (поток частиц). Например, обнаружена связь похолоданий с маундеровским минимумом активности солнечных пятен. С числом солнечных пятен коррелируют также вариации температуры морской поверхности, что может быть напрямую связано с тайфуногенезом (вспомним о пороговой температуре 26.1 °С для образования ТЦ). Хотя напрямую мощность космических лучей $\sim 10^{-9}$ Вт/см² слишком мала по сравнению с мощностью погодных явлений, наблюдается ее корреляция с ежедневными и с долгопериодическими вариациями метеопараметров. При этом наблюдается также изменение вертикального профиля температуры, что влияет на градиент давления и, следовательно, на циклогенез. Количество штормов и молний коррелирует с числом солнечных пятен, с геомагнитным индексом и потоком радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см, с нейтронным потоком, с потоком космических лучей. При вспышках турбулентность солнечного ветра увеличивает поток частиц, попадающих на Землю. Космические лучи влияют на ионизацию (модулируют производство ионов) и проводимость атмосферы на высотах от 3 до 35 км. Средний атмосферный ток коррелирует с потоком космических лучей, а число молний в год коррелирует со скоростью производства ионов. Производство пространственного заряда влияет на нуклеацию. Концентрация заряженных частиц вблизи поверхности облаков достигает порядка ($10^3 - 10^4$) е/см. Солнечный ветер модулирует вертикальный ток и влияет на микрофизику облаков. Это и процессы электроочистки, уменьшение альбедо, и изменение ширины полос пропускания по отношению к падающему длинноволновому излучению и др. Можно предложить механизм изменения полос пропускания атмосферы. Ультрафиолетовое излучение связано с ионизацией, производством озона и свободных радикалов. Существует также взаимосвязь потока космических лучей с облачностью через дополнительную ионизацию капелек в облаках и зародышеобразование. Меняются также характеристики глобальной электрической цепи, она модулируется влиянием солнца [29]. Обнаружена корреляция между увеличением электрического поля в атмосфере и увеличением концентрации аэрозолей (для аэрозолей размером $\sim 0.1 \mu\text{m}$ коэффициент корреляции $\sim 70\%$, а для аэрозолей $\sim 0.3 \mu\text{m}$ корреляция $\sim 61\%$). Ионы в свою очередь влияют на атмосферные процессы через:

1. зарядово-зависимые химические реакции,
2. формирование капель и льдинок в процессе конденсации на зародышах,
3. через токи в глобальной электрической цепи (максимум потоков заряженных частиц и про-

изводства ионов в атмосфере находится на высотах 12–17 км).

Еще один возможный механизм солнечно-земных связей следующий: солнечная вспышка вызывает возмущения в полярных зонах (нагрев), что приводит к образованию гравитационных волн, распространяющихся в тропическую зону, где эти волны могут оказывать непосредственное влияние на атмосферные процессы в ТЦ.

Перейдем теперь ко второму аспекту — откликам данных атмосферных процессов в ионосфере. Интенсивные атмосферные вихри, такие как ТЦ, способны приводить к реально регистрируемым возмущениям геофизических полей, что можно использовать в диагностических и прогностических целях. Воздействие процессов, происходящих в ТЦ, может передаваться разными механизмами: звуковыми волнами (в первую очередь инфразвуком), внутренними гравитационными волнами и электромагнитными волнами. Существует корреляция между амплитудой инфразвуковых пульсаций давления и интенсификацией тропических депрессий (например, при сопоставлении с процессом установления профиля давления в ТЦ). Известно, что над областями интенсивного тайфуногенеза наблюдаются долгоживущие структурные образования, обнаруживаемые, например, по изменениям концентрации озона и др. Озон интересен для наблюдения, так как он, с одной стороны, является индикатором электрической активности атмосферы (включая коронирующие разряды на облачных каплях), а, с другой стороны, может участвовать в процессах образования и разделения зарядов (вследствие высокой электрохимической и фотохимической активности). ТЦ в процессе своего развития вызывает вариации как общего содержания озона, так и его вертикального распределения, вплоть до стратосферных высот. Например, общее содержание озона (северное полушарие) имеет отрицательную аномалию для большей части вокруг ТЦ (кроме левого квадранта по ходу движения, которое занято положительной аномалией). Относительное уменьшение концентрации озона в тропосфере на стадии ТЦ может достигать нескольких десятков процентов. Интересная особенность: для тропических депрессий, которые развились в последующем в ТЦ, имели место повышенные на несколько процентов значения общего содержания озона на северной периферии (для затухающих тропических депрессий такого не наблюдалось). При этом отметим, что максимальное отклонение концентрации для ТЦ Тихого океана меньше, чем та же величина для ТЦ в Атлантическом океане, что коррелирует с соответствующими величинами геомагнитного поля (да и сам процесс изменения концентрации при переходе тропической депрессии в ТЦ замедлен в Тихом океане по

сравнению с Атлантикой). Общее содержание озона в атмосфере находится в четкой отрицательной корреляции с количеством ТЦ. По-видимому, воздействия ТЦ на ионосферу можно по механизмам условно разделить на чисто гидродинамические, гидродинамические, связанные с электромагнитными силами и чисто электромагнитные воздействия (с помощью полей или заряженных частиц). Наличие в ТЦ движущихся плазменных подсистем может служить причиной неустойчивостей с генерацией внутренних гравитационных волн (ВГВ). Этот механизм вместе с другими известными, чисто гидродинамическими механизмами неустойчивости сдвиговых потоков газа будет при возбуждении ВГВ с горизонтальными длинами волн в диапазоне от десятков до сотен километров способствовать возникновению ионосферных отпечатков вихря. Указанные ВГВ способны проникать через фоновые температурно-ветровые структуры в верхнюю атмосферу и ионосферу и создавать атмосферные неоднородности, включая неоднородности концентрации плазмы, например, инициировать формирование крупномасштабных ионосферных пузырей, возбуждать электрические токи и т.д. Кроме того, индикаторы вихрей будут возникать на ионосферно-магнитосферных высотах и за счет прямой электрической активности ТЦ (достаточно сильных электростатических полей, генерации при молниевых разрядах вистлеров с частотами $10^3 - 10^4$ Гц). Эти электромагнитные возмущения будут индуцировать (например, за счет гирорезонансного взаимодействия вистлеров с энергичными электронами в окрестности геомагнитного экватора, ускорения частиц) переход захваченных геомагнитным полем зарядов в конус потерь и их высыпания в верхнюю атмосферу.

Среди явлений, наблюдаемых над штормами, стоит здесь упомянуть молнии, распространяющиеся вверх к ионосфере (высотные молнии), "blue jets" (формирующиеся с положительно заряженной части облака), "elves", "red sprites" (аналогия с незавершенными разрядами в результате проникновения быстро меняющегося поля от грозных разрядов в верхнюю атмосферу). "Elves" появляются на высоте 70–90 км и распространяются на сотни км (в течение менее 0.1 ms). "Red sprites" покрывают высоты 40–90 км, их горизонтальные размеры 20–30 км (видны в течение десятков ms); "blue jets" распространяются от вершины облака (15 км) в узком конусе до 50 км со скоростью 100 км/с (время жизни ~ 300 ms). Анализировать ряд процессов, связанных с молниевыми разрядами, помогают измерения радио-атмосфериков в диапазоне сверхнизких частот (15 Гц – 1.5 кГц) и очень низких частот (1.5 кГц – 22 кГц).

Существует гипотеза Вильсона о том, что ураганы — это генераторы глобальной электрической цепи. Ураганы как генераторы, поддерживают сред-

ний потенциал ионосферы порядка 250 кВ относительно Земли. Глобальная электрическая цепь модулируется влиянием Солнца [29]. Наблюдается корреляция между токами ураганов и средним зарядом (полем). Наблюдаются универсальные (по всей Земле) суточные изменения градиента потенциала (так называемая "Carnegie curve"): имеется максимум в 19-00 GMT, что через глобальную электрическую цепь может быть связано с активностью ураганов. Заметим, что в этот момент Солнце находится в наивысшей точке (повышенное ионообразование) над меридианом с наименьшим геомагнитным полем. Наблюдаемая повышенная изменчивость системы термосфера-ионосфера — это следствие их быстрой реакции на внешние воздействия (такие как ионизирующий поток от Солнца, электромагнитные поля от солнечного ветра при взаимодействии с магнитосферой и ионосферой, планетарные волны, приливы, гравитационные волны в стратосфере и тропосфере). В результате возникают волноподобные ионосферные возмущения. Большую роль играют квазистатические электрические поля, связанные с разрядами. Молниевые разряды модифицируют мезосферу и нижнюю ионосферу, например, путем постоянного нагрева ионосферных электронов, производства гамма-всплесков и оптических эмиссий (sprites, blue jets, elves), а мезомасштабная турбулентность может генерировать ВГВ, которые связывают тропосферу и ионосферу.

Для процесса инициации молниевых вспышек может быть велика роль космических лучей, а электрически возмущенная атмосфера в ураганах, в свою очередь, изменяет процесс прохождения космических лучей. Образующиеся ускоренные частицы распространяются вверх и вниз от области их образования, обеспечивая еще одну связь с ионосферой. Далее рентгеновские лучи и ультрафиолет поглощаются на разных высотах и разными компонентами, что приводит к уникальным электрическим свойствам системы (например, стратификации электрических параметров). Поглощение радиоволн коррелирует с температурой в D-области ионосферы, а электронная концентрация антикоррелирует с температурой на высотах порядка 30 км. Над штормами в процессе эмиссии наблюдаются: увеличение ионизации в E-слое ионосферы, появление спорадических F-слоев, увеличение температуры и концентрации электронов в F-слое. Электростатические поля ураганов особенно сильно нагревают электроны ночью в нижней ионосфере. Эффект усиливается для зарядов на большой высоте и может модифицировать уровень оптической эмиссии, например, через химический баланс в D-области. Ионосферные температуры и ионные плотности меняются от молниевой активности: во время ураганов наблюдалось увеличение электронной температуры в 1.2–1.7 раз, для ионной

температуры аналогичное увеличение составляло 1.1–1.5 раз. Возможная причина связана с генерацией ультракоротких и очень коротких электромагнитных волн. Многократное отражение на случайных неоднородностях может приводить к нелинейной конверсии в плазменные волны; происходит также конверсия в верхнегибридные плазменные волны; при этом возникают нерегулярности электронной плотности с разными масштабами неоднородностей. В области между ураганом и ионосферой может происходить триггерная эмиссия. На линейных сонограммах электрического и магнитного полей фиксировалась также частота нижнего гибридного резонанса. Нижние гибридные волны могут быть стимулированы интенсивными вистлерами в присутствии градиентов плотности, а ЛН волны от линейной моды, связанные с вистлерами, нагревают надтепловые ионы. Эффективность конверсии падающего электромагнитного поля в ЛН резонансную волну порядка 30 %. Между ураганом и ионосферой также может наблюдаться длительная эмиссия в ионосферно-земном волноводе на частотах, не зависящих от высоты. Большую роль в обмене атмосферы с ионосферой играет шумановский резонанс (электромагнитное излучение от молний, уловленное в волновод земля-ионосфера). Известно также образование глобальных стоячих резонансных волн на частотах 8, 14, 20, 26 ... Гц и на последующих гармониках. Шумановский резонанс коррелирует с глобальной молниевой активностью, с активностью спрайтов. В качестве теорий "blue jets" и других подобных явлений предлагают газовый пробой (в том числе пробой на убегающих электронах) или убегающие электроны (кинетическая теория). Иницироваться эти процессы могут при воздействии интенсивных атмосферных космических ливней (энергии частиц $\sim 10^6$ eV). При штормах регистрируются электромагнитные волны очень низкой частоты (VLF). Исследовалась интенсивность атмосфериков $f \sim 30$ кГц при дожде. Амплитуда затухания была порядка 5–20 dB. От восхода до заката интенсивность шумов оказалась в 1.5 раза выше, чем от заката до восхода. Наблюдаются корреляции в поведении замираний шумов и ряда метеорологических параметров. Обнаружена также связь замираний с геомагнитной активностью. Лабораторные эксперименты доказывают, что вспышки молний могут генерировать вистлеры, которые трансформируются в нижние гибридные волны, которые приводят к ускорению электронов и ионов и спектральному уширению плазменных волн.

3 Движение плазмopodobных подсистем

Электромагнитные силы сопоставимы с реально наблюдаемыми "гидродинамическими" силами для заряженных областей ТЦ и их нельзя не принимать во внимание в ТЦ. Оценки для МГД-механизма [30] дают совершенно пренебрежимо малую величину. Следовательно, надо переходить к ЭМГД-механизмам [31]. При этом следует учитывать кулоновские силы и основными токами будут не токи проводимости, а конвективные токи от движения заряженных областей. Полезной качественной моделью явления может служить модель плазмы в магнитном поле (вспомним так называемый L-N переход — самопроизвольное возникновение вращения). В этом случае скорость установившегося вращения также может быть большой. Существенно, что совсем необязательно иметь полностью ионизованную плазму; данный механизм будет работать и при наличии в газе некоторой доли свободных зарядов. Легко также объясняется торообразная структура ТЦ с областью затишья в глазе тайфуна [9]. Если была бы верна чисто гидродинамическая модель, то, казалось бы, должна была существовать однозначная связь размеров глаза ТЦ и скорости ветра. Однако попытки обнаружить такую зависимость не привели к успеху, что доказывает существование некоторых неучтенных параметров. Вообще говоря, размер глаза ТЦ напрямую не должен быть связан с интенсивностью ТЦ, а необходимо дополнительно учесть количественные и геометрические характеристики всех заряженных областей.

По-видимому, необходимой предпосылкой возникновения ТЦ является накопление в некоторой области атмосферы достаточного количества свободных зарядов. До сих пор нет единого мнения (полного описания) о том, как как в атмосфере происходит образование, накопление и разделение зарядов (существует порядка десятка различных теорий). В процессе образования ионов большую роль играет целый комплекс влияний: солнечное излучение, различные химические (в том числе каталитические) реакции. Возможно, существенную роль играет водяной пар (вспомним, что за счет свойств молекул воды многие вещества в ней испытывают электролитическую диссоциацию), который может способствовать более легкому (и большему) образованию ионов. В процессе разделения зарядов также существенную роль может играть вода (как капельки, так и кристаллики льда) наряду с различными ветровыми движениями и полями. Самоподдерживающееся воспроизводство зарядов может существовать за счет трения частиц пыли или кристалликов льда друг о друга при вихревом движении. По-видимому, заряды разных знаков начина-

ют разделяться по разным причинам. Во-первых, на них по-разному действуют электромагнитные и другие силы (вследствие различия в зарядах и массах). Во-вторых, имеется преимущественная локализация на различных наночастицах (как правило, малые частицы заряжены отрицательно, большие — положительно).

Один из возможных механизмов образования небольшой положительно заряженной области в центре ТЦ при движении над океаном аналогичен механизму Вильсона. Отличие в том, что в теории Вильсона капли дождя падают вниз, то есть движутся по направлению электрического поля, и в результате получают дополнительный отрицательный заряд. В ТЦ, напротив, вблизи стены глаза имеется более интенсивное восходящее движение, то есть наночастицы воды движутся против направления электрического поля Земли, и в результате они приобретают дополнительный положительный заряд. Кроме того, небольшой поток нисходящего движения воздуха (по сухоадиабатическому закону) непосредственно вблизи оси ТЦ, по-видимому, приводит также к притоку положительного заряда от более высоко расположенной положительной области. Достаточно выраженная разделенность движений воздуха внутри глаза и за стеной глаза способствует поддержанию наблюдаемой структуры ТЦ. А над сушей количество поднимающейся влаги резко уменьшается (и соответственно постепенно исчезает глаз ТЦ).

Заряженные частицы стремятся дрейфовать в скрещенных полях. Наличие нейтральных частиц приводит к тому, что в моменты столкновений будет происходить передача импульса во вращательное движение газа как целого. В итоге возникновение крупномасштабного движения (вращения) происходит энергетически за счет перестройки внутренней энергии всей системы: не только плазменная подсистема, но и вся прилегающая область (гидродинамическая система) приходит во вращение. Вращение возникает в том случае, если число ионов достаточно, чтобы за конечное время (пока другие возмущения не разрушат эту структуру) "вытянуть" вращение всей газовой системы как целого. Очевидно, что действующая на ионы сила приводит к увеличению импульса этой частицы и среднего импульса всего газа и далее он не может исчезнуть независимо от столкновения с ионами или нейтралами и даже рекомбинации ионов. Такое увеличение происходит до тех пор, пока не уравновесятся все силы (отсюда может быть определена равновесная средняя скорость газа). В спокойной атмосфере число ионов недостаточно. Именно поэтому ТЦ возникают относительно редко по сравнению с другими атмосферными явлениями. Действительно, даже нескомпенсированный избыток заряда в ТЦ отвечает концентрации $10^{10} - 10^{15}$ ионов на кубический метр (в среднем она порядка

$\{10^{11} - 10^{13}\}/\text{м}^3$), значит реальное число (с учетом скомпенсированного заряда) ионов может быть на несколько порядков больше. В то же время полное число ионов в спокойной атмосфере (как над океаном, так и над сушей) не превышает 10^9 частиц на кубический метр.

Обычно в развитии ТЦ выделяют несколько фаз (стадий), которые, однако, неудобны для использования в аналитических методах, поскольку различаются количественно, а не в качественном плане. Для решения задачи мы будем подразделять развитие ТЦ на три фазы. Первая фаза начинается со спокойного состояния атмосферы и заканчивается формированием глубокой депрессии. На этой стадии ряд характеристик постепенно достигает своих пороговых значений, при достижении которых только и можно идентифицировать ТЦ как таковой. Вторая фаза, которую мы будем называть квазистационарной фазой (или фазой самоподобного развития), характеризуется тем, что ТЦ сохраняет свои отличительные особенности, выделяющие его среди всех иных атмосферных явлений (развитая стадия ТЦ). Изменения величин в количественном отношении на этой стадии не приводят к разрушению характерной структуры ТЦ. Во время третьей фазы происходит переход от ТЦ к спокойной атмосфере или к стадии внетропического циклона.

Существующие ЭМГД-теории не учитывают наличия магнитного поля Земли, наличия заряженных областей и влияния электромагнитных сил на ряд процессов. Для процесса возникновения и развития ТЦ полная система ЭМГД-уравнений будет включать уравнения Навье-Стокса с пондеромоторной силой, уравнение непрерывности, общее уравнение переноса тепла, уравнение состояния, систему уравнений для парообразной и каплеобразной влаги, уравнения Максвелла, закон Ома в одножидкостном варианте. Граничные условия ставятся обычным образом: для скорости на поверхности имеем условия прилипания, а вне ТЦ должна получаться скорость геострофического течения на данной высоте, все остальные величины вне ТЦ тоже должны переходить в стационарные земные характеристики. Поля можно записать как сумму стационарных полей Земли, практически не меняющихся в области, занятой ТЦ, но зависящих от координат ТЦ, и полей, генерируемых самим ТЦ. Однако, подобная система уравнений слишком сложна (перегружена), так как содержит в себе основные возможные явления как в макромасштабах, так в мезо- и микромасштабах. Можно оценить силы и убедиться, что внутри заряженных областей электромагнитные силы играют существенную роль, то есть сопоставимы с силами, принимаемыми во внимание в неэлектромагнитных теориях. Величина итоговой силы и ее направление может меняться совершенно произвольным образом в зависимости от величины зарядов областей,

токов и других характеристик ТЦ, включая координаты ТЦ. Именно поэтому классический параболический вид траектории наблюдается только у 47 процентов ТЦ.

Для фазы самоподобного развития можно провести ряд дальнейших упрощений. Для начала можно всю систему уравнений разделить на три уровня, описывающих гидродинамические, влажностные (и температурные) и электромагнитные характеристики ТЦ. Разумеется, все эти системы - "с обратными связями". Однако их можно разделить по характерным временам изменения или по оказываемому влиянию на процессы. Наиболее медленным процессом, по-видимому, является процесс разделения зарядов. Конечно, если интересоваться распространением электромагнитных волн в ТЦ, то ситуация будет противоположная и нужно будет рассматривать распространение возмущений на фоне всех заданных средних характеристик (гидродинамических, влажностных и электромагнитных). Однако здесь мы не рассматриваем распространение различных волн, а исследуем только развитие чисто гидродинамических средних характеристик ТЦ. Поэтому для гидродинамической подсистемы уравнений средние электромагнитные характеристики можно считать заданными параметрически. Влажностные и температурные характеристики тоже можно считать заданными параметрически через коэффициенты, входящие в "чисто" гидродинамическую систему уравнений (температура и влажность могут существенно поменяться только при попадании ТЦ как целого в какие-то новые условия, например, выход ТЦ на сушу). Мы не выписываем в явном виде уравнения, поскольку это необходимо для численных расчетов и не входит в цельданной работы.

Вообще говоря, кроме прямой модели влияния электромагнитных сил на движение заряженных областей ТЦ надо отметить следующее. Учет реальной стратификации ТЦ и добавочных сил в заряженных областях приводит к тому, что при аналитическом решении уравнений необходимо производить сшивку решений на границах: возможно отражение волн на границах, резонансные волновые режимы и т.д. В результате ТЦ может обмениваться энергией (в обоих направлениях) посредством ВГВ и квазистационарных электромагнитных волн с открытой системой — ионосферой. Например, возможно через ионосферу происходит иногда наблюдаемое странное взаимодействие ТЦ в разных полушариях (гидродинамически разделенных экватором). Роль этого энергообмена хотелось бы прояснить в дальнейших исследованиях.

Установившееся решение полной системы уравнений зависит от ряда параметров, воздействуя на которые можно управлять возникновением, исчезновением или траекторией ТЦ (или торнадо), что представляет предмет дальнейших исследований.

Отметим только, что сложность предсказания движения ТЦ состоит в том, что кроме массы нейтрального газа, подчиняющегося обычным уравнениям гидродинамики, в тайфуне присутствует подсистема заряженных вращающихся магнитных роторов. В результате в изменяющемся по ходу траектории ТЦ магнитном поле Земли и существующих варьирующихся электрических полях данные подсистемы стремятся двигаться по несколько отличным законам и для ТЦ мы имеем как бы траекторию с гистерезисом. Видимо поэтому часто возникают петли и другие непредсказуемые типы движения ТЦ.

4 Электромагнитные силы и спиральные характеристики тропических циклонов

Обычно в модельных задачах диэлектрическая проницаемость и коэффициенты турбулентной вязкости считаются константами. Однако в реальности эти величины являются переменными и модулируются самой структурой ТЦ. Мы будем считать, что эти дополнительные зависимости также параметризуют систему (в природе, по-видимому, данный процесс происходит самосогласованным образом). Указанный факт может приобрести большое значение для дальнейшего развития концепции самоорганизации (то есть, если подходить к проблеме возникновения ТЦ от микромасштабов). В связи с этим возникает интересный вопрос, какой вклад в среднюю гидродинамическую спиральность вносят электромагнитные силы и как они модулируют ее величину [15]. В данном докладе мы касаемся только гидродинамической спиральности, однако надо учесть, что флуктуации в плазмодобных подсистемах приводят также к флуктуациям магнитной спиральности, что может оказывать влияние на процесс распространения электромагнитных волн. Следует отметить, что спиральность $H = \langle \mathbf{v} \cdot \text{rot } \mathbf{v} \rangle$ может оказывать влияние на развитие и устойчивость гидродинамической системы. Поэтому привлечение данной характеристики к описанию процесса самоорганизации вполне оправдано. Спиральность является интегралом уравнения Эйлера (при определенных условиях) и ее изменения могут выступать индикатором процесса эволюции системы. Кроме того, сами по себе крупномасштабные спиральные движения часто обладают повышенной устойчивостью (так в [32] рассмотрена связь *магнитной* спиральности с устойчивостью плазменных конфигураций), а учет спиральности при наличии флуктуаций (на микромасштабах) может приводить к направленному изменению процесса, например, к возникновению неустойчивостей [33]. В частности, наряду

с обратным каскадом энергии может возникать спиральный каскад, приводящий к объединению ансамбля мелкомасштабных ячеек со спиральным движением в крупномасштабные спиральные вихри. Для описания турбулентности в плазменных системах вводятся понятия турбулентной *кинетической* спиральности и турбулентной *токовой* спиральности $\langle \mathbf{V} \cdot \mathbf{J} \rangle$, а для описания атмосферных процессов часто применяют понятие *storm relative helicity* (интеграл от плотности спиральности по области высот от 0 до 3 км). Эта последняя величина для ураганов составляет в среднем величину $150 \text{ м}^2/\text{с}^2$, а для торнадо она превышает $300 \text{ м}^2/\text{с}^2$. Наряду с *интегральной* спиральностью важной характеристикой описания процессов генерации вихрей является и объемная *плотность* спиральности

$$H = v_r \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial v_\varphi}{\partial z} \right) + v_\varphi \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{v_z}{r} \left(\frac{\partial(rv_\varphi)}{\partial r} - \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} \right).$$

Иногда эти три слагаемые называют соответственно компонентами спиральности H_r , H_φ , H_z . Поскольку спиральность не является знакоопределенной величиной, то, кроме перераспределения, одни и те же механизмы могут приводить как к диссипации, так и к генерации спиральности.

Грубая оценка средней плотности спиральности, существующей вследствие вращения Земли (силы Кориолиса) и естественной конвекции, дает для спокойной атмосферы величины порядка $10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}^2$ и меньше. Известно [34], что для β -урагана средние значения компонент спиральности оцениваются как $H_z \sim 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}^2$, $H_\varphi \sim 10^{-1} \text{ м}^2/\text{с}^2$. Если же разбить условно всю область ТЦ на 4 зоны (пограничный слой, стена глаза, центральная часть и зона оттока) и провести оценку плотности спиральности по средним движениям для развитой стадии ТЦ, то оказывается, что средняя плотность спиральности может достигать величин $0.3 \text{ м}^2/\text{с}^2$ и выше. Однако все зависит еще и от масштабов усреднения: учет реальных, а не средних осесимметричных движений, дает расчетные величины на порядок больше [35]. При этом оказывается, что плотность спиральности существенно неоднородна и меняется в различных областях на несколько порядков (иногда вплоть до перемены знака). Разные компоненты спиральности часто оказываются близкими по модулю, но противоположными по знаку, т.е. в каждой области выживают вихри определенного направления вращения (спиральные домены). Оценка влияния силы Кориолиса на величину спиральности для развитого ТЦ также дает величины меньше, чем наблюдаемые (от нескольких раз до нескольких порядков). Кроме того, в ТЦ плотность спиральности не обладает цилиндрической симметрией. Например, наблюдения пока-

зывают, что в спиральных полосах дождя и в соседних с ними областях спиральность может различаться даже знаком, то есть наблюдается спиральное движение (горизонтальные вихри) и в самих спиральных рукавах. Для модельных осесимметричных гидродинамических характеристик такое поведение кажется странным. Следовательно, необходимо искать силы, ответственные за избыток спиральности и рассматривать дополнительные механизмы, приводящие как к несимметричному перераспределению на периферии, так и к генерации спиральности. Возможно, эту роль играют электромагнитные силы. Они дают вклад в среднее горизонтальное вращение, отличающийся знаком для заряженных областей, расположенных на высотах около 6 км и около 12 км. Но, кроме того, если мы учтем, что магнитное поле Земли наклонено к вертикали, а заряженная подсистема стремится иметь ось вращения по полю, то на краях симметризованной системы могут образовываться отростки заряженных областей с вихрями, имеющими горизонтальную составляющую. При этом цилиндрическая симметрия будет нарушена, так как, например, заряженные подсистемы в двух рукавах с противоположных сторон ТЦ будут стремиться иметь одинаковое направление вращения с осью, направленной к магнитному полюсу Земли. Таким образом, распределение плотности спиральности в этих рукавах будет неоднородным даже по углу вращения, а не только по радиусу и высоте. Расчеты показывают, что в ТЦ наибольшими по модулю величинами являются компоненты H_r , H_φ (их знаки противоположны, то есть в средней спиральности они конкурируют). Для заряженных областей ТЦ в эти компоненты наибольший вклад дают именно электромагнитные силы.

Описание процесса генерации спиральности в ТЦ можно осуществлять в рамках турбулентных ЭМГД-течений (источник возбуждения турбулентности можно моделировать однородной изотропной случайной силой). Запишем в этом случае в локально вращающейся относительно оси z с частотой $\Omega(\mathbf{r}, \mathbf{z})$ системе отсчета (то есть выделено среднее вращение, наибольшее относительно оси z) систему основных уравнений в альфвеновских переменных, считая магнитное поле Земли \mathbf{B}_0 практически однородным в области ТЦ (то есть среднее поле также уже выделено):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u} + 2[\Omega \times \mathbf{u}] &= -\nabla P' + \nu \Delta \mathbf{u} \\ &+ \frac{q}{\rho} \mathbf{E} + [\text{rot } \mathbf{h} \times \mathbf{H}] + \mathbf{f}, \\ \text{div } \mathbf{u} &= 0, \quad \text{div } \mathbf{h} = 0, \quad \text{div } \mathbf{E} = 4\pi q, \\ \text{rot } \mathbf{E} &= -\frac{\sqrt{4\pi\rho}}{c} \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t}, \quad \text{rot } \mathbf{h} = \frac{\sqrt{4\pi}}{\sqrt{\rho c}} \mathbf{j}, \end{aligned}$$

$$\mathbf{j} = q\mathbf{u} + \lambda \left\{ \mathbf{E} + \frac{\sqrt{4\pi\rho}}{c} [\mathbf{u} \times \mathbf{H}] \right\},$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 + \mathbf{h}, \quad \mathbf{H}_0 = \frac{\mathbf{B}_0}{\sqrt{4\pi\rho}}, \quad \mathbf{h} = \frac{\mathbf{b}}{\sqrt{4\pi\rho}},$$

$$\frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t} = \text{rot} [\mathbf{u} \times \mathbf{h}] + (\mathbf{H}_0 \nabla) \mathbf{u} + \nu_m \Delta \mathbf{h} + \frac{c}{\lambda \sqrt{4\pi\rho}} \text{rot} q\mathbf{u},$$

$$P' = \frac{P}{\rho} - \frac{1}{2} [\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}]^2.$$

Если мы хотим исследовать сам процесс генерации спиральности, то необходимо записать полное уравнение для плотности спиральности. При этом не стоит выбрасывать дивергентные члены, которые хотя и не дают вклада в итоговую по ТЦ спиральность, но на локальный баланс могут оказывать существенное влияние (кроме того, не зная явного аналитического вида всех членов, нельзя заранее гарантировать, какие из членов бездивергентны). В такой постановке задачи уравнение для плотности спиральности имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \langle \mathbf{u}\mathbf{w} \rangle = & -\text{div} \left\langle \mathbf{u}(\mathbf{u}\mathbf{w}) - \mathbf{w} \frac{\mathbf{u}^2}{2} + P' \mathbf{w} \right. \\ & \left. - 2\mathbf{u}(\mathbf{u}\boldsymbol{\Omega}) + \frac{\sqrt{4\pi}}{\sqrt{\rho c}} q\mathbf{u}(\mathbf{u}\mathbf{H}_0) \right\rangle + 2\mathbf{u}^2 \text{div} \boldsymbol{\Omega} \\ & - 4\mathbf{u}(\mathbf{u}\nabla)\boldsymbol{\Omega} - 2\nu \langle \mathbf{w} \text{rot} \mathbf{w} \rangle \\ & + 2 \langle [\text{rot} \mathbf{h} \times \mathbf{H}_0] \mathbf{w} \rangle + 2 \langle [\text{rot} \mathbf{h} \times \mathbf{h}] \mathbf{w} \rangle \\ & + 2 \langle \mathbf{f}\mathbf{w} \rangle - \frac{\sqrt{4\pi\rho}}{\rho c} \langle q\mathbf{w}[\mathbf{u} \times \mathbf{h}] \rangle \\ & - \frac{\sqrt{4\pi\rho}}{\rho c} \nu_m \langle q\mathbf{u}\Delta \mathbf{h} \rangle + 2 \frac{\sqrt{4\pi}}{\sqrt{\rho c}} \langle \text{grad} q \cdot \mathbf{u}(\mathbf{u}\mathbf{H}_0) \rangle \\ & - \frac{2q^2}{\lambda\rho} \langle \mathbf{u}\mathbf{w} \rangle + \frac{\sqrt{4\pi\rho}}{\rho c} \langle \text{grad} q \cdot \mathbf{u}(\mathbf{u}\mathbf{h}) \rangle \\ & - \frac{\sqrt{4\pi\rho}}{\rho c} \langle \text{grad} q \cdot \mathbf{H}_0 \mathbf{u}^2 \rangle - \frac{\sqrt{4\pi\rho}}{\rho c} \langle q\mathbf{u} \text{rot} [\mathbf{u} \times \mathbf{h}] \rangle \\ & - \frac{\sqrt{4\pi\rho}}{\rho c} \langle \text{grad} q \cdot \mathbf{h}\mathbf{u}^2 \rangle + \frac{c}{\sqrt{4\pi\rho\lambda}} \langle q\mathbf{w} \text{rot} \mathbf{h} \rangle \\ & + \frac{c}{\sqrt{4\pi\rho\lambda}} \langle \mathbf{u}[\text{grad} q \times \text{rot} \mathbf{h}] \rangle. \end{aligned}$$

Будем считать функцию плотности заряда q заданной. Из системы можно далее выделить среднюю составляющую вращения с осью, параллельной земной поверхности, и средние течения — радиальное и вдоль оси z (либо, в первом приближении, можно считать наиболее выраженным именно вращательное движение в ТЦ, пренебрегая остальными составляющими движения.) Мы видим, что кроме членов, имеющих для чисто гидродинамической задачи (правда, поведение этих членов также меняется для ЭМГД случая), появились дополнительные слагаемые, прямо зависящие от наличия в системе заряженных частиц. Эти слагаемые

меняют знак при изменении знака заряда, следовательно, они участвуют в поддержании структуры системы и ее генерационных свойств (для некоторого заданного течения при одном знаке заряда указанные члены могут приводить к генерации спиральности, а при противоположном знаке заряда будут приводить к уменьшению предела генерационного насыщения). Зависимость от градиента заряда некоторых слагаемых может, по-видимому, определять более тонкую структуру генерационных свойств ТЦ (например, в стене глаза и в полосах дождя). Некоторые члены, влияющие на насыщение, имеют знакоопределенный характер (например, они квадратичны по гидродинамической скорости). Нелинейные члены влияют на предел генерационного насыщения и обеспечивают "перемешивание" величин по разным масштабам. Их действие в духе упрощенного приближения Орзага можно аппроксимировать как некоторое "эффективное затухание". Одиннадцатый член справа не зависит от знака заряда и явно приводит к затуханию (или ограничению предела насыщения). Для применения приближения Орзага нужно выделить из величины скорости среднюю скорость потока, а из завихренности средний вектор вращения, параллельный земной поверхности (среднее вращение вокруг оси z уже выделено). Тогда появятся члены, аналогичные "токовому вектору Лэмба", и члены, соответствующие переменной магнитной диффузии (которая в зависимости от знака заряда может носить генерационный характер).

Представляет интерес определить влияние на эволюцию спиральности ряда новых членов (когда их роль заранее не очевидна из их вида), а также изменения в ЭМГД-случае от влияния "чисто гидродинамических" членов по сравнению со случаем обычной магнитогидродинамики. К таким слагаемым можно, например, отнести следующие:

$$2\mathbf{H}_0 \cdot \langle [\mathbf{w} \times \text{rot} \mathbf{h}] \rangle, \quad 2 \langle \mathbf{f}\mathbf{w} \rangle,$$

$$\frac{cq}{\sqrt{4\pi\rho\lambda}} \langle \mathbf{w} \text{rot} \mathbf{h} \rangle - \frac{\sqrt{4\pi\rho}}{\rho c} \langle \mathbf{U}_0 \cdot [\mathbf{h} \times \mathbf{w}] \rangle.$$

Для каждого из подобных интересных слагаемых можно записать соответствующие уравнения (их мы не будем выписывать вследствие громоздкости, а подчеркнем лишь некоторые примечательные моменты).

В уравнении для "магнитогидродинамического" 1-го члена действие нелинейных слагаемых можно аппроксимировать в духе приближения Орзага как "эффективное затухание" (точнее перемешивание по масштабам). Роль чисто магнитогидродинамических членов известна [36]. Для членов, играющих существенную роль в эволюции спиральности, можно, вводя эффективное время релаксации (детерминируемое средними параметрами турбулентного течения), аппроксимировать

их вклад следующим образом

$$\frac{\tau}{3} \mathbf{H}_0^2 (\langle \mathbf{w} \text{ rot } \mathbf{w} \rangle - \langle \mathbf{h} \text{ rot } \mathbf{h} \rangle)$$

и для малых чисел Рейнольдса (в пренебрежении флуктуациями магнитного поля по сравнению с флуктуациями скорости) в последнем выражении остается только первое слагаемое с суперспиральностью. Некоторые члены (новые) возникают только в присутствии зарядов в системе. Роль ряда членов известна из гидродинамики (важное отличие состоит в дополнительной возможности изменения их знака при изменении знака заряда). Здесь есть члены, не зависящие от знака заряженной области и отвечающие затуханию, члены пропорциональные турбулентной энтрофии, магнитной супер-спиральности, "магнитной энтрофии", члены, содержащие вектор Лэмба и "спиральный вектор Лэмба".

Для раскрытия второго коррелятора можно воспользоваться формулой Фуруцу-Новикова-Донскера:

$$\langle \mathbf{f} \mathbf{w} \rangle = i \int \varepsilon_{ijk} k_j F_{im}(\mathbf{k}_1, \omega') \times \left\langle \frac{\delta u_k(\mathbf{k}, \omega)}{\delta f_m(\mathbf{k}_1, \omega')} \right\rangle d\mathbf{k}_1 d\mathbf{k} d\omega d\omega',$$

где в Фурье-представлении корреляционный тензор случайной силы имеет вид

$$\langle f_i(\mathbf{k}, \omega) f_j'(\mathbf{k}', \omega') \rangle = F_{im}(\mathbf{k}, \omega) \delta(\mathbf{k} + \mathbf{k}') \delta(\omega + \omega'),$$

$$F_{im}(\mathbf{k}, \omega) = \frac{E(k, \omega)}{4\pi k^2} \left(\delta_{im} - \frac{k_i k_m}{k^2} \right) + i \varepsilon_{imt} k_t \frac{G(k, \omega)}{8\pi k^4}.$$

Для корреляционной функции плотности спиральности можно выбирать различные зависимости и модельные распределения и проводить численное интегрирование.

В уравнении для следующего (третьего) "интересного" члена имеем, кроме "гидродинамических" членов (например, с диффузионным характером) и члена, не зависящего от знака заряда (затухание), также слагаемые, пропорциональные заряду (или его градиенту). Они описывают вклад плазмopodobной подсистемы в процесс генерации. Кроме членов, приводящих к сносу по потоку, можно узнать слагаемые, пропорциональные суперспиральности, энтрофии, спиральности, "магнитной суперсуперспиральности" и вектору Лэмба.

В уравнении для четвертого члена опять нелинейные члены можно аппроксимировать в духе приближения Орзага как "эффективное затухание" (перемешивание по масштабам), также присутствуют как "магнитогидродинамические" члены (включая имеющие диффузионный характер, соответствующие сносу и новый член с затуханием), так и слагаемые, зависящие от заряда (или градиента заряда), содержащие спиральность, "магнитную суперспиральность".

Таким образом, из-за наличия плазмopodobных подсистем в ТЦ, наряду с известными механизмами генерации спиральности, связанными со сдвиговыми потоками (например, с неоднородностью вращения) и с наличием среднего магнитного поля (механизм связан с Альфвеновскими волнами), появляется ряд дополнительных каналов. Представляющие само-стоятельный интерес новые члены пропорциональны величинам турбулентной спиральности, суперспиральности, энтрофии, суперэнтрофии и другим (как и в случае магнитной гидродинамики), однако исключительно важный момент заключается в том, что они оказываются зависящими от знака заряда. Это означает, что (в сумме с прежними "гидродинамическими" членами) генерационные свойства могут иметь пороговый характер (в зависимости от знака заряда). Следовательно, самоподдерживающейся оказывается четко фиксированная структура явления. Кроме того, ряд слагаемых оказывается зависящим от градиента заряда, а это приводит к тому, что появляется дополнительная асимметрия генерации спиральности (по разные стороны от максимума заряда поведение спиральности меняется). Все это существенно меняет свойства системы особенно в стене глаза ТЦ и в полосах дождя, помогая поддерживать четко (резко) выделенную структуру движений в ТЦ. Электрическая структура ТЦ модулирует его турбулентные характеристики. Более строгое количественное исследование этого процесса перспективно для развития концепции самоорганизации. Кроме прямой модуляции свойств турбулентности электромагнитной структурой (заряженными областями) надо учесть также упорядочивающее влияние полей на свойства микрочастиц в облачной структуре, что тоже может привести к дополнительной анизотропии движений и гидродинамических характеристик на микромасштабах.

5 Упрощенная модель генерации вращения плазмopodobных подсистем для квазистационарной фазы тропических циклонов

Наша задача на данном этапе — описать модель генерации вращения, в которой бы наглядно проявлялась физика данного процесса (основные черты явления). Поэтому не будем пока рассматривать процесс движения ТЦ как целого (например, рассмотрим момент зарождения или "топания на месте" в петлевой траектории). В этом случае можно не учитывать геострофические течения (вообще говоря, скорости геострофических течений V_z , V_φ либо сопоставимы, либо как правило меньше ха-

рактерных скоростей в развитой стадии ТЦ или торнадо). Если пренебречь также изменением силы тяжести и магнитного поля на размерах ТЦ, то задача упрощается, так как ТЦ в этом случае можно считать осесимметричным вплоть до верхней части (до струй оттоков). Задача движения верхней части ТЦ (от верхней заряженной области) может для упрощения рассматриваться отдельно. Поскольку в реальных ТЦ зависимость от угла φ очень слабая, то в первом приближении можно провести усреднение по φ , пренебрегая эффектом квадратичных осцилляций (конечно, в идеале нужно написать уравнения для всех коэффициентов разложения по углу, что только усложняет решение, не меняя существенно основные эффекты). Наша задача — учесть влияние плазмopodobных подсистем на динамику заряженной облачной системы (сохранение структуры и характерных движений) и, возможно, на поддержание структуры движений в ТЦ.

Будем считать заряженную область находящейся в слое по высоте (начиная с некоторой высоты) и ограниченной двумя цилиндрами (внутренний можно, например, выбрать от стены глаза). Для качественного описания задачи и построения упрощенной физико-математической модели развитой стадии ТЦ рассмотрим вначале движение отдельных заряженных частиц и воспользуемся идеологией присоединенных масс, считая, что каждая заряженная частица вовлекает во вращательное движение дополнительно часть нейтральных частиц. Будем считать, что столкновения с нейтральными атомами и молекулами (это наибольшая частота столкновений) в среднем эквивалентны эффективному увеличению массы заряженной частицы. Запишем в цилиндрической системе координат уравнения движения внутри заряженного облака для частицы с некоторой эффективной массой m при условии осесимметричного распределения зарядов (поля):

$$m(\ddot{r} - r(\dot{\varphi})^2) = eE_r + \frac{e}{c}r\dot{\varphi}H,$$

$$\frac{m}{r}(r^2\ddot{\varphi} + 2r\dot{r}\dot{\varphi}) = -\frac{e}{c}\dot{r}H.$$

Второе уравнение интегрируется и дает следующее выражение:

$$\dot{\varphi} = -\frac{eH}{2mc} + \frac{C_0}{mr^2},$$

где C_0 — является константой интегрирования (зависящей от начальных условий):

$$C_0 = mr_0v_{\varphi 0} + \frac{eHr_0^2}{2c}.$$

Подставляя это выражение в первое уравнение движения, получим уравнение:

$$m\ddot{r} = \frac{C_0^2}{mr^3} + eE_r - \frac{e^2H^2r}{4mc^2}.$$

Далее нужно выбрать некоторую модельную зависимость электрического поля от расстояния до оси вращения (желательно, чтобы потом можно было провести интегрирование в аналитическом виде). Например, можно выбрать для поля прямую пропорциональность радиусу (это отвечает постоянной плотности зарядов в облаке). Или можно еще добавить слагаемое, обратно пропорциональное кубу радиуса (чтобы скомбинировать результат либо с 3-м, либо с 1-м слагаемым). Мы остановимся пока на первом выборе: $E_r = 2\pi nr$, где n — концентрация зарядов. Тогда, вводя обозначения

$$A = \frac{2\pi ne}{m} - \frac{e^2H^2}{4m^2c^2}, \quad B = \frac{C_0^2}{m^2}$$

и домножая уравнение слева и справа на \dot{r} , можно выполнить интегрирование и получить следующий результат:

$$r = \sqrt{\frac{1}{2|A|} \left[C_1 + \sqrt{4B|A| - C_1^2} \sin\{2\sqrt{|A|}t + G_0\} \right]},$$

$$\dot{\varphi} = -\frac{eH}{2mc} + \frac{2C_0A}{m \left[C_1 + \sqrt{4B|A| - C_1^2} \sin\{2\sqrt{|A|}t + G_0\} \right]}.$$

где $G_0 = \arcsin \left\{ \frac{2|A|r_0^2 - C_1}{\sqrt{2B|A| - C_1^2}} \right\} - 2\sqrt{|A|}t_0$, C_1 — константа интегрирования, зависящая от начальных условий $C_1 = v_{r0}^2 - AR_0^2 + \frac{B}{r_0^2}$. Усредняя угловую частоту вращения "частицы" по периоду, получим среднюю частоту вращения в плазмopodobной системе:

$$\Omega = \langle \dot{\varphi} \rangle = -\frac{eH}{2mc} + C_1A^{1/2}.$$

По сути, мы получили весьма ограниченное (качественное) описание движения заряженной частицы (траекторию) с эффективной массой без явного учета силы трения.

Для более строгого расчета среднего вращения заряженных компонент надо провести явную оценку влияния сил трения в простейшем случае постоянных электромагнитных полей. Для того, чтобы произвести оценки установившейся (стационарной) азимутальной скорости плазмopodobной подсистемы относительно средних движений нейтрального газа в ТЦ, запишем в цилиндрической системе координат уравнения безсилового движения заряженной "частицы" с учетом сил трения (учитывается лишь наиболее существенное трение о вращающуюся нейтральную компоненту газа в ТЦ):

$$eE_r - m\nu(V_r + \overline{V}_r) + \frac{e}{c}V_{\varphi}H + mV_{\varphi}^2/r = 0,$$

$$-m\nu(V_{\varphi} - \overline{\Omega}r) - \frac{e}{c}V_rH = 0,$$

$$eE_z - m\nu(V_z - \overline{V}_z) - g = 0,$$

здесь средние скорости и частота вращения нейтрального газа выделены чертой сверху, r – расстояние до оси ТЦ, ν – частота столкновений с нейтралами. Третье уравнение системы описывает дополнительный стационарный подъем (левитацию) для заряженной компоненты облачной системы ТЦ:

$$V_z = \overline{V}_z + \frac{eE_z - g}{\nu m}.$$

Из второго уравнения системы имеем равновесную скорость осевого подтока заряженной подсистемы:

$$V_r = \frac{\nu(V_\varphi - \Omega r)}{\omega_H}.$$

Подставляя это выражение в первое уравнение системы, получаем азимутальную скорость для заряженной плазмopodobной подсистемы ТЦ:

$$V_\varphi = \Omega r + \frac{\omega_h}{\nu} \overline{V}_r - \frac{\omega_H e E_r}{m \nu^2}.$$

Здесь слагаемые расположены в порядке убывания (заметим, что мы не стали усложнять формулу и решать квадратное уравнение для освобождения от члена $[V_\varphi^2/r]$, поскольку эта величина малая и может рассматриваться как поправка). Мы видим, что плазмopodobная подсистема движется несколько быстрее основной массы нейтрального газа, увлекая его за собой во вращение и передавая ему вращательный момент. Все направления вращения (и для самого ТЦ в обеих полушариях и для антициклона над ТЦ) согласуются с наблюдениями. Таким образом, учет электромагнитных сил для самих плазмopodobных подсистем необходим для адекватного описания профилей скоростей внутри облачных систем и их динамики. Вопрос о том, сколько можно "нагрузить" на эти подсистемы пока остается открытым (возможно речь идет о небольшой постоянно действующей и самоподдерживающейся подкрутке). Прояснить это смогла бы более последовательная ЭМГД- теория, что планируется сделать в дальнейшем.

6 Заключение

Таким образом, электромагнитные явления могут играть существенную роль в кризисных атмосферных процессах: электромагнитные силы принимают участие в поддержании структуры ТЦ, влияют на их движение. Велико также влияние электромагнитных сил на процесс генерации спиральности и четкую разделенность движений в ТЦ. Для более полного описания процессов в ТЦ необходимо учитывать движение плазмopodobных подсистем.

В случае верности сделанных предположений открывается перспектива не только лучше прогнозировать зарождение, усиление и движение изучаемых

природных стихий, но, возможно, даже управлять различными стадиями их развития и траекторией движения. Разумеется, речь не должна идти об уничтожении возникающих ТЦ, поскольку в природе каждое явление выполняет определенные функции, поддерживающие общее равновесие. В данном случае можно упомянуть тепловой и водный баланс, а также глобальную земную электрическую цепь. Конечно, на каждое непродуманное действие человека у природы найдется ответный механизм, но не стоит постоянно испытывать нашу планету на прочность.

Работа выполнена при финансовой поддержке научной программы РАН "Физика атмосферы: электрические процессы, радиофизические методы исследований" (ОФН-13) и частичной финансовой поддержке РФФИ (грант №05-02-17315-а).

Статья получена 12 мая 2005

Список литературы

- [1] Hare R. On the Causes of the Tornado or Waterspout // Am.J.Sci.Arts. – 1837. – V. 32. – P. 153–161.
- [2] Riehl H. Tropical Meteorology. – McGraw-Hill. – 1954.
- [3] Хаин А.П., Сутырин Г.Г. Тропические циклоны и их взаимодействие с океаном. – Л: Гидрометеиздат. – 1983. – 272 с.
- [4] Оояма К.В. Об основных проблемах теории и моделирования тропических циклонов. – М: Мир. – 1985.
- [5] Fovell R., Ogura Y. Effect of Vertical Wind Shear on Numerically Simulated Multicell Storm Structure // J. Atm. Sci. – 1989. – V.46, N 20. – P. 3144–3176.
- [6] Моисеев С.С., Сагдеев Р.З., Тур А.В. и др. Теория возникновения крупномасштабных структур в гидродинамической турбулентности // ЖЭТФ – 1983. – Т. 85. – С. 1979–1987.
- [7] Моисеев С.С., Руткевич П.Б., Тур А.В. и др. Вихревое динамо в конвективной среде со спиральной турбулентностью // ЖЭТФ – 1988. – Т. 94. – С. 144–153.
- [8] Добрышман Е.М.. Некоторые статистические характеристики и особенности тайфунов // Метеорология и Гидрология – 1994. – N 11. – С. 83–99.

- [9] Артеха С.Н., Гольбрайх Е., Ерохин Н.С.. О роли электромагнитных взаимодействий в динамике мощных атмосферных вихрей // Вопросы атомной науки и техники – 2003. № 4. – С. 94–99.
- [10] Chalmers J.A. Atmospheric Electricity. - Pergamon Press: New York. – 1967.
- [11] Williams E.R. The Tripole Structure of Thunderstorms.// J.Geoph. Res. – 1989. – V. 94, N D11. – P. 13151–13167.
- [12] Marshall T.C., Rust W.D. Electrical Structure and Updraft Speeds in Thunderstorms over the Southern Great Plains // J.Geoph. Res. – 1995. – V. 100. – P. 1001–1015.
- [13] Black R.A., Hallet J. Electrification of the Hurricane // J.Atmos. Sci. – 1999. № 11. – P. 2004–2028.
- [14] Byrne G.J., Few A.A., Stewart M.F. Electric Field Measurement Within a Severe Thunderstorm Anvil // J.Geoph. Res. – 1989. – V. 94, N D5. – P. 6297–6307.
- [15] Артеха С.Н., Ерохин Н.С. Электромагнитные силы и вихревые процессы в атмосфере // Международная конференция МСС-04 "Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность" 23–25 ноября 2004 г. Сборник трудов. – М.: Рохос: 2004. – С. 326–332.
- [16] Гуцин Г.П., Соколенко С.А.. О колебаниях суммарного озона при прохождении тропических циклонов // Метеорология и гидрология. – 1985. N 10. – С. 44–51.
- [17] Saunders C.P.R., Rimmer J.S. The electric field alignment of ice crystals in thunderstorms // Atmos. Res. – 1999. – V. 51. – P. 337–343.
- [18] Reid G.C. Solar variability and the Earth's climate: introduction and overview // Space Sci. Rev. – 2000. – V. 94. – P. 1–11.
- [19] Rycroft M.J., Israelsson S., Price C.. The global atmospheric circuit, solar activity and climate change // J.Atmos. and Solar-Terrestrial Physics. – 2000. – V. 62. – P. 1563–1576.
- [20] Госсард Э., Хук У. Волны в атмосфере. – М.: Мир. – 1978.
- [21] Перов С.П., Хргиан А.Х. Современные проблемы атмосферного озона. – Л.: Гидрометеоздат. – 1980.
- [22] Нерушев А.Ф., Нетреба С.Н., Свиркунов П.Н., Ярошевич М.И. Генерация возмущений геофизических полей при эволюции тропических циклонов // ДАН. – 1997. – Т. 354, N 1. – С. 96–100.
- [23] Нерушев А.Ф. Воздействие тропических циклонов на озоносферу // Изв. АН. ФАО. – 1995. – Т. 31, N 1. – С. 46–52.
- [24] Sharma D.K., Jagdish Rai, Ispail M., Subrahmanyam P., Chopra P., Garg S.C. Enhancement in ionospheric temperatures during thunderstorms // J. Atmos. and Solar-Terrestrial Physics. – 2004. – V. 66. – P. 51–56.
- [25] Kazimirovsky E., Herraiz M. And De La Morena B.A. Effects on the ionosphere due to phenomena occurring below it.// Surveys in Geoph. – 2003. – V. 24. – P. 139–184.
- [26] Sukhorukov A.I., Stuble P. Problems of blue jet theories // J.Atmos. and Solar-Terrestrial Physics. – 1998. – V. 60. – P. 725–732.
- [27] Rowland H.L. Theories and simulations of elves, sprites and blue jets // J.Atmos. and Solar-Terrestrial Physics. – 1998. – V. 60. – P. 831–844.
- [28] Gurevich A.V., Medvedev Yu.V., Zybin K.P. Thermal electrons and electric current generated by runaway breakdown effect // Phys. Lett. A. – 2004. – V. 321. – P. 179–184.
- [29] Kundt W., Thuma G. Geoelectricity: atmospheric charging and thunderstorms // J.Atmos. and Solar-Terrestrial Physics. – 1999. – V. 61. – P. 955–963.
- [30] Бояревич В.В., Фрейберг Я.Ж., Шилова Е.И., Щербинин Э.В.. Электровихревые течения. – Рига: Зинатне. – 1985.
- [31] Трахтенгерц В.Ю., Мареев Е.А., О проблеме электрического динамо // Известия Вузов, серия Радиофизика. – 1996. – Т.39, № 6. – С. 797–814.
- [32] Taylor J.B. Relaxation and magnetic reconnection in plasmas // Rev. Mod. Phys. – 1986. – V. 58. – P. 741.
- [33] Вайнштейн С.И., Зельдович Я.Б., Рузмайкин А.А. Турбулентное динамо в астрофизике. – М: Наука. 1980.
- [34] Чижелски Р. Параметризация турбулентности в потоках со спиральностью // ФАО. – 1999. – Т. 35, N 2. – С. 174–188.
- [35] Yamei Xu, Rongsheng Wu. The Conservation of Helicity in Hurricane Andrew (1992) and the Formation of the Spiral Rainband // Adv.Atmos.Sci. – 2003. – V.20, N 6. – P. 940–950.

- [36] Чхетиани О.Г. Самоорганизация и турбулентность в отражательно-несимметричных плазменно-гидродинамических средах. – Докторская диссертация, Москва. – 1999.