

Анализ структурных свойств электрической турбулентности в грозовой облачности

Н.С. Ерохин ¹, Н.Н. Зольникова ¹, И.А. Краснова ², Л.А. Михайловская ¹

¹Институт космических исследований РАН,
117997, Москва, Профсоюзная, 84/32
E-mail: nerokhin@iki.rssi.ru;

²Российский университет дружбы народов,
115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д.3
E-mail: sungirl8@mail.ru

Проведен численный анализ структурных функций $S_m(L)$ электрической турбулентности в грозовой облачности на основе имеющихся в литературе экспериментальных данных по измерению высотного профиля вертикальной компоненты электрического поля $E(z)$ в области высот до 13 км. Проведена оцифровка экспериментальных профилей, с использованием системы локализованных по высоте функций. Для рассматриваемой конкретной выборки $E(z)$ разработана аналитическая аппроксимация $E_a(z)$. Для различных значений порядка структурной функции m в диапазоне $0,1 \leq m \leq 7$ вычислены $S_m(L)$ с достаточно малым шагом по высоте $\delta z = 1$ м. Построены графики структурных функций (СФ), выявлены два инерционных интервала (малые и средние масштабы L), в которых имеются степенные скейлинги СФ электрической турбулентности. В инерционных интервалах определены скейлинговые экспоненты $g(m)$, существенно отличающиеся от колмогоровского $g_k(m) = m/3$ и спирального $g_h(m) = 2m/3$ скейлингов для однородной, изотропной, гидродинамической турбулентности. В интервале средних масштабов возможно присутствие когерентных структур, влияющих на скейлинговые экспоненты $g(m)$, и перемежаемости. Результаты анализа представляют интерес для последующих исследований вклада заряженных подсистем мощных атмосферных вихрей в генерацию гидродинамической спиральности $H = \nabla \text{rot } V$ и формирование неоднородной, самосогласованной, долгоживущей структуры ветровых потоков в вихре.

Ключевые слова: структурные функции, инерционные интервалы, электрическая турбулентность, скейлинговые экспоненты, грозовая облачность, когерентные структуры, высотные распределения.

Постановка задачи и результаты численных расчетов

Как известно, наличие гидродинамической спиральности $H = \mathbf{v} \cdot \text{rot } \mathbf{v}$ в атмосферных вихрях и плазме повышает их устойчивость к возмущениям и увеличивает время существования (см., например, Lazarev, Moiseev, 1990; Моисеев, Чхетиани, 1996; Branover et al., 1998; Ерохин, Моисеев, 2003). Кроме того, спиральность H способствует возникновению обратного каскада энергии (от малых масштабов в крупные) и в результате возможно, например, усиление слабых синоптических возмущений до уровня мощных тропических циклонов (ТЦ). Исследование возможных механизмов генерации спиральных движений в приложении к ТЦ показывает, что для корректного описания этого процесса необходимо учитывать вклад заряженных подсистем грозовых облачных систем как в формирование самосогласованной, неоднородной структуры ветровых потоков, так и в последующую нелинейную динамику вихрей (см., в частности, Arthea et al., 2003). Имеющиеся в литературе экспериментальные данные о вертикальных профилях электрического поля $E_z(z)$ в грозовой облачности (см., например, Burne, Few, 1989; Marshall, Rust, 1995; Marshak, et al., 1997) указывают на присутствие сильных электрических флуктуаций с типичными размерами $(10 \div 500)$ м и напряженностями поля $E_z(z)$ порядка 105 В/м и более. Следовательно, для корректных оценок вклада заряженных подсистем в генерацию спиральных

движений атмосферы необходимо изучать параметры электрических флуктуаций, в частности, исследовать свойства структурных функций $S_m(L)$, где $L = z_1 - z_2$ разность высот двух атмосферных слоев (сдвиг).

В данной работе используя стандартные методы анализа гидродинамической турбулентности (Osborne, Provenzale, 1989; Litvinenko et al., 1992; Branover et al., 1998; Ерохин, Моисеев, 2003; Marsh, Tu, 1997; Horbury, Balogh, 1997; Schertzer et al., 1997) детально рассмотрены свойства структурных функций $S_m(L)$ для электрического поля $E_z(z)$ в грозовой облачности. Основой для анализа являются экспериментальные графики вертикального поля $E_z(z)$ для области высот z ниже 14 км. Используются оцифровка этих графиков и аналитические аппроксимации $E_a(z)$ в классе локализованных функций типа $b_n(z) = a_n / [1 + k_n^2 (z - z_n)^2]$ с параметрами a_n , k_n и z_n . В результате получается выборка $E_i = E_a(z_i)$. Графики экспериментальной выборки $E(z)$ и аналитической аппроксимации $E_a(z)$ даны на рис. 1. Как видим, с учетом погрешностей измерений имеется хорошее согласование этих профилей.

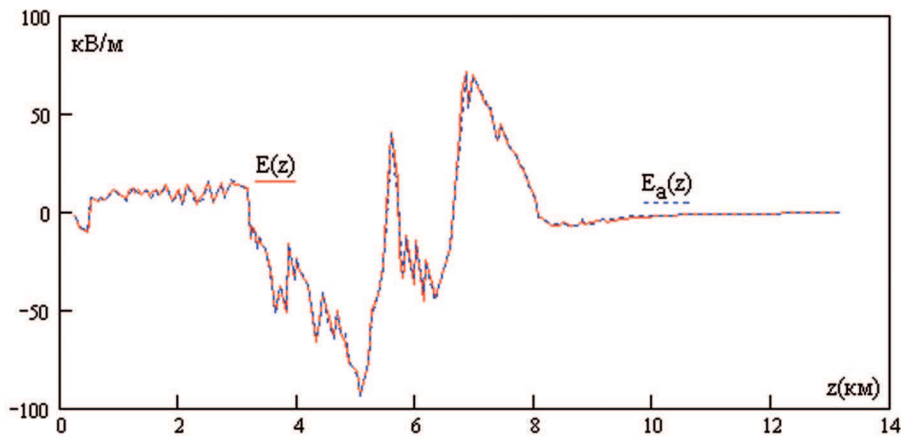


Рис.1. Графики высотных профилей экспериментальной выборки $E(z)$ и ее аналитической аппроксимации $E_a(z)$. Поле измеряется в кВ/м, высота z в км

Затем численно вычисляются структурные функции $S_m(L)$ порядка m по формуле $S_m(L) = \langle |E_a(z_i + L) - E_a(z_i)|^m \rangle$, где $z_i = b \cdot i$, с малым шагом по высоте ($b = 1$ метр) для интервала $z < h$, причем $1 \leq i \leq N$, $N = h / b$, а пространственное усреднение проводится в области $0 < z < h - L$. Как обычно полагается, что $b < L < h / 3$.

Зависимость $S_m(L)$ от масштаба L для различных значений порядка m представляется на графиках в \lg - \lg координатах, которые показывают наличие в электрической турбулентности двух инерционных интервалов с линейной зависимостью $\lg S_m(L)$ от $\lg L$. Следовательно, в инерционных интервалах наблюдаются степенные скейлинги вида $S_m(L) \sim L^{g(m)}$, где $g(m)$ скейлинговая экспонента. Для $m = 1$ получаем индекс Херста $H = g(1)$, а индекс спектра мощности турбулентных флуктуаций α выражается через $g(2)$ и равен $\alpha = 1 + g(2)$.

Экспериментальные данные по высотным профилям электрического поля взяты из работ (Вурне, Few, 1989; Marshall, Rust, 1995). Аналитическая аппроксимация поля $E(z)$ содержит сумму локализованных функций $m(z)$ вида: $E_a(z) = \sum_n r_n$, где $r_n(z) = \sum_j b_{nj}$, $b_{nj}(z) = a_{nj} / [1 + k_{nj}^2 \cdot (z - z_{nj})^2]$. Здесь коэффициенты a_{nj} и высота z измеряются соответственно в кВ/м и км. Для упрощения записи $S_m(L)$ вводим положение i -слоя $z_i(\text{км}) = 0.194 + 0.001 \cdot (i - 1)$, где $i = 1, 2 \dots N$, $N = 12921$. Таким образом $L_n(\text{км}) = 0.001 \cdot n$, где $n = 1, 2 \dots 4311$. В резуль-

тате имеем $S_m(L) = S_m(n)$, $E(z_i) = E_i$, а структурная функция $S_m(n)$ записывается выражением $S_m(n) = \sum_i |E_i - E_{i+n}|^m / (N - n)$. Графики структурных функций $S_m(n)$ приводим как их зависимости от безразмерного сдвига по высоте $n = L / m$. Следует отметить, что в данной работе структурные функции вычисляются с более высоким разрешением по высоте (2 метра), что существенно увеличивает длину выборки и улучшает статистику расчетов.

На рис. 2а в lg-lg координатах представлены $S_m(n)$ для малых значений порядка структурных функций $m = 0,1; 0,3; 0,6$. Как видим, в случае $m = 0,1$ график весьма близок (lg-lg координатах) к линейной зависимости $\lg S_{0.1}(n) \sim 0,1 \cdot \lg n$. Более точно: на малых масштабах $L < 50$ м для скейлинговой экспоненты $g_1(m)$ имеем $g_1 = 0,1$, а на средних и больших масштабах $50 \text{ м} < L < 4,314 \text{ км}$ получается $g_2 = 0,09$. Отметим, что для $m = 0,3; 0,6$ достаточно четко видны два инерционных интервала причем в первом случае на малых масштабах имеем $g_1(0,3) \approx 0,3$, а на средних $g_2(0,3) \approx 0,24$. Во втором случае получаем на малых масштабах $g_1(0,6) \approx 0,6$, на средних $g_2(0,6) \approx 0,39$. В обоих случаях более детальный анализ выявляет наличие на средних масштабах заметных отклонений от степенного скейлинга, что может быть связано с присутствием когерентных структур и перемежаемостью электрической турбулентности. Перемежаемость электрической турбулентности в облачности проявляется уже на высотных профилях электрического поля, приведенных на рис. 1. Для больших значений порядка структурных функций $m = 3, 4, 5$ графики $S_m(n)$ даны на рис. 2б. При этом в инерционном интервале на малых масштабах для скейлинговых экспонент имеем $g_1(3) \approx 2,95$, $g_1(4) \approx 3,95$, $g_1(5) \approx 4,9$, а на средних получается $g_2(3) \approx 1,9$, $g_2(4) \approx 2,5$, $g_2(5) \approx 3,2$. Отметим также насыщение роста структурных функций (для больших m) в области масштабов $L > 560$ м. Кроме того для больших m верхняя граница инерционного интервала на малых масштабах заметно понизилась.

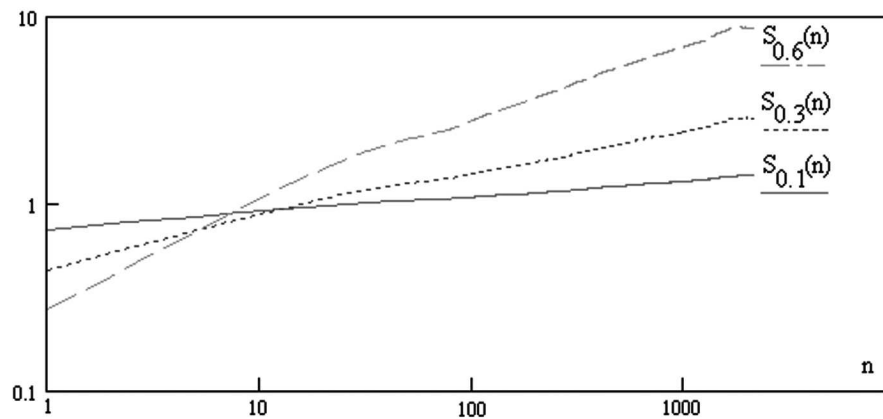


Рис.2а. Графики структурных функций для малых значений порядка $m = 0.1, m = 0.3, m = 0.6$

Тенденции насыщения роста структурных функций и понижения границ инерционных интервалов наблюдаются и при больших значениях порядка m . В качестве иллюстрации на рис. 2в показаны графики структурной функции $S_6(n)$ и ее степенных аппроксимаций $V_6(n) \sim n^{5.9}$ на малых и $R_6(n) \sim n^{3.8}$ на средних масштабах. Здесь также видны заметные отклонения структурной функции от степенного скейлинга на средних масштабах и насыщение ее роста для $L > 560$ м.

С учетом результатов проведенных численных расчетов и изложенного выше поведения структурных функций $S_m(n)$ в инерционных интервалах можно дать для рассматри-

ваемого высотного профиля вертикального электрического поля следующие аналитические аппроксимации скейлинговых экспонент в инерционных интервалах: $g_1(m) \approx 0,983 \cdot m$, $g_2(m) \approx 0,633 \cdot m$. При этом индекс спектра мощности флуктуаций электрического поля для малых масштабов равен $\alpha_1 \approx 3$, а для средних масштабов он будет меньше $\alpha_2 \approx 2,2$. Это значительно отличается от колмогоровского скейлинга, но для средних масштабов близко к спиральному скейлингу. Таким образом выполненный в настоящей работе анализ с повышенным пространственным разрешением структурных функций $S_m(n)$ в грозовой облачности существенно дополняет ранее опубликованные выводы по характеристикам $S_m(n)$ (Краснова, Ерохин, 2010).

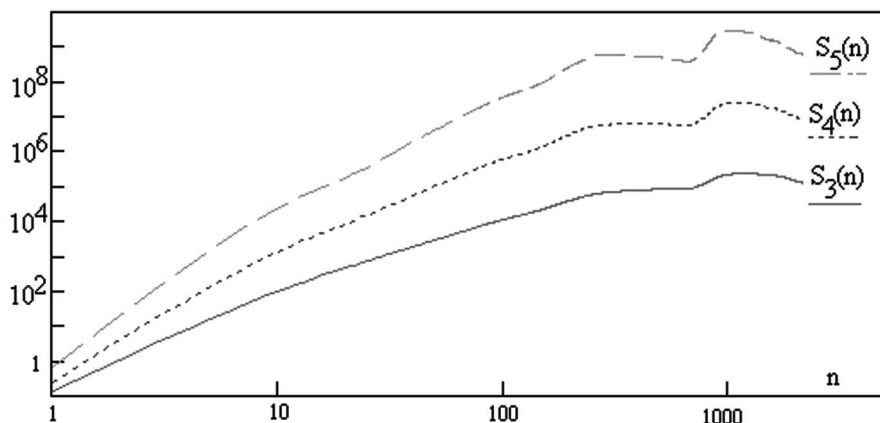


Рис.26. Графики структурных функций для больших значений порядка $m = 3, m = 4, m = 5$

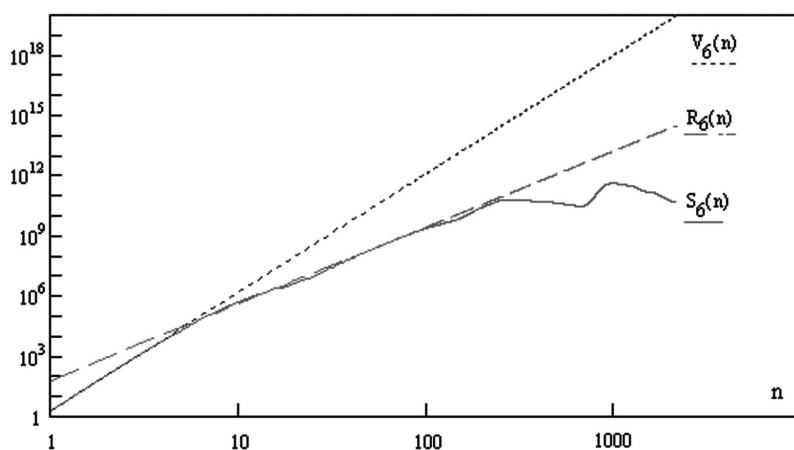


Рис.2в. Графики структурной функции и ее степенных аппроксимаций в инерционных интервалах для порядка $m = 6$

Для выяснения причин отклонений на средних масштабах структурных функций от степенного скейлинга проведено моделирование электрической турбулентности с двумя инерционными интервалами с учетом присутствия когерентных структур. Выполненный анализ показывает, что присутствие локализованных когерентных структур (КС) может модифицировать структурные функции, в частности, на графиках $S_m(n)$ в lg-lg масштабе будут меняться средние наклоны кривых. Расчеты также показывают, что при наличии КС на малых масштабах может возрастать автокорреляционная функция сигнала. Вклад КС наиболее существенен на масштабах порядка характерного размера КС.

Заключение

Изложенные в настоящей работе результаты можно сформулировать следующим образом. На основе экспериментальные данные по высотному профилю электрического поля в грозовой облачности исследованы характеристики структурных функций $S_m(n)$ электрических флуктуаций с повышенным пространственным разрешением. Выявлены инерционные интервалы электрической турбулентности на малых и средних масштабах, в которых наблюдаются степенные скейлинги $S_m(n)$, методом аппроксимации $S_m(n)$ определены скейлинговые экспоненты $g(m)$, отличающиеся от колмогоровского и спирального скейлингов. Проведенное исследование структурных функций $S_m(n)$ указывает на присутствие локализованных электрических когерентных структур в заряженных подсистемах атмосферной облачности. Это согласуется с результатами моделирования электрической турбулентности, имеющей степенной спектр, при добавлении в выборку когерентных структур умеренной амплитуды на средних масштабах. Кроме того могут проявляться эффекты перемежаемости электрической турбулентности, учет которой на основе аналитической модели является предметом последующей работы.

Выполненное исследование представляет интерес, в частности, для разработки упрощенных физико-математических моделей интенсивных вихрей типа тайфунов, дальнейшего развития схем параметризации при численных расчетах пространственно-временной динамики ураганов с включением эффектов влияния заряженных подсистем на нелинейную эволюцию мощного вихря. Кроме того, это также важно для развития современных методик обработки данных дистанционного зондирования атмосферных вихрей, более полной и корректной физической интерпретации результатов этой обработки, для разработки новых, методов прогнозирования кризисных атмосферных явлений. Проведенный анализ улучшает имеющиеся представления о структурных характеристиках электрических вариаций в заряженных подсистемах интенсивных атмосферных вихрей.

Настоящая работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 07-05-00060) и программы ОФН-11 РАН.

Литература

1. *Ерохин Н.С., Моисеев С.С.* (2003) Проблемы геофизики XXI века". М.: Наука, 2003. Т. 1. С. 160.
2. *Краснова И.А., Ерохин Н.С.* (2010) Анализ структурных характеристик электрического поля в грозовой облачности // XLVI Всероссийская конференция по проблемам математики, информатики, физики и химии, Москва, РУДН, Тезисы докладов, 2010. С. 17.
3. *Моисеев С.С., Чхетиани О.Г.* (1996) // ЖЭТФ, 1996. Т. 110. Вып. 1(7), С. 357.
4. *Arteha S.N., Golbraikh E., Erokhin N.S.* (2003) // Problems of Atomic Science and Technique, 2003. № 4. P. 94.
5. *Branover H, Eidelman A., Golbraikh E. and Moiseev S.* (1998) Turbulence and Structures. Chaos, Fluctuations and Self-organization in Nature and in the Laboratory, San-Diego, Academic Press, 1998, – 270 p.
6. *Byrne G.J., Few A.A. and Stewart M.F.* (1989) // Journal of Geophysical Research, 1989. V. 94. № D5. P. 6297.
7. *Horbury T.S., Balogh A.* (1997) // Nonlinear Processes in Geophysics, 1997. V. 4, № 3. P. 185.
8. *Lazarev A.A., Moiseev S.S.* (1990) Geophysical Precursors of Early Stages of Cyclogenesis. – Preprint IKI RAS, Pr – 1844, 1990.
9. *Litvinenko L.N., Ryabov V.B., Usik P.V. et al.* (1992) Correlation Dimension: The New Tool in

- Astrophysics. – Institute of Radio Astronomy, Academy of Sciences of Ukraine, Preprint No 64, Kharkov, 1992, – 53 p.
10. Marsh E., Tu C.Y. (1997) // Nonlinear Processes in Geophysics, 1997. V. 4. № 1. P. 101.
 11. Marshak A., Davies A., Wiscombe W. et al. (1997) // Journal of Atmospheric Sciences, 1997. V. 54, № 11. P. 1423.
 12. Marshall T.C. and Rust W.D. (1995) // Journal of Geophysical Research, 1995. V. 100. P. 1001.
 13. Osborne A.R., Provenzale A. (1989) // Physica D, 1989. V. 35. № 2. P. 357.
 14. Schertzer D., Lovejoy S., Schmitt F. et al. (1996) // Fractals, 1997. V.5, № 3. P. 427.

The analysis of structure properties of electric turbulence in thunderstorm clouds

N.S. Erokhin ¹, N.N. Zolnikova ¹, I.A. Krasnova ², L.A. Mikhailovskaya ¹

¹Space Research Institute of RAS
117997, Moscow, 84/32, Profsoyuznaya str.
² People Friendship University of Russia
115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д.3,
E-mail: nerokhin@iki.rssi.ru

It has been performed the numerical analysis of structure functions $S_m(L)$ for an electric turbulence in thunderclouds by usage of experimental data on altitude profile of the electric field vertical component $E(z)$ in the height range up to 13 km. Digitization of the experimental plots and development of analytical approximations $E_a(z)$ for the electric field $E(z)$ in thunderstorm clouds in a class of localized functions were made. Numerical calculations of the structure functions $S_m(L)$ for the orders m in the range $0.1 \leq m \leq 7$ were performed with small enough step in the altitude $\delta z = 1$ m. Plots of $S_m(L)$ have been obtained and inertial intervals (where power law degree dependence of $S_m(L)$ is observing) of electric turbulence were detected in the small scales range and the middle scale one. Scaling exponents $g(m)$ for inertial intervals were determined which are significantly differ from the Kolmogorov scaling $g_k(m) = m / 3$ and the helical one $g_h(m) = 2 m / 3$ in the homogeneous, isotropic hydrodynamical turbulence. It is established that $S_m(L)$ behaviour may be explained by presence in middle scale range of intermittency and coherent structures which influence on scaling exponents $g(m)$. Results obtained are of the great interest for following investigations of intense atmospheric vortices charged subsystems contribution to the hydrodynamical helicity $H = \mathbf{V} \text{ rot } \mathbf{V}$ generation and to the development of inhomogeneous, self-consistent wind structure in the vortice.

Keywords: structure functions, inertial intervals, electric turbulence, scaling exponents, thunderstorm clouds, coherent structures, altitude distributions.