

СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ГРОЗОВОЙ ОБЛАЧНОСТИ

Л.А. Михайловская, Н.С. Ерохин, И.А. Краснова, С.Н. Артеха

E-mail: sungirl8@mail.ru

Аннотация. Проведено обсуждение ранее выполненных работ по анализу структурных характеристик электрической турбулентности для различных условий в грозовой облачности (вертикальные профили электрического поля). Показано наличие двух инерционных интервалов в графиках структурных функций электрического поля (СФ), отмечена возможность обобщенной масштабной инвариантности электрической турбулентности для малых и средних масштабов. Имеющиеся отклонения графиков СФ от чисто степенных скейлингов могут быть обусловлены перемежаемостью турбулентности и присутствием когерентных структур среднего масштаба. Рассмотрены также скейлинговые экспоненты, индекс Херста, куртозис и асимметрия вариаций электрического поля (skewness).

1. Введение и результаты анализа

Анализ механизмов генерации спиральных движений в приложении к атмосферным вихрям типа ураганов, показывает, что для корректного описания этого процесса нужно учитывать вклад заряженных подсистем грозовых облаков в формирование самосогласованной, неоднородной структуры ветров в ТЦ и в их последующую динамику (см. [1-2]). Экспериментальные данные по электрическому полю $E_z(z)$ в грозовой облачности указывают на присутствие сильных электрических флуктуаций с типичными размерами по высоте (20÷500) м, электрическими полями (10-10²) кВ/м. Для корректных оценок вклада заряженных подсистем в генерацию спиральных движений атмосферы, развития схем параметризации уравнений гидродинамики с учетом заряженных подсистем нужно изучать параметры электрических флуктуаций по характеристикам структурных функций $S_m(L)$, где $L = z_1 - z_2$ разность высот двух атмосферных слоев, наличие инерционных интервалов, где $S_m(L) \sim L^{g(m)}$, $g(m)$ скейлинговая экспонента. Это рассматривалось ранее для ряда данных. В настоящей работе

суммированы выводы из предыдущих работ по характеристикам электрической турбулентности в грозовой облачности.

Основные характеристики функций $S_m(L)$ для поля E_z в грозовых облаках включают стандартное отклонение для вариаций $E_z(z)$, скейлинговые экспоненты $g(m)$ в инерционных интервалах, куртозис $K(L) = S_4(L)/[S_2(L)]^2$, индекс Херста H и асимметрию вариаций поля (skewness). Индекс Херста для E_z характеризует трендоустойчивость профиля, а куртозис определяет присутствие перемежаемости. Параметр skewness связан с асимметрией вариаций $E_z(z)$. На скейлинг СФ, как показано ранее, влияет и присутствие в турбулентности когерентных структур. Приведем ряд высотных профилей $E_z(z)$, изученных ранее. Они даны на рис.1.

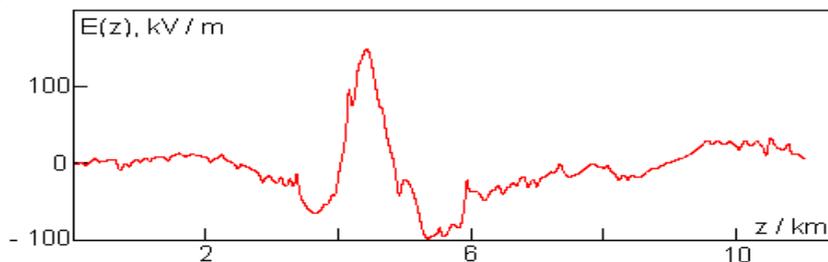


Рис.1а.

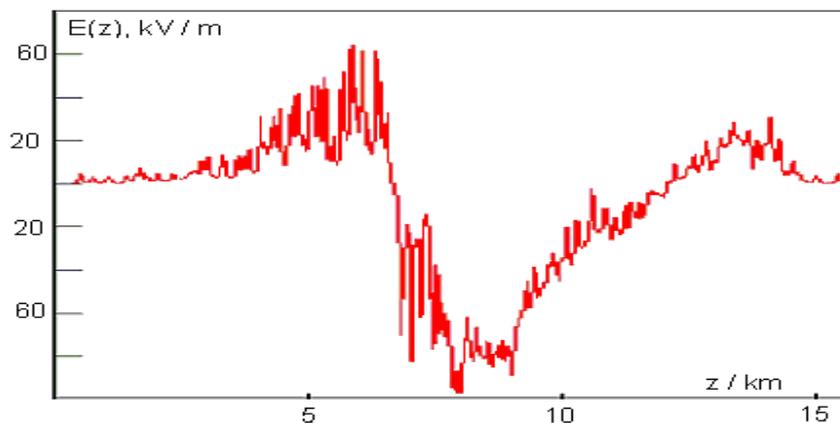


Рис.1б.

Как видно из рис.1, высотное распределение $E_z(z)$, типичные напряженности весьма переменны в зависимости от времени и места измерения. Следует отметить, что помимо связи с метеорологическими процессами в атмосфере электрические

подсистемы грозовой облачности могут обуславливать вариации потока вторичных космических лучей (мюонов, электронов и др.) в нижней мезосфере. Возможны корреляции $E_z(z)$ с геомагнитной активностью, в частности, солнечными протонными событиями. Поэтому особенности динамики атмосферы, обусловленные электрическими подсистемами облачности, могут быть выявлены путем исследования вариаций потока вторичных космических лучей во время гроз.

Приведем полученные ранее типичные графики зависимости $S_m(n)$ от безразмерной разницы высот двух слоев $n = 500 (z_1 - z_2) / \text{km}$ для порядков $m = 1, 1.5, 2$, показанные ниже на рис.2а.

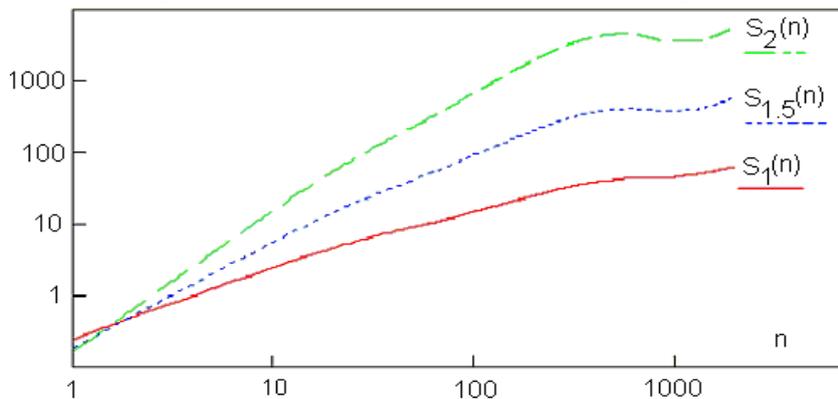


Рис.2а.

Детальный анализ рис.2а показал, что имеются два инерционных интервала электрической турбулентности на малых и средних масштабах. В инерционных интервалах скейлинговые экспоненты $g_1(m)$ для малых (десятки метров) и $g_2(m)$ для средних (сотни метров) масштабов зависят от времени и места измерений. Так в одном случае было $g_1(m) \approx 0.943$ m, $g_2(m) \approx 0.614$ m. В другом измерении для диапазона высот $0.24 < z / \text{км} < 11.248$, расчеты СФ дали $g_1(m) \approx 0.973$ m, $g_2(m) \approx 0.785$ m – 0.014 m^2 . т.е. за счет присутствия перемежаемости и когерентных структур на средних масштабах скейлинговая экспонента $g_2(m)$ имеет нелинейную аппроксимацию. Аналогичное поведение в этой выборке имеют СФ других порядков. Для $m = 3, 4, 5$ графики $S_m(n)$ даны на рис.2б.

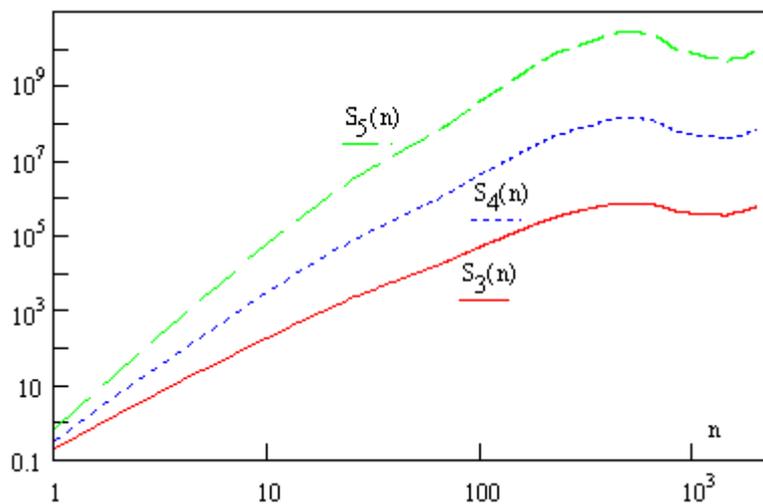


Рис.26.

Приведем профиль поля для области высот $0.194 < z / \text{км} < 13.136$. Он представлен на рис.3 и имеет большую перемежаемость.

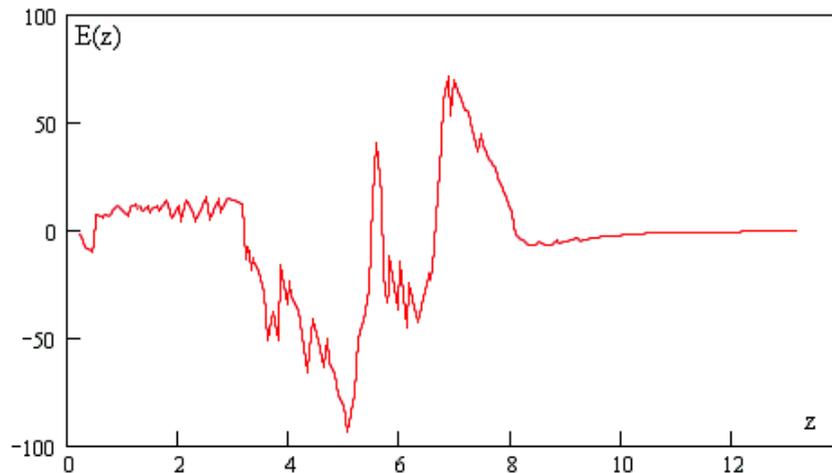


Рис.3.

Для выборки на рис.3 расчеты дают следующие значения параметров электрической турбулентности. Напряженности поля равны $\max E_z \approx 71.47 \text{ кВ/м}$ при $z = 6.84 \text{ км}$, $\min E_z \approx -93.48 \text{ кВ/м}$ при $z = 5.04 \text{ км}$. Среднее значение электрического поля $\langle E(z) \rangle \equiv$

E_{av} и стандартное отклонение σ в рассматриваемом диапазоне высот равны соответственно $E_{av} \approx -4.86$ кВ/м, $\sigma \approx 27.198$ кВ/м, где $\sigma^2 = \langle (E(z) - E_{av})^2 \rangle$. Из рис.3 следует, что электрическое поле и, в особенности, объёмная плотность электрического заряда имеют в грозовой облачности сильные флуктуации по высоте.

Рассмотрим другие параметры турбулентности: асимметрию распределения флуктуаций (skewness) Sk и куртозис K_1 используя формулы $Sk = \langle (E(z) - E_{av})^3 / \sigma^3 \rangle$, $K_1 = \langle (E(z) - E_{av})^4 / \sigma^4 \rangle$. Для нормального распределения флуктуирующей величины параметр Sk равен нулю, а $K_1 = 3$. Поскольку Sk отрицательно для исследуемой выборки левый хвост распределения электрического поля по величине (относительно центральной точки) длиннее правого хвоста. Для куртозиса получаем $K_1 \approx 4.548$, т.е. эксцесс $(K_1 - 3)$ положителен. Значит, распределение электрического поля по величине имеет хорошо выраженный пик, и в электрической турбулентности присутствует перемежаемость.

Обсудим обобщенную масштабную инвариантности (ОМИ) для анализируемой выборки электрического поля. Расчеты $S_m(n)$ дают два инерционных интервала для электрической турбулентности: на малых масштабах $n < 26$ и на средних масштабах $25 < n < 995$, где наблюдается степенной скейлинг структурных функций (СФ).

Анализ показал, что если $g(m)$ может быть аппроксимирована в инерционных интервалах линейной функцией типа $g(m) \approx \beta m$, то для электрической турбулентности имеет место обобщенная масштабная инвариантность вида $S_m(n) \approx A_m [S_3(n) / A_3]^m / 3$ для обоих инерционных интервалов с разными значениями параметра β в каждом инерционном интервале. Более детальный анализ показывает, что на средних масштабах имеются отклонения от ОМИ, которые возрастают с увеличением порядка структурной функции m . Это обусловлено наличием выше перемежаемости электрической турбулентности и присутствием когерентных структур. Подтверждением перемежаемости является график функции $K_2(n) = S_4(n) / [S_2(n)]^2$, которая существенно меняется в инерционных интервалах для данной выборки. Это означает, что исследуемая выборка для профиля электрического поля в грозовой облачности имеет сильную перемежаемость электрической турбулентности по высоте. Рассчитанные величины параметров асимметрии функции распределения поля, куртозиса,

индекса Херста подтверждают эти выводы. Кроме того из анализа этих параметров следует, что данная выборка более трендоустойчива в инерционном интервале малых масштабов, а на средних масштабах она сильно зашумлена.

Результаты проведенного анализа представляют интерес для исследований влияния заряженных подсистем мощных атмосферных вихрей типа ТЦ на генерацию гидродинамической спиральности атмосферы, формирование неоднородной, самосогласованной структуры ветровых потоков и возникновение обратного каскада энергии с усилением синоптических возмущений. Так процессы ионизации повышают тепловыделение в облачности и могут приводить к формированию тепловых башен в тайфунах с высокой грозовой активностью, а также порождать за счёт сильных электрических полей неоднородности в ионосфере [3]. Отметим, что нелинейная динамика вихрей типа ТЦ ранее обсуждалась, например, в [4-6].

Литература

- [1]. S.N.Arteha, E.Golbraikh, N.S.Erokhin. Problems of Atomic Science and Technique. 2003, № 4, p.94.
- [2]. С.Н.Артеха, Н.С.Ерохин. Электромагнитные явления. 2005, т.5, № 1(14), с.3.
- [3]. В.Г.Бондур, С.А.Пулинец. Исследования Земли из космоса. 2012, № 3, с.3.
- [4]. T.C.Marshall, W.D.Rust. Journal of Geophysical Research. 1995, v.100, p.1001.
- [5]. A.Marshak, A.Davies, W.Wiscombe et al., Journal of Atmospheric Sciences. 1997, v.54, No 11, p.1423.
- [6]. E.Marsh, C.Y.Tu. Nonlinear Processes in Geophysics. 1997, v.4, No 1, p.101.