

## Исследование структурных характеристик электрической турбулентности в грозовой облачности и влияния электрических подсистем мощных атмосферных вихрей на их динамику

Н.С. Ерохин<sup>1,2</sup>, И.А. Краснова<sup>2</sup>, С.Н. Артеха<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*

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

<sup>2</sup> *Российский университет дружбы народов, Москва, 115419, Россия*

*E-mail: sungirl8@mail.ru*

Как известно, в грозовой облачности атмосферы имеются заряженные подсистемы, создающие большие напряженности электрического поля порядка (10÷100) кВ/м, что обеспечивает перепад электрического потенциала между приземной тропосферой и ионосферой от сотен МэВ до ГэВ. Такие поля могут способствовать генерации интенсивных ветровых потоков, усилению слабых вихревых структур до уровня крупномасштабных вихрей. Исследования показывают, что электромагнитные взаимодействия в атмосфере могут влиять на генерацию мощных вихрей типа тропических циклонов (ТЦ) и на вертикальный профиль температуры атмосферы. В этой связи для корректного описания роли заряженных подсистем в формировании и последующей динамике атмосферных вихрей необходим анализ структурных характеристик электрических полей в грозовой облачности, определение параметров электрической турбулентности, их изменчивости в пространстве и времени. В данной работе на основе экспериментальных данных описаны результаты анализа структурных функций электрической турбулентности  $S_m(L)$  для различных вариантов вертикального профиля электрического поля (включая случаи сильного всплеска его амплитуды) для диапазона высот  $z < 16$  км. Исследованы инерционные интервалы электрической турбулентности и получены характерные параметры: скейлинговые экспоненты, величины индекса Херста и куртозиса в них. В инерционных интервалах часто наблюдаются отклонения структурных функций (СФ) от степенного скейлинга. Анализ показал, что для интервалов малых и средних масштабов турбулентности может наблюдаться обобщенная масштабная инвариантность (ОМИ) электрической турбулентности. Однако в некоторых случаях ОМИ отсутствует, что может быть связано с перемежаемостью электрической турбулентности и присутствием когерентных электрических структур. Результаты данных исследований могут быть использованы для последующих оценок роли заряженных подсистем в формировании самосогласованной неоднородной структуры ветровых потоков в атмосферных вихрях, при моделировании их нелинейной динамики с использованием схем параметризации, учитывающих электрические подсистемы, для выявления возможности воздействия различных факторов, например, вариаций космических лучей на их генезис и динамику. Очевидно, что это представляет интерес для мониторинга ТЦ, включая космические методы зондирования, для дальнейшего развития методик обработки полученных экспериментальных данных, более полной и корректной физической интерпретации результатов их обработки, для разработки новых, современных методов прогнозирования кризисных природных явлений и численного моделирования динамики интенсивных крупномасштабных вихрей в атмосфере с учетом спиральности и наличия заряженных подсистем.

**Ключевые слова:** заряженные подсистемы атмосферы, грозовая облачность, инерционный интервал, турбулентность, структурные функции, перемежаемость, скейлинг, атмосферные вихри

### Введение

Ранее было установлено, что наличие гидродинамической спиральности  $\mathbf{v} \times \text{rot } \mathbf{v}$ , где  $\mathbf{v}$  – скорость элемента газа, повышает устойчивость атмосферных вихрей к возмущениям и увеличивает время их существования (Lazarev, Moiseev, 1990; Моисеев, Чхетиани, 1996; Branover et al., 1998; Ерохин, Моисеев, 2003). Кроме того, выяснилось, что спиральность способствует возникновению обратного каскада энергии (от малых масштабов в крупные) и поэтому возможно, например, усиление слабых синоптических возмущений до уровня мощных тропических циклонов (ТЦ). Отметим, что большой объем данных по ТЦ представлен в монографии (Шарков, 1997). Дальнейшие исследования возможных механизмов генерации спиральных движений в приложении к ТЦ показало, что для корректного описания данного процесса необходимо учитывать вклад заряженных подсистем грозовых облач-

ных систем ТЦ как в формирование самосогласованной, неоднородной структуры ветровых потоков, так и в последующую нелинейную динамику вихрей. В частности, этот вопрос был рассмотрен в работах (Arteha, Golbraikh, Erokhin, 2003; Артеха, Ерохин, 2005). Имеющиеся экспериментальные данные о вертикальных профилях электрического поля  $E_z(z)$  в грозовой облачности, приведенные, например, в работах (Byrne, Few, Stewart, 1989; Marshall, Rust, 1995; Marshak et al., 1997) указывают на присутствие достаточно сильных электрических флуктуаций в грозовой облачности с характерными размерами по высоте (20–800 м) и напряженностями электрического поля порядка 10–100 кВ/м. Заметим, что вихри типа ТЦ могут воздействовать на ионосферу Земли за счет проникновения в нее электрического поля ТЦ с последующим формированием в областях E и F ионосферы спорадических слоев пониженной концентрации электронов. Этот вопрос рассматривался, например, в работах (Negai et al., 1990; Пулинец и др., 1998; Бондур, Пулинец, 2012).

Для корректных оценок вклада заряженных подсистем в генерацию спиральных движений атмосферы и развития схем параметризации гидродинамических уравнений с учетом влияния заряженных подсистем необходимо изучать параметры электрических флуктуаций, в частности, свойства структурных функций  $S_m(L)$ , где  $L = z_1 - z_2$  – разность высот двух атмосферных слоев, а также наличие инерционных интервалов, в которых для СФ выполняются степенные скейлинги вида  $S_m(L) \sim L^{g(m)}$ , где  $g(m)$  – скейлинговая экспонента.

В настоящем обзоре на основе стандартных подходов в исследовании гидродинамической турбулентности (Анисимов, Мареев, 2008; Anisimov, Bakastov, Mareev, 1994; Branover et al., 1998; Ерохин, Моисеев, 2003; Osborne, Provenzale, 1989; Litvinenko et al., 1992; Marsh, Tu, 1997; Schertzer et al., 1997; Horbury, Balogh, 1997), используя экспериментальные графики электрического поля  $E_z(z)$  для высот  $z < 16$  км, рассмотрены параметры структурных функций  $S_m(L)$  для электрического поля в грозовой облачности, включая стандартное отклонение для вариаций поля  $E_z(z)$ , скейлинговые экспоненты  $g(m)$ , индекс Херста  $H$ , а также куртозис  $K(L) = S_4(L) / [S_2(L)]^2$  и асимметрию вариаций электрического поля (skewness). Отметим, что индекс Херста  $H$  характеризует трендоустойчивость высотного профиля поля  $E_z(z)$ , а куртозис – присутствие перемежаемости в электрической турбулентности. При наличии перемежаемости скейлинговая экспонента имеет уже нелинейную зависимость от параметра  $m$ . В исследованных выборках экспериментальных данных на малых и средних масштабах обычно имеются инерционные интервалы, в которых возможна аппроксимация вида  $S_m(L) \sim L^{g(m)}$ , а имеющиеся малые отклонения от чисто степенного скейлинга могут быть связаны с перемежаемостью электрической турбулентности или наличием в ней когерентных структур.

Следует отметить, что, помимо указанной выше связи с метеорологическими процессами в атмосфере, электрические подсистемы грозовой облачности могут обуславливать вариации потока вторичных космических лучей (мюонов, электронов и др.) в нижней мезосфере, а также корреляцию поля  $E_z(z)$  с геомагнитной активностью, в частности, с солнечными протонными событиями. Эти вопросы были рассмотрены, например, в работах

(Khaerdinov, Lidvansky, Petkov, 2005; Лидванский, Хаердинов, 2011; Zadorozhny, Tyutin, 1998). Поэтому особенности динамики атмосферы, обусловленные электрическими подсистемами облачности, могут быть установлены путем исследования характеристик вариаций потока вторичных космических лучей во время гроз.

Ниже будут описаны также проявления электромагнитных взаимодействий в атмосферных процессах применительно к структурам типа ТЦ. Для организации численных расчетов вклада электрических структур вихря в генерацию и устойчивое поддержание неоднородных спиральных ветровых потоков в рамках электрогидродинамических уравнений и уравнений для генерации спиральности необходимо определить пространственные распределения электрических полей и плотностей зарядов. Для упрощения расчетов использованы аналитические аппроксимации данных измерений электромагнитных характеристик заряженных подсистем интенсивных атмосферных вихрей. Таким образом, характеристики ТЦ рассматриваются самосогласованно при анализе механизма генерации спиральности с учетом заряженных подсистем в крупномасштабном атмосферном вихре.

### Исходные данные, анализ структурных функций электрической турбулентности

Рассмотрим характеристики структурных функций  $S_m(L)$  для электрического поля в грозовой облачности с вертикальным профилем  $E_z(z)$ . В расчетах используются аналитические аппроксимации экспериментальных графиков  $E_z(z) = \sum_n b_n(z)$  в классе локализованных функций следующего вида:  $b_n(z) = a_n / [1 + k_n^2(z - z_n)^2]$ ; с параметрами  $a_n, k_n, z_n$ , которые находятся по минимуму отличий аналитической аппроксимации от экспериментального графика  $E_z(z)$ . Затем вычисляются структурные функции  $S_m(L)$ , определяемые формулой:

$$S_m(L) = \left\langle |E_a(z_i + L) - E_a(z_i)|^m \right\rangle,$$

где  $z_i = z_{\min} + \lambda(i - 1)$ ,  $L = \lambda n$ , здесь разрешение по высоте  $\lambda$  выбиралось в различных расчетах в диапазоне (2÷5) метров для области высот  $z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$ , причем усреднение по  $i$  было в диапазоне  $1 \leq i \leq N$ ,  $N = h / \lambda$ . Толщина интервала по высоте была  $h = z_{\max} - z_{\min}$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$  - целое число. Для разницы высот  $L$  полагаем  $\lambda \leq L \leq h / 2$ . Зависимость  $S_m(L)$  от масштаба  $L$  для различных значений порядка  $m$  представляется на графиках в lg-lg координатах. При наличии в электрической турбулентности инерционных интервалов связь в них между  $\lg S_m(L)$  и  $\lg L$  почти линейна. Следовательно, в инерционных интервалах реализуются степенные скейлинги следующего вида  $S_m(L) \sim L^{g(m)}$ , где  $g(m)$  – скейлинговая экспонента.

В качестве примера обсудим характеристики СФ для высотного профиля  $E_z(z)$ , показанного на *рис. 1*.

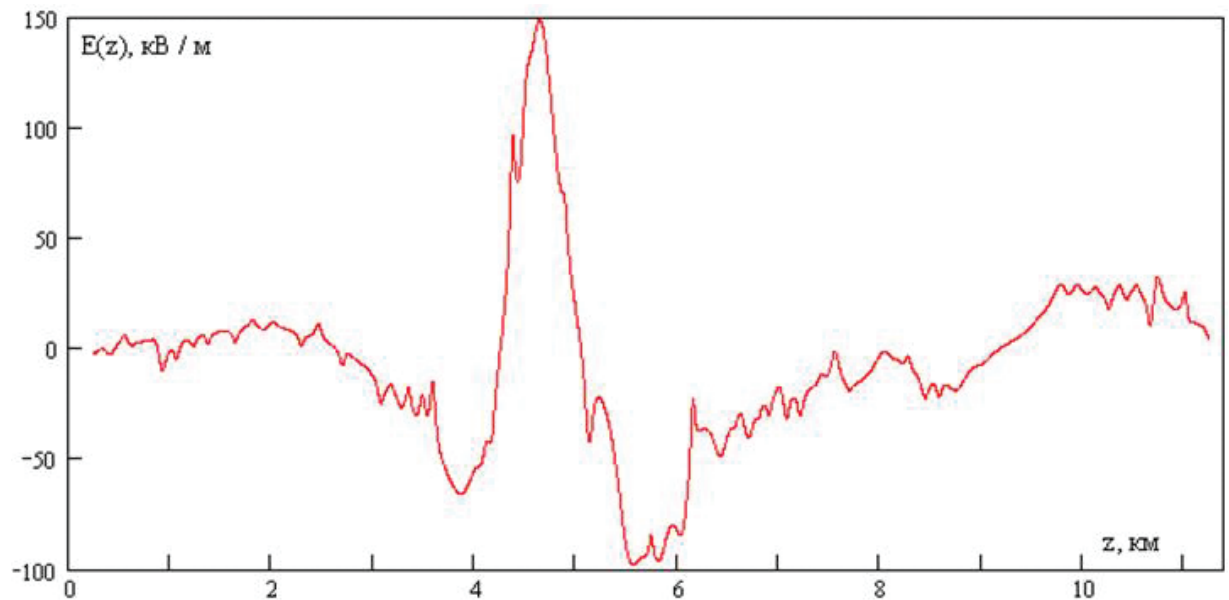


Рис. 1. Высотный профиль электрического поля в грозовой облачности

Для выборки, показанной на рис. 1, отметим сильный всплеск электрического поля на высоте  $z = 4,65$  км, равный  $148,7$  кВ/м. По расчетам график электрического потенциала  $U(z)$  для указанного диапазона высот оказывается весьма плавной функцией, но объемная плотность электрического заряда  $\rho(z)$  имеет в грозовой облачности сильные флуктуации по высоте. Графики структурных функций приведены на рис. 2, их аналитические аппроксимации – на рис. 3, и показывают наличие в электрической турбулентности двух инерционных интервалов, в которых приближенно выполняются степенные скейлинги для СФ. Для  $m = 1$  получаем индекс Херста  $H$ , причем  $H = g_1(1) \approx 1$  на малых масштабах и  $H = g_2(1) \approx 0,71$  для средних масштабов. Индекс спектра мощности турбулентных флуктуаций  $\alpha$  выражается через  $g(2)$ :  $\alpha = 1 + g(2)$ . Согласно расчетам на малых и средних масштабах имеем соответственно  $\alpha_1 \approx 2,92$ ,  $\alpha_2 \approx 2,46$ . Для среднего значения электрического поля  $\langle E(z) \rangle \equiv E_{av}$  и его стандартного отклонения  $\sigma$  в рассматриваемом диапазоне высот получаем соответственно следующие значения:  $E_{av} \approx 5,864$  кВ/м,  $\sigma \approx 35,559$  кВ/м, где  $\sigma^2 = \langle (E(z) - E_{av})^2 \rangle$ , усреднение по  $i$  проводится в интервале  $1 \leq i \leq N$ . Рассмотрим дополнительные параметры турбулентности: асимметрию распределения флуктуаций (skewness)  $Sk$  и куртозис  $K_1$ , определяемые для выборки следующими выражениями:

$$Sk = \langle (E(z) - E_{av})^3 / \sigma^3 \rangle, K_1 = \langle (E(z) - E_{av})^4 / \sigma^4 \rangle.$$

Расчеты дают такие значения:  $Sk \approx 0,776$ ,  $K_1 \approx 6,242$ . Отметим, что для нормально-го распределения флуктуирующей величины параметр  $Sk$  равен нулю, а  $K_1 = 3$ . Поскольку  $Sk$  положительно для исследуемой выборки, левый хвост распределения электрического поля по величине короче правого хвоста. Для куртозиса эксцесс  $(K_1 - 3)$  положителен.

Во всех случаях имеются некоторые отклонения от чисто степенного скейлинга.

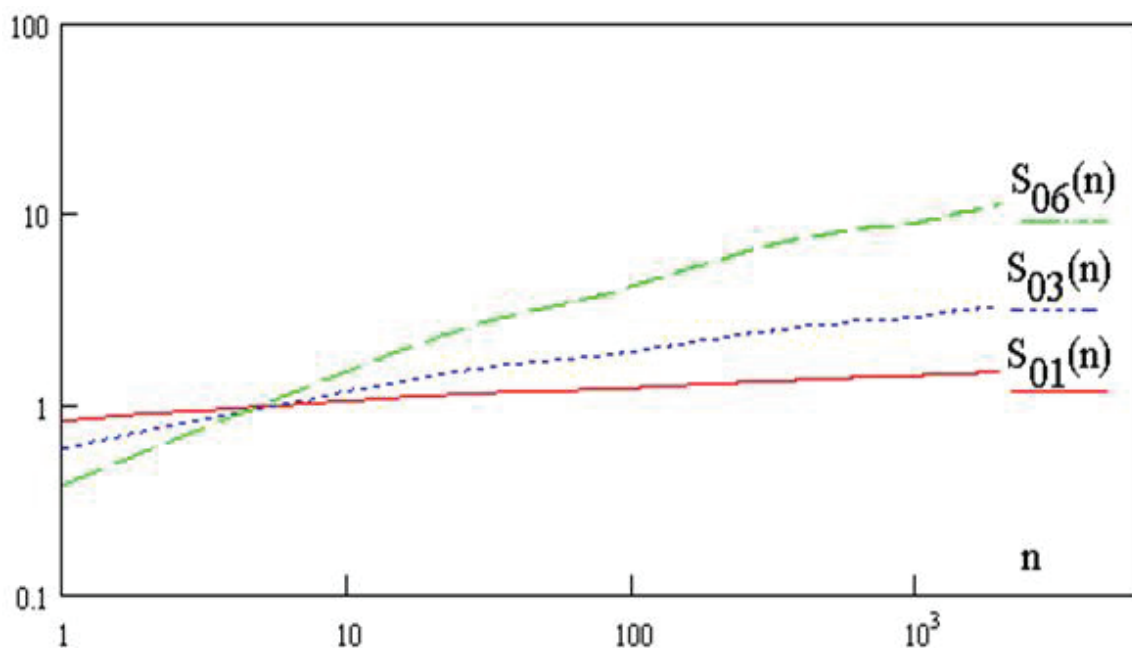


Рис. 2а. Графики СФ электрической турбулентности в грозовой облачности для порядков  $t = 0,1; 0,3; 0,6$

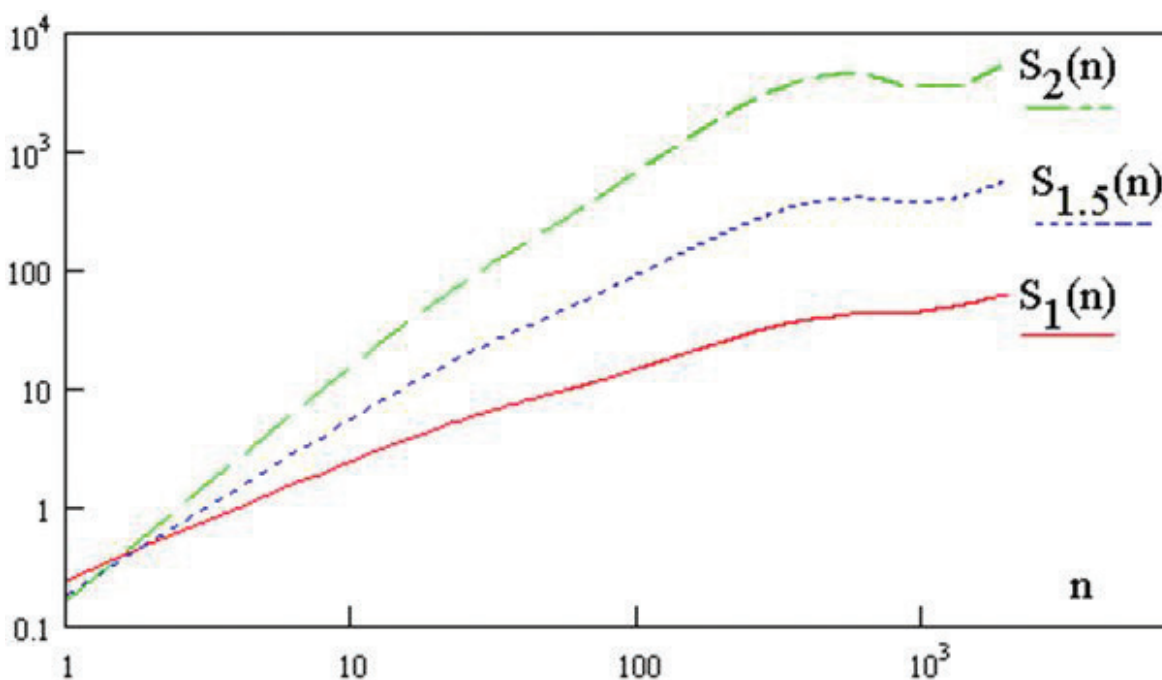


Рис. 2б. Графики СФ электрической турбулентности в грозовой облачности для порядков  $t = 1; 1,5; 2$

Поскольку высотное распределение электрического поля по величине имеет хорошо выраженный пик, в электрической турбулентности присутствует сильная перемежаемость. Рассмотрим обобщенную масштабную инвариантности (ОМИ) для анализируемой выборки электрического поля. Из проведенного анализа следует, что имеются два инерционных интервала для электрической турбулентности: на малых  $n < 30$  и на средних  $30 < n < 450$  масштабах.



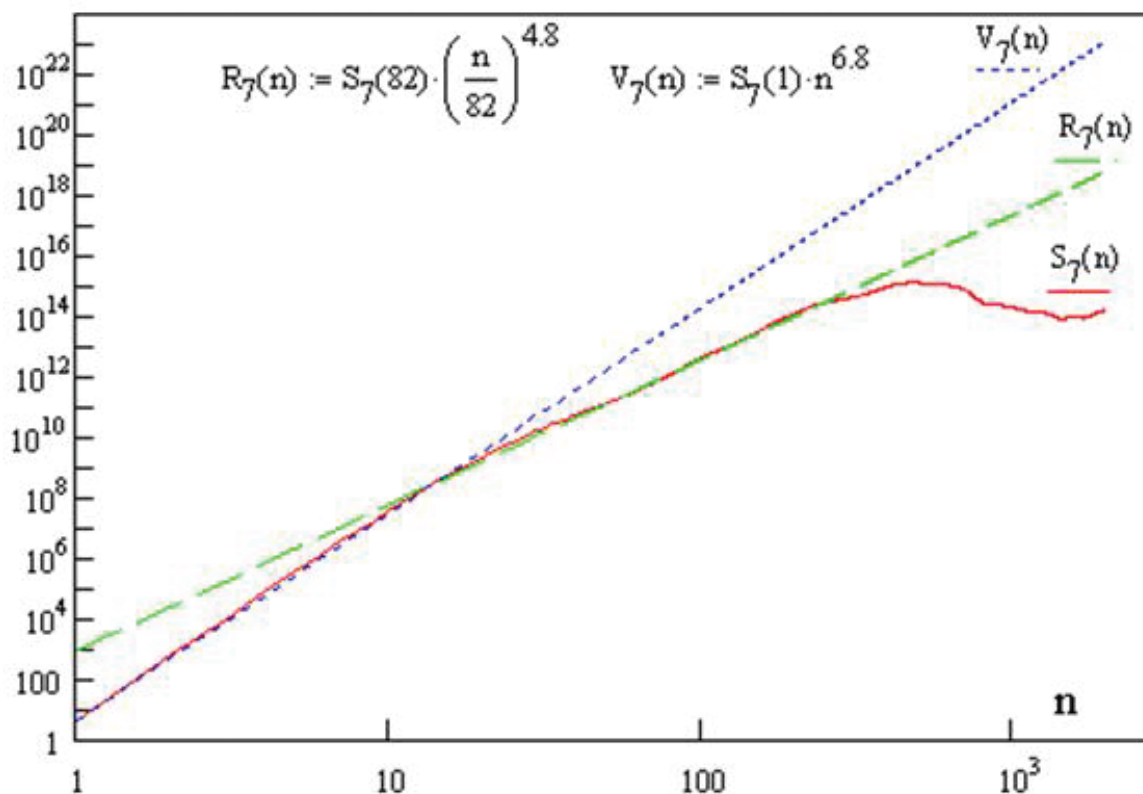


Рис. 3. График СФ электрической турбулентности для порядка  $m = 7$  и ее степенные аппроксимации в инерционных интервалах:  $V_7(n)$  для малых  $n < 30$  масштабов  $g_1(7) = 6,8$ , а  $R_7(n)$  для средних ( $30 < n < 450$ ) масштабов, когда  $g_2(7) = 4,8$

Представленные выше графики СФ показывают наличие отклонений  $S_m(n)$  от чисто степенного скейлинга. Анализ же графиков на плоскости  $(S_m(n), S_3(n))$  показывает, что в данной выборке обобщенная масштабная инвариантность отсутствует. Расчеты для других высотных распределений электрического поля при отсутствии в них резких пиков  $E_z(z)$  показывают наличие двух инерционных интервалов и обобщенной масштабной инвариантности. Отметим, что вопрос перемежаемости и обобщенной масштабной инвариантности в гидродинамической турбулентности рассматривался в работах (Anisimov, Shikhova, 2014; Dubrulle, 1994).

### Влияние электромагнитных взаимодействий на крупномасштабный циклогенез

Обсудим теперь влияние заряженных подсистем и связанных с ними электромагнитных взаимодействий на генерацию крупномасштабных вихрей в атмосфере и их динамику. Данные космических и наземных наблюдений свидетельствуют о наличии четко выраженных асимметрий тайфуногенеза. Гидродинамические теории, учитывающие конвекцию и силу Кориолиса, пока не дают ответа на ряд ключевых вопросов, касающихся механизмов зарождения и интенсификации ТЦ, поддержания их стационарной фазы, наличия географической, временной и частотной асимметрий. Так географическая асимметрия тайфуногенеза

(Хаин, Сутырин, 1983; Добрышман 1994) проявляется для осесимметричной Земли в следующем. В северном полушарии зарождается в (1,5–4) раза больше ТЦ, чем в южном полушарии. В восточном полушарии число возникающих ТЦ в два раза больше аналогичного числа в западном полушарии. В северном полушарии ТЦ наблюдаются и выше 35° с.ш., а на юге – нет. Непонятно полное отсутствие ТЦ вблизи Южной Америки и в южном полушарии вблизи Африки (со стороны Атлантики). Тихоокеанские ТЦ в среднем оказываются более крупными, а атлантические имеют размеры меньше, но обладают большей скоростью вращения (Байбаков, Мартынов, 1986; Merrill, 1984). Анализ показывает, что область зарождения ТЦ находится не просто в «гидродинамических полосах» (между 30° с.ш. и 30° ю.ш., исключая  $\pm 5^\circ$ ), а на пересечении этих полос и «геомагнитных зон» (с вертикальной составляющей геомагнитного поля  $|B_z| \geq 2 \times 10^{-5}$  Тл). Возможно, этот фактор и нарушает симметрию Земли в атмосферных явлениях типа ТЦ. Затем многие ТЦ возникают в самой середине зоны пассатов с совершенно однородной воздушной массой, т.е. большой начальный импульс и температурные контрасты в зоне конвергенции ни при чем. Неверным является утверждение о единственном механизме трансформации движений в вихревые структуры через контакт с океаном, поскольку часто ТЦ даже при выходе на сушу существуют длительное время. Кроме того, значительная их часть гибнет над океаном; над ТЦ наблюдается антициклон; хобот смерча (как и ТЦ) опускается сверху. Казалось бы, существующие достаточно объемные начальные закрутки в обоих направлениях должны «подхватываться гидродинамическим механизмом», и в обоих полушариях временами могли бы наблюдаться ТЦ, вращающиеся в обоих направлениях, поскольку силы Кориолиса недостаточно для блокирования начала интенсификации. Однако это не так – направление вращения ТЦ фиксировано. Значит, имеется дополнительный механизм, помогающий поддерживать четкую структуру этого явления (Артеха, Ерохин, 2005; Arteha, Erokhin, 2009; Arteha, Belyan, 2013).

Наибольшая тангенциальная скорость в ТЦ наблюдается на определенной высоте, а выше включается механизм, приводящий к антициклоническому вращению. Струи оттоков сверху ТЦ не осесимметричны и их направление не является случайной функцией. Возможно, большое влияние на эти струи оказывают заряженные частицы. Ось циклона или антициклона средних широт, как правило, не вертикальна, а сильно наклонена к поверхности Земли. Напомним, что магнитное поле Земли также наклонено к ее поверхности, а заряженная область стремится иметь ось вращения по магнитному полю. В реальности наклон оси, прецессию и движение системы определяют как *гидродинамическая вращающаяся подсистема* (связанная внизу с земной поверхностью, а наверху с соответствующим потоком), так и *вращающаяся заряженная подсистема*, стремящаяся двигаться по ЭМГД-законам в самосогласованных полях. В ТЦ присутствуют сразу две противоположно заряженные области, и ось оказывается практически вертикальной, что может быть связано с электрическими силами, располагающими противоположно заряженные области друг под другом и симметризирующими систему (Артеха, Белян, Ерохин, 2013).

Если электромагнитные силы важны, то должна проявляться корреляция между появлением заряженных частиц в атмосфере и зарождением тропических депрессий.

Наблюдается взаимодействие ТЦ с открытыми системами: стратосферой, ионосферой и космосом (Sorokin et al., 2001; Rycroff et al., 2000; Stozhkov, 2003; Rodgers et al., 1990; Нерушев и др., 1997; Kazimirovsky et al., 2003). Далее: 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 и с потоком космических лучей (Бондур, Пулинец, Ким, 2008). Солнечный ветер модулирует вертикальный ток и тем самым влияет на микрофизику облаков. Как видим, возмущения геофизических полей можно использовать в диагностических и прогностических целях.

Для ТЦ характерна следующая структура: вблизи земной поверхности в центре ТЦ существует малая область положительного заряда; на высоте (4–8) км находится большая область отрицательного заряда, а на высоте (10–16) км располагается область положительного заряда. Такая трехполосная структура ТЦ наблюдается для очень мощных ТЦ. Кроме того, часто количество заряженных областей по высоте оказывается больше трех. При этом чем больше заряженных областей, тем, например, вертикальная скорость ветра оказывается меньше. По-видимому, по мере развития ТЦ соответствующие заряженные области объединяются. В области гроз также наблюдаются многослойные электрические структуры облачности (Marshall and Rust, 1995; Byrne et al., 1989). Для ТЦ частота молниевых ударов весьма переменна (1–700)/час. Эта величина кажется большой, но при учете объема ТЦ она весьма мала. Возможно, электрическая структура ТЦ более регулярна, чем в случае гроз умеренных широт, так как принимает участие в поддержании стационарной фазы ТЦ. Частота молниевых вспышек может рассматриваться и как индикатор генезиса ураганов (Leary, Ritchie, 2009; Price et al., 2009).

Оценки и численные расчеты всех действующих сил и движений (Артеха, Белян, Ерохин, 2013; Artekha, Belyan, 2013) показывают, что для объяснения самого существования заряженных облачных плазмopodobных подсистем необходимо предположить некоторую упорядоченность заряженных частиц в облаках. Заряженные частицы разных знаков в среднем чередуются друг с другом, образуя некоторое подобие «кристалла», удерживаемого как целое пондеромоторными силами. Разумеется, такой воздушно-капельно-ледяной «кристалл» является динамическим, находящимся лишь в статистическом равновесии. При избытке сил притяжения увеличивается конденсация, капельки увеличиваются в размерах и выпадают в виде осадков. Так восстанавливается равновесие (например, в области наибольшего изменения электрического поля). Заметим, что нейтральные частицы движутся примерно со средней скоростью потока. Положительные частицы, число которых близко к числу отрицательных частиц, начинают двигаться под действием электрического поля несколько быстрее потока, а отрицательные частицы начинают двигаться в противоположную сторону и несколько отстают. Каждой из этих частиц набрать существенную скорость относительно потока мешают (кроме сопротивления среды) столкновения с нейтральными частицами и частицами противоположного знака, в результате которых частицы «отбрасываются на стартовые позиции».

Оценка сил для вертикального движения показывает следующее. Напряженность электрического поля достигает экстремальных значений только вблизи стены глаза ТЦ,



в полосах дождя и вблизи отрицательно заряженной области ТЦ. Именно здесь электрическая сила играет существенную роль (в то время как для остальных частей ТЦ основную роль в балансе сил играют сила тяжести и сила аэродинамического сопротивления). Например, электрическая сила существенно благоприятствует образованию обширной отрицательно заряженной области ТЦ на высоте около 6 км, так как помогает частичкам левитировать (совместно с силой аэродинамического сопротивления противодействует силе тяжести).

По-видимому, еще одним необходимым условием (ко всем обнаруженным ранее гидро- и термодинамическим условиям) возникновения ТЦ является накопление в некоторой области атмосферы достаточного количества свободных зарядов. Ионы выступают также центрами конденсации, где выделяется скрытая теплота парообразования. Это спусковой механизм для преобразования огромных запасов тепловой энергии в энергию движения. Возникает подток среды вверх и подобие «воронки в ванне», которая раскручивается по мере приближения воздушных масс к оси за счет сохранения момента импульса. Сложность предсказания траектории ТЦ состоит в том, что кроме массы нейтрального газа, подчиняющегося уравнениям гидродинамики, в тайфуне присутствует заряженная подсистема, подчиняющаяся законам ЭМГД. Видимо поэтому часто возникают петли и другие непредсказуемые типы движения ТЦ, и классический параболический вид траектории наблюдается только у 47% ТЦ.

Таким образом, ключевые наблюдательные факты свидетельствуют о существенной роли электромагнитных явлений во многих атмосферных процессах. Оценки действующих сил и механизмов показывают, что для более полного описания процессов в ТЦ необходимо учитывать движение плазмopodobных подсистем. Электромагнитные силы принимают участие в генерации и поддержании структуры ТЦ.

### **Обсуждения и выводы**

Тематика направления исследований по атмосферному электричеству в ИКИ РАН может быть сформулирована следующим образом. Во-первых, на основе имеющихся в литературе данных баллонных измерений электрического поля  $E(z)$  проводится анализ характеристик структурных функций для высотных профилей электрического поля в области  $z < 16$  км. Эти расчеты позволяют определить параметры электрической турбулентности атмосферы в указанном диапазоне высот, что весьма важно для исследования ее влияния на гидродинамику движений в тропосфере, включая интенсификацию малых возмущений синоптического масштаба до крупномасштабного уровня, а также для разработки схем параметризации в гидродинамике атмосферы, позволяющих учесть наиболее простым способом воздействие атмосферного электричества и процессов ионизации на высотный профиль температуры атмосферы, потоки скрытого тепла в тропосфере, формирование самосогласованных, неоднородных ветровых структур в заряженных под-

системах ТЦ, воздействие электромагнитных взаимодействий на генерацию ТЦ и продолжительность их жизненного цикла. Кроме того, возможно исследовать воздействие заряженных подсистем атмосферы на ионосферу с генерацией неоднородностей плазмы. Во-вторых, проводится анализ электродинамических взаимодействий на динамику крупномасштабных вихрей, возникновение пространственной асимметрии тропического циклогенеза, включая траектории тайфунов. Ведется разработка физико-математических моделей динамики крупномасштабных вихрей типа тайфунов с учетом (в рамках схем параметризации) воздействия атмосферного электричества. Напомним, что максимальные электрические поля наблюдаются в области высот (4÷6) км, где напряженность поля  $E(z)$  достигает значений (10÷150) кВ/м, что на два–три порядка больше величин  $E(z)$  в приземном слое тропосферы (до высот около 1,4 км).

Основные достижения по данному направлению работ в ИКИ состоят в следующем. Получен принципиальный результат: спиральность атмосферных движений в вихрях приводит к возникновению обратного каскада энергии по спектру турбулентности – от малых масштабов в крупные, что является одним из механизмов интенсификации синоптических возмущений малой амплитуды до уровня тропических циклонов по скорости ветровых потоков. Аналитические и численные расчеты электрической турбулентности для различных экспериментальных выборок поля  $E(z)$  выявили (в отличие от классического колмогоровского варианта турбулентности) наличие двух инерционных интервалов в графиках структурных функций: на малых и средних (десятки – сотни метров) масштабах, в которых наблюдаются степенные скейлинги СФ причем скейлинговая экспонента на малых масштабах больше, чем на средних. На больших масштабах имеется насыщение роста СФ. Для рассмотренных экспериментальных выборок  $E(z)$  разработаны аналитические аппроксимации структурных функций в инерционных интервалах. Проведены расчеты других параметров  $S_m(n)$ , включая спектр мощности, стандартное отклонение, асимметрию (skewness) функции распределения величин  $E(z)$ , куртозис, индекс Херста. Из анализа СФ следует, что рассмотренные экспериментальные выборки более трендоустойчивы в инерционном интервале на малых масштабах, но на средних масштабах они сильно зашумлены. Построены одномерные аналитические модели, демонстрирующие влияние когерентных структур и перемежаемости на поведение СФ. Это необходимо для корректной интерпретации результатов расчетов  $S_m(n)$ . Показано, что наличие перемежаемости электрической турбулентности и когерентных структур на средних масштабах может объяснить отклонения графиков  $S_m(n)$  от чисто степенных скейлингов. Расчеты СФ проводились для порядков  $m$  в интервале  $0,1 < m < 7$ . Отклонения зависят от распределения когерентных структур по длине выборки. По экспериментальным выборкам выполнены расчеты объемной плотности электрического заряда в атмосфере с заряженными подсистемами, которые показали, что эти подсистемы являются многослойными структурами с чередованием положительных и отрицательных зарядов.

В последнее время на основе экспериментальных выборок для электрического поля  $E(z)$  в тропосфере проводится анализ возможности обобщенной масштабной инвариантно-

сти (ОМИ) в электрической турбулентности атмосферы. Показано, что для рассмотренных выборок при отсутствии резких всплесков электрического поля  $E(z)$  при наличии инерционных интервалов наблюдается (с хорошим приближением) ОМИ, т.е. единый степенной скейлинг на малых и средних масштабах для графиков зависимости  $S_m(n)$  от  $S_3(n)$  следующего вида:  $S_m(n) \sim [S_3(n)]^{m/3}$ . Таким образом, при наличии обобщенной масштабной инвариантности скейлинговая экспонента в зависимости  $S_m(n)$  от  $S_3(n)$  не зависит от скейлинговых экспонент в инерционных интервалах.

Для анализа влияния электромагнитных взаимодействий на динамику крупномасштабных интенсивных вихрей в атмосфере были систематизированы опытные данные по крупномасштабному циклогенезу и проведены оценки всех действующих факторов на характеристики ТЦ, включая механизмы зарождения и интенсификации ТЦ, поддержания их стационарной фазы, наличия географической, временной и частотной асимметрий (Артеха, Белян, Ерохин, 2013). Это касается зон формирования ТЦ, особенностей их траекторий, длительности жизненного цикла и пр. На основе имеющихся данных было проведено сравнение частот зарождения ТЦ в северном и южном полушариях, а также в западном и восточном полушариях. Показано нарушение симметрии циклогенеза по полушариям, что указывает на наличие механизма поддержания данной асимметрии.

Далее: наибольшая тангенциальная скорость в ТЦ наблюдается на определенной высоте, а выше включается механизм, приводящий к антициклоническому вращению. Струи оттоков выше ТЦ не осесимметричны и их направление не является случайной функцией. Поскольку в ТЦ присутствуют противоположно заряженные области, сделан вывод о том, что эти особенности потоков в нем наиболее вероятно связаны с электрическими силами и воздействием геомагнитного поля Земли. Если электромагнитные силы существенны в динамике атмосферных движений, то должна проявляться корреляция между появлением заряженных частиц в атмосфере и зарождением тропических депрессий. Затем количество штормов и молний коррелирует с числом солнечных пятен, с геомагнитным индексом и потоком радиоизлучения Солнца на длине волны 10,7 см, а также с потоками нейтронов и космических лучей. Кроме того, солнечный ветер модулирует вертикальный ток и таким образом влияет на микрофизику облаков. В указанной выше работе (Артеха, Белян, Ерохин, 2013) приведены источники, в которых описаны наблюдения отмеченных процессов и делается вывод о существенном влиянии электромагнитных взаимодействий и геомагнитного поля на динамику крупномасштабных интенсивных вихрей в атмосфере с заряженными подсистемами, что подтверждается приведенными в ней оценками сил и движений атмосферы. Проведенные оценки указывают на необходимость разработок упрощенных моделей динамики крупных атмосферных вихрей с учетом заряженных компонент. Однако для их анализа требуются довольно мощные вычислительные ресурсы ввиду очень больших размеров исследуемых вихрей и длительности жизненного цикла ТЦ.

В данном направлении научных исследований в ближайшие годы можно ожидать следующих достижений. Первое – анализ возможности обобщенной масштабной инвариант-

ности электрической турбулентности для большого числа экспериментальных выборок по измерениям вертикального профиля электрического поля в грозовой облачности в диапазоне высот до 16 км. Второе – разработка схем параметризации гидродинамических уравнений движений в атмосфере, учитывающих заряженные компоненты облачности и их взаимодействие с геомагнитным полем. Третье – поиск экспериментальных данных и разработка методик расчетов электрической турбулентности в грозовой облачности с учетом влияния горизонтальных неоднородностей системы. Четвертое – разработка упрощенных моделей и развитие методик расчета траекторий интенсивных атмосферных вихрей типа ТЦ. Тогда проведение численных расчетов при надлежащем выборе исходных параметров позволит дать корректную интерпретацию данных наблюдений и возможность надежного прогнозирования траекторий ТЦ. Пятое – исследование на основе схем параметризации гидродинамических уравнений для движений атмосферы возможностей направленного воздействия на интенсивные крупномасштабные вихри.

## Литература

1. Анисимов С.В., Мареев Е.А. Геофизические исследования глобальной электрической сети // Физика Земли. 2008. № 10. С. 8–18.
2. Артеха С.Н., Белян А.В., Ерохин Н.С. Проявления электромагнитных явлений в атмосферных процессах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 2. С. 225–233.
3. 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.
4. Артеха С.Н., Ерохин Н.С. О связи крупномасштабных вихревых атмосферных процессов с электромагнитными явлениями // Электромагнитные Явления. 2005. Т. 5. № 1(14). С. 3–20.
5. Байбаков С.Н., Мартынов А.И. С орбиты спутника – в глаз тайфуна. М.: Наука. 1986.
6. Бондур В.Г., Пулинец С.А. Воздействие мезомасштабных атмосферных вихревых процессов на верхнюю атмосферу и ионосферу земли // Исследования Земли из космоса. 2012. № 3. С. 3–11.
7. Бондур В. Г., Пулинец С. А., Ким Г. А. О роли вариаций галактических космических лучей в тропическом циклогенезе на примере урагана Катрина // Доклады академии наук, Геофизика. 2008. Т. 422. С. 244–249.
8. Добрышман Е.М. Некоторые статистические характеристики и особенности тайфунов // Метеорология и Гидрология. 1994. № 11. С. 83–99.
9. Ерохин Н.С., Моисеев С.С. Некоторые общие характеристики и механизмы развития природных кризисных процессов // Проблемы геофизики XXI века. М.: Наука, 2003. Т. 1. С. 160–182.
10. Лидванский А.С., Хаердинов Н.С. Статистика вариаций мюонов космических лучей во время гроз // Известия РАН. Серия физическая. 2011. Т. 75. № 6. 888–890.
11. Моисеев С.С., Чхетиани О.Г. Спиральный скейлинг в турбулентности // ЖЭТФ. 1996. Т. 110. Вып. 1(7). С. 357–370.
12. Нерушев А.Ф., Нетреба С.Н., Свиркунов П.Н., Ярошевич М.И. Генерация возмущений геофизических полей при эволюции тропических циклонов // ДАН. 1997. Т. 354. № 1. С. 96–100.
13. Пулинец С.А., Хегай В.В., Боярчук К.А., Ломоносов А.М. Атмосферное электрическое поле как источник изменчивости ионосферы // УФН. 1998. Т. 41. С. 515–522.
14. Хаин А.П., Сутырин Г.Г. Тропические циклоны и их взаимодействие с океаном. Л: Гидрометеоиздат. 1983.
15. Шарков Е.А. Аэрокосмические исследования тропических циклонов // Исследования Земли из Космоса. 1997. № 6. С. 87–111.
16. Anisimov S.V., Bakastov S.S., Mareev E.A. Spatiotemporal structures of electric field and space charge in the surface atmospheric layer. // Journal of Geophysical Research. 1994. Vol. 99. P. 10603–10610.
17. Anisimov S.V., Shikhova N.M. Intermittency of turbulent aereoelectric field // Atmospheric Research. 2014. Vol. 135–136. P. 255–262.
18. Arteha S.N. and N.S.Erokhin. Electric Structures Influence on the Atmospheric Spiral Vortices Stability // International Journal Unconventional Electromagnetics and Plasmas (UEP). 2009. Vol. 2. No. 1–2. P. 3–8.
19. Arteha S.N. and Belyan A.V. On the role of electromagnetic phenomena in some atmospheric processes, Nonlinear Processes in Geophysics. 2013. Vol. 20. P. 293–304.
20. Branover H, Eidelman A., Golbaikh E. and Moiseev S. Turbulence and Structures. Chaos, Fluctuations and Self-organization in Nature and in the Laboratory. San-Diego: Academic Press. 1998. 270 p.
21. Byrne G.J., Few A.A., Stewart M.F. Electric Field Measurement within a Severe Thunderstorm Anvil // Journal of Geophysical Research. 1989. Vol. 94 (D5). P. 6297–6307.
22. Dubrulle B. Intermittency in fully developed turbulence: log-Poisson statistics and generalized scale covariance // Physical Review Letters. 1994. Vol. 73. P. 959–967.

23. *Hegai V.V., Kim V.P., Illich-Svitych P.V.* The formation of a cavity in the night-time midlatitude ionospheric E-region above a thundercloud // *Planet. Space Sci.* 1990. Vol. 38. P. 703–707.
24. *Horbury T.S., Balogh A.* Structure function measurements of the intermittent MHD turbulent cascade // *Nonlinear Processes in Geophysics*. 1997. Vol. 4. No. 3. P. 185–199.
25. *Kazimirovsky E., Herraiz M., De La Morena B.A.* Effects on the ionosphere due to phenomena occurring below it // *Surveys in Geophys.* 2003. Vol. 24. P. 139–184.
26. *Khaerdinov N.S., Lidvansky A.S., Petkov V.B.* Electric field of thunderclouds and cosmic rays: evidence for acceleration of particles (runaway electrons) // *Atmospheric Research*. 2005. Vol. 76. Iss. 1–4. P. 346–354.
27. *Lazarev A.A., Moiseev S.S.* Geophysical Precursors of Early Stages of Cyclogenesis: Preprint IKI RAN. Pr -1844. 1990. 13 p.
28. *Leary L.A., Ritchie E.A.* Lightning Flash Rates as an Indicator of Tropical Cyclone Genesis in the Eastern North Pacific // *Month. Weather Rev.* 2009. Vol. 137(10), P. 3456–3470.
29. *Litvinenko L.N., Ryabov V.B., Usik P.V. et al.* Correlation Dimension // *The New Tool in Astrophysics*. Kharkov: Institute of Radio Astronomy, Academy of Sciences of Ukraine, Preprint No. 64. 1992. 53 p.
30. *Marsh E., Tu C.Y.* Intermittency, non-Gaussian statistics and fractal scaling of MHD fluctuations // *Nonlinear Processes in Geophysics*. 1997. Vol. 4. No. 1. P. 101–124.
31. *Marshak A., Davies A., Wiscombe W., Cahalan R.* Scale-invariance of liquid water distribution in marine stratocumulus. Part II. Multifractal properties and intermittency issues // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1997. Vol. 54. No.11. P. 1423–1444.
32. *Marshall T.C. and Rust W.D.* Electrical structures and updrafts speeds in thunderstorms over the southern great-plains // *Journal of Geophysical Research*. 1995. Vol. 100 (D1). P. 1001–1015.
33. *Merill R.T.* A Comparison of Large and Small Tropical Cyclones // *Mon. Weather Rev.* 1984. Vol. 112. P. 1408–1418.
34. *Osborne A.R., Provenzale A.* Finite correlation dimension for stochastic systems with power-law spectra // *Physica D*. 1989. Vol. 35. No. 2. P. 357–381.
35. *Price C., Asfur M., Yair Yo.* Maximum hurricane intensity preceded by increase in lightning frequency // *Nature Geosci.* 2009. Vol. 2(5). P. 329–332.
36. *Rodgers E.B., Stout J., Steranka J., Chang S.W.* Tropical cyclone-upper atmospheric interaction as inferred from satellite total ozone observations // *J. Appl. Meteorol.* 1990, Vol. 29(9), P. 934–957
37. *Rycroft M.J., Israelsson S., Price C.* The global atmospheric circuit, solar activity and climate change // *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 2000. Vol. 62. P. 1563–1576.
38. *Schertzer D., Lovejoy S., Schmitt F., Chigirinskaya Y., Marsan D.* Multifractal cascade dynamics and turbulent intermittency // *Fractals*. 1997. Vol. 5. No. 3. P. 427–471.
39. *Sorokin V.M., Chmyrev V.M., Yaschenko A.K.* Electrodynamical model of the lower atmosphere and the ionosphere coupling // *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 2001. Vol. 63, P. 1681–1691.
40. *Stozhkov Y.I.* The role of cosmic rays in the atmospheric processes // *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 2003. Vol. 29. P. 913–923.
41. *Zadorozhny A.M., Tyutin A.A.* Effects of geomagnetic activity on the mesospheric electric fields // *Annales Geophysicae*. 1998. Vol. 16. P. 1544–1551.



# Investigation of structural characteristics of electrical turbulence in thunderstorm clouds and the effect of electrical subsystems of powerful atmospheric vortices on their dynamics

N.S. Erokhin<sup>1,2</sup>, I.A. Krasnova<sup>2</sup>, S.N. Artekha<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Space Research Institute RAS, Moscow, 117997, Russia

E-mail: nerokhin@iki.rssi.ru

<sup>2</sup> Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, 115419, Russia

E-mail: sungirl8@mail.ru

Atmospheric thunderstorm clouds are known to have charged subsystems generating sufficiently large electric field (10–100) kV/m, which results in electrical potential difference between the lower troposphere and the ionosphere from hundreds MeV up to GeV. Such fields can contribute to generation of intense wind flows, force weak vortex structures to develop into large-scale vortices. Studies show that electromagnetic interactions in the atmosphere can affect the generation of powerful vortex-type tropical cyclones (TC) and vertical temperature profile of the atmosphere. In this regard, for correct description of the role of charged subsystems in the formation and subsequent dynamics of atmospheric vortices, in particular, analysis of the structural characteristics of electric field in a thunderstorm cloud, definition of the parameters of electrical turbulence, their variability in space and time are needed. This paper presents the results of an analysis, based on experimental data, of electrical turbulence structure functions  $S_m(L)$  for a variety of vertical profile of electric field (including the case of a strong splash in its amplitude) for a range of heights  $z < 16$  km. The electrical inertial ranges of turbulence are studied and characteristic parameters are obtained in them: the scaling exponent, the value of Hirst index and kurtosis. The analysis has shown that in the inertial ranges, deviations of structure functions (SF) from power scaling are often observed. In the inertial intervals for small and medium-scale turbulence, the generalized scale invariance (GSI) of electrical turbulence can be observed. However, in some cases, GSI is absent, that may be due to turbulence intermittency and presence of electric coherent structures. The results of these studies can be used for future assessment of the role of charged subsystems in the formation of self-organizing, essentially inhomogeneous structure of wind flows in atmospheric vortices, in simulation of nonlinear dynamics using parameterization schemes that take into account the electrical subsystem of vortices, and to identify possible effects of various factors, for example, variations of cosmic rays on their dynamics. Obviously, it is of interest for monitoring TC including space-based sensing methods, for further development of experimental data processing methods, more complete and correct physical interpretation of processing results, development of new, robust methods to predict natural crisis phenomena and numerical simulation of the dynamics of intensive, large-scale vortices in the atmosphere taking into account helicity and presence of charged subsystems.

**Keywords:** charged subsystems of atmosphere, thunderstorm clouds, inertial range, turbulence, structure functions, intermittency, scaling, atmospheric vortices

## References

1. Anisimov S.V., Mareev E.A., Geofizicheskie issledovaniya global'noi elektricheskoi seti (Geophysical investigation of global electrical chain), *Fizika Zemli*, 2008, No. 10, pp. 8–18.
2. Artekha S.N., Belyan A.V., Erokhin N.S., Proyavleniya elektromagnitnykh yavlenii v atmosferykh protsessakh (Manifestations of electromagnetic phenomena in atmospheric processes), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 2, pp. 225–233.
3. Artekha S.N., Gol'braikh E., Erokhin N.S., O roli elektromagnitnykh vzaimodeistvii v dinamike moshchnykh atmosferykh vikhrei (On the role of electromagnetic interactions in the dynamics of powerful atmospheric vortices), *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki*, 2003, No. 4, pp. 94–99.
4. Artekha S.N., Erokhin N.S., O svyazi krupnomasshtabnykh vikhrevykh atmosferykh protsessov s elektromagnitnymi yavleniyami (On the connection of large-scale atmospheric vortex processes with electromagnetic phenomena), *Elektromagnitnye Yavleniya*, 2005, Vol. 5, No. 1(14), pp. 3–20.
5. Baibakov S.N., Martynov A.I., *S orbity sputnika - v glaz taifuna* (From a Sputnik Orbit into an Eye of Typhoon), Moscow: Nauka, 1986.
6. Bondur V.G., Pulinets S.A., Vozdeistvie mezomasshtabnykh atmosferykh vikhrevykh protsessov na verkhnyuyu atmosferu i ionosferu zemli (Impact of mesoscale atmospheric vortex processes on the upper atmosphere and ionosphere), *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, No. 3, pp. 3–11.
7. Bondur V. G., Pulinets S. A., Kim G. A., O roli variatsii galakticheskikh kosmicheskikh luchei v tropicheskom tsiklogeneze na primere uragana Katrina (On a role of galactic cosmic rays in the tropical cyclogenesis on the example of the Katrina hurricane), *Doklady akademii nauk, Geofizika*, 2008, Vol. 422, pp. 244–249.
8. Dobryshman E.M., Nekotorye statisticheskie kharakteristiki i osobennosti taifunov (Some statistical characteristics and peculiarities of typhoons), *Meteorologiya i Gidrologiya*, 1994, No. 11, pp. 83–99.
9. Erokhin N.S., Moiseev S.S., Nekotorye obshchie kharakteristiki i mekhanizmy razvitiya prirodnykh krizisnykh protsessov (Some general characteristics and mechanisms of natural crisis processes), In *Problemy geofiziki XXI veka* (Problems of geophysics of the 21st century), Moscow: Nauka, 2003, Vol. 1, pp. 160–182.

10. Lidvanskii A.S., Khaerdinov N.S., Statistika variatsii myuonov kosmicheskikh luchej vo vremya groz (Statistics of variations of cosmic ray muons during thunderstorms), *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya*, 2011, Vol. 75, No. 6, pp. 888–890.
11. Moiseev S.S., Chkhetiani O.G., Spiral'nyi skeiling v turbulentnosti (Spiral scaling in turbulence), *ZhETF*, 1996, Vol. 110, Issue 1(7), pp. 357–370.
12. Nerushev A.F., Ntreba S.N., Svirkunov P.N., Yaroshevich M.I., Generatsiya vozmushchenii geofizicheskikh polei pri evolyutsii tropicheskikh tsiklonov (Generation of Disturbances in Geophysical Fields during the Evolution of Tropical Cyclones), *DAN*, 1997, Vol. 354, No. 1, pp. 96–100.
13. Pulinets S.A., Khegai V.V., Boyarchuk K.A., Lomonosov A.M., Atmosfernoe elektricheskoe pole kak istochnik izmenchivosti ionosfery (Atmospheric electrical field as a source for the ionosphere variability), *Usp. fizich. nauk*, 1998, Vol. 41, pp. 515–522.
14. Khain A.P., Sutyurin G.G., *Tropicheskie tsiklony i ikh vzaimodeistvie s okeanom* (Tropical Cyclones and Their Interaction with the Ocean), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983.
15. Sharkov E.A., Aerokosmicheskie issledovaniya tropicheskikh tsiklonov (Aerospace studies of tropical cyclones), *Issledovaniya Zemli iz Kosmosa*, 1997, No. 6, pp. 87–111.
16. Anisimov S.V., Bakastov S.S., Mareev E.A., Spatiotemporal structures of electric field and space charge in the surface atmospheric layer, *Journal of Geophysical Research*, 1994, Vol. 99, pp. 10603–10610.
17. Anisimov S.V., Shikhova N.M., Intermittency of turbulent aeroelectric field, *Atmospheric Research*, 2014, Vol. 135–136, pp. 255–262.
18. Arteha S.N., Erokhin N.S., Electric Structures Influence on the Atmospheric Spiral Vortices Stability, *International Journal Unconventional Electromagnetics and Plasmas (UEP)*, 2009, Vol. 2, No. 1–2, pp. 3–8.
19. Arteha S.N., Belyan A.V., On the role of electromagnetic phenomena in some atmospheric processes, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2013, Vol. 20, pp. 293–304.
20. Branover H., Eidelman A., Golbaikh E., Moiseev S., *Turbulence and Structures. Chaos, Fluctuations and Self-organization in Nature and in the Laboratory*, San-Diego: Academic Press, 1998, 270 p.
21. Byrne G.J., Few A.A., Stewart M.F., Electric Field Measurement within a Severe Thunderstorm Anvil, *Journal of Geophysical Research*, 1989, Vol. 94 (D5), pp. 6297–6307.
22. Dubrulle B., Intermittency in fully developed turbulence: log-Poisson statistics and generalized scale covariance, *Physical Review Letters*, 1994, Vol. 73, pp. 959–967.
23. Hegai V.V., Kim V.P., Illich-Svitych P.V., The formation of a cavity in the night-time midlatitude ionospheric E-region above a thundercloud, *Planet. Space Sci.*, 1990, Vol. 38, pp. 703–707.
24. Horbury T.S., Balogh A., Structure function measurements of the intermittent MHD turbulent cascade, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 1997, Vol. 4, No. 3, pp. 185–199.
25. Kazimirovsky E., Herraiz M., De La Morena B.A., Effects on the ionosphere due to phenomena occurring below it, *Surveys in Geophys.*, 2003, Vol. 24, pp. 139–184.
26. Khaerdinov N.S., Lidvansky A.S., Petkov V.B., Electric field of thunderclouds and cosmic rays: evidence for acceleration of particles (runaway electrons), *Atmospheric Research*, 2005, Vol. 76, Issue 1–4, pp. 346–354.
27. Lazarev A.A., Moiseev S.S., *Geophysical Precursors of Early Stages of Cyclogenesis*, Preprint IKI RAS, Pr –1844, 1990, 13 p.
28. Leary L.A., Ritchie E.A., Lightning Flash Rates as an Indicator of Tropical Cyclone Genesis in the Eastern North Pacific, *Month. Weather Rev.*, 2009, Vol. 137(10), pp. 3456–3470.
29. Litvinenko L.N., Ryabov V.B., Usik P.V., *Correlation Dimension. The New Tool in Astrophysics*, Preprint No 64, Kharkov: Institute of radio astronomy, academy of sciences of Ukraine, 1992, 53 p.
30. Marsh E., Tu C.Y., Intermittency, non-Gaussian statistics and fractal scaling of MHD fluctuations, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 1997, Vol. 4, No. 1, pp. 101–124.
31. Marshak A., Davies A., Wiscombe W., Cahalan R., Scale-invariance of liquid water distribution in marine stratocumulus. Part II. Multifractal properties and intermittency issues, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1997, Vol. 54, No. 11, pp. 1423–1444.
32. Marshall T.C., Rust W.D., Electrical structures and updrafts speeds in thunderstorms over the southern great-plains, *Journal of Geophysical Research*, 1995, Vol. 100 (D1), pp. 1001–1015.
33. Merrill R.T., A Comparison of Large and Small Tropical Cyclones, *Mon. Weather Rev.*, 1984, Vol. 112, pp. 1408–1418.
34. Osborne A.R., Provenzale A., Finite correlation dimension for stochastic systems with power-law spectra, *Physica D*, 1989, Vol. 35, No. 2, pp. 357–381.
35. Price C., Asfur M., Yair Yo., Maximum hurricane intensity preceded by increase in lightning frequency, *Nature Geosci.*, 2009, Vol. 2(5), pp. 329–332.
36. Rodgers E.B., Stout J., Steranka J., Chang S.W., Tropical cyclone-upper atmospheric interaction as inferred from satellite total ozone observations, *J. Appl. Meteorol.*, 1990, Vol. 29(9), pp. 934–957.
37. Rycroft M.J., Israelsson S., Price C., The global atmospheric circuit, solar activity and climate change, *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.*, 2000, Vol. 62, pp. 1563–1576.
38. Schertzer D., Lovejoy S., Schmitt F., Chigirinskaya Y., Marsan D., Multifractal cascade dynamics and turbulent intermittency, *Fractals*, 1997, Vol. 5, No. 3, pp. 427–471.
39. Sorokin V.M., Chmyrev V.M., Yaschenko A.K., Electrodynamical model of the lower atmosphere and the ionosphere coupling, *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.*, 2001, Vol. 63, pp. 1681–1691.
40. Stozhkov Y.I., The role of cosmic rays in the atmospheric processes, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.*, 2003, Vol. 29, pp. 913–923.
41. Zadorozhny A.M., A.A. Tyutin A.A., Effects of geomagnetic activity on the mesospheric electric fields, *Annales Geophysicae*, 1998, Vol. 16, pp. 1544–1551.