

Структурные характеристики электрической турбулентности при вертикальном профиле электрического поля с сильным всплеском

Л.А. Михайловская¹, Н.С. Ерохин^{1,2}, И.А. Краснова², С.Н. Артёха¹

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
E-mail: nerokhin@mx.iki.rssi.ru

²Российский университет дружбы народов, Москва, Россия
E-mail: sungirl8@mail.ru

Как известно, в грозовой облачности имеются заряженные подсистемы, создающие большие напряжённости электрического поля порядка 100 кВ/м. Такие поля могут способствовать генерации интенсивных ветровых потоков в атмосфере и усилению слабых вихрей. Поэтому для корректного описания роли заряженных подсистем в формировании и последующей динамике атмосферного вихря необходим анализ структурных характеристик электрических полей в грозовой облачности. В работе на основе экспериментальных данных проведён анализ структурных функций электрической турбулентности $S_m(L)$ в случае большого всплеска вертикального профиля электрического поля $E_z(z)$ грозовой облачности на высотах $z < 12$ км. Исследованы инерционные интервалы электрической турбулентности, получены скейлинговые экспоненты, величины индекса Херста и куртозиса в них. В инерционных интервалах выявлены отклонения структурных функций $S_m(L)$ от степенного скейлинга. Анализ показал, что для интервалов малых и средних масштабов не выполняется обобщённая масштабная инвариантность электрической турбулентности, что может быть связано с перемежаемостью электрической турбулентности, присутствием когерентных электрических структур. Полученные результаты могут быть использованы для последующих оценок роли заряженных подсистем в формировании самосогласованной, существенно неоднородной структуры ветровых потоков в атмосферных вихрях, моделировании их нелинейной динамики с использованием схем параметризации, учитывающих электрические подсистемы вихрей, а также для выявления возможности воздействия на их динамику. Кроме того, это представляет интерес для дальнейшего развития методик обработки данных дистанционного зондирования атмосферных вихрей, более полной и корректной физической интерпретации результатов обработки экспериментальных данных.

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

Введение

Ранее было показано (см., например, работы (Lazarev, Moiseev, 1990), (Моисеев, Чхетиани, 1996), (Branover et al., 1998), (Ерохин, Моисеев, 2003)), что наличие спиральности $\mathbf{H} = \mathbf{v} \text{ rot } \mathbf{v}$ в интенсивных атмосферных вихрях и в плазме может повышать устойчивость ветровых структур и увеличивать время их существования. Кроме того, было установлено, что спиральность может способствовать возникновению нелинейного обратного каскада энергии от малых масштабов в крупные. В результате, можно ожидать, например, реализации одного из механизмов усиления слабых синоптических возмущений до уровня мощных тропических циклонов (ТЦ). Имеющиеся работы по анализу возможных механизмов генерации спиральных движений в приложении к атмосферным вихрям показывают, что для корректного описания этого процесса необходимо учитывать вклад заряженных подсистем грозовых облаков в формирование самосогласованной,

существенно неоднородной структуры ветровых потоков, а также в их последующую нелинейную динамику (см., например, (Артеха, Гольбрайх, Ерохин, 2003), (Артеха, Ерохин, 2005)). Представленные в литературе экспериментальные данные о вертикальных профилях электрического поля $E_z(z)$ в грозовой облачности (см., например, (Byrne, Few, Stewart, 1989), (Marshall, Rust, 1995), (Marshall et al., 1997)) указывают на присутствие достаточно сильных электрических флуктуаций с типичными размерами по высоте (20 - 800) м и напряжённостями электрического поля порядка (10-100) кВ/м.

Для корректных оценок вклада заряженных подсистем в генерацию спиральных движений атмосферы, развития схем параметризации гидродинамических уравнений с учётом 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 слоёв, наличие инерционных интервалов, в которых выполняется степенной скейлинг вида $S_m(L) \sim L^{g(m)}$, где $g(m)$ - скейлинговая экспонента.

В данной работе, используя стандартные подходы в исследовании гидродинамической турбулентности (Branover et al., 1998), (Ерохин, Моисеев, 2003), (Osborne, Provenzale, 1989), (Litvinenko et al., 1992), (Marsh, Tu, 1997), (Schertzer et al., 1997), (Horbury, Balogh, 1997), на основе экспериментального графика поля $E_z(z)$ для высот $z < 12$ 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). Следует указать, 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 нелинейную зависимость от m . В рассмотренной выборке на малых и средних масштабах имеются инерционные интервалы, в которых возможна аппроксимация $S_m(L) \sim L^{g(m)}$, а имеющиеся малые отклонения могут быть связаны с перемежаемостью.

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 и, кроме того, корреляцию поля $E_z(z)$ с геомагнитной активностью, в частности, с солнечными протонными событиями (см., например, (Khaerdinov, Lidvansky, Petkov, 2005), (Лидванский, Хаердинов, 2011), (Zadorozhny, Tyutin, 1998)). Поэтому особенности динамики атмосферы, обусловленные электрическими подсистемами

облачности, могут быть выявлены путём исследования вариаций потока вторичных космических лучей во время гроз.

Исходные данные, анализ структурных функций электрической турбулентности

Используя стандартные подходы в исследовании гидродинамической турбулентности (Branover et al., 1998), (Ерохин, Моисеев, 2003), (Marshak et al., 1997), (Osborne, Provenzale, 1989), (Litvinenko et al., 1992), (Marsh, Tu, 1997), (Schertzer et al., 1997), (Horbury, Balogh, 1997), рассмотрим характеристики структурных функций $S_m(L)$ для электрического поля $E_z(z)$ в грозовой облачности, с вертикальным профилем, представленным на *рис. 1*. В расчётах используем аналитические аппроксимации экспериментальных графиков $E_z(z)$ 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 . Затем вычисляем структурные функции $S_m(L)$, определяемые выражением:

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

где $z_i = \lambda i$, $L = \lambda n$, разрешение $\lambda = 2$ метра для области высот $0,24 < z / \text{км} < 11,24$, причём $1 \leq i \leq N$, $N = h / \lambda$, $h = 11$ км, $n = 1, 2, 3 \dots$ целое число.

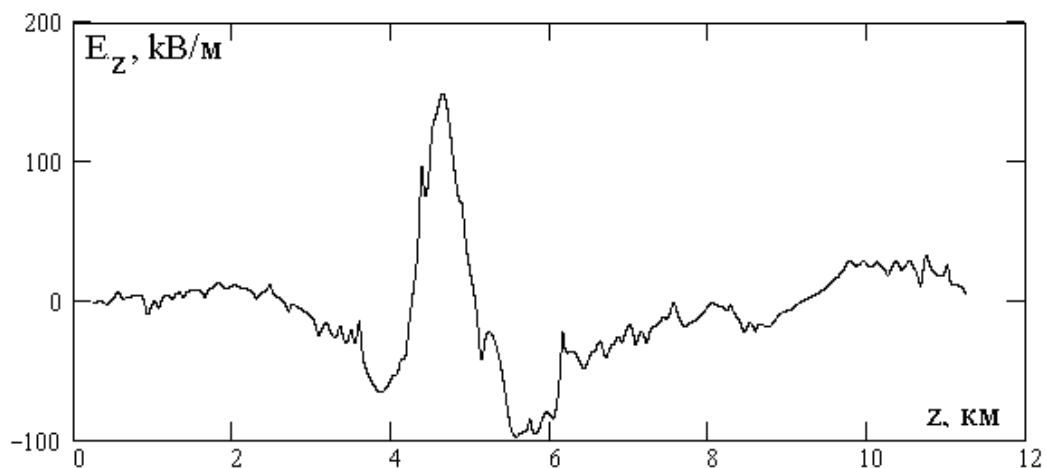


Рис. 1. Высотный профиль электрического поля в грозовой облачности

Пространственное усреднение проводим в области $0 < z - 0,24 \text{ км} < h - L$ и полагаем $\lambda < L < h/2$. Зависимость $S_m(L)$ от масштаба L для различных значений порядка m представляется на графиках в $\lg\text{-}\lg$ координатах, из которых видно наличие в электрической турбулентности двух инерционных интервалов, в которых связь между $\lg S_m(L)$ и $\lg L$ почти линейна. Следовательно, в инерционных интервалах реализуются

степенные скейлинги такого вида $S_m(L) \sim L^{g(m)}$. Для выборки, показанной на рис. 1, отметим сильный всплеск электрического поля на высоте $z = 4,65$ км, равный $148,7$ кВ/м.

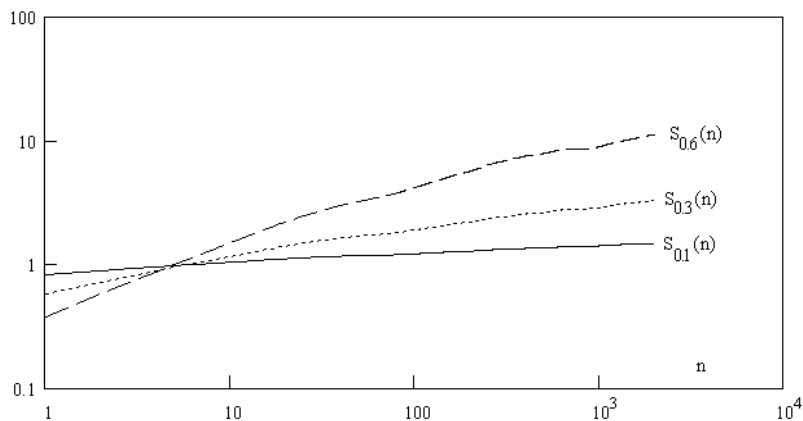


Рис. 2а. Графики СФ электрической турбулентности в грозовой облачности для порядков $m = 0,1, 0,3, 0,6$

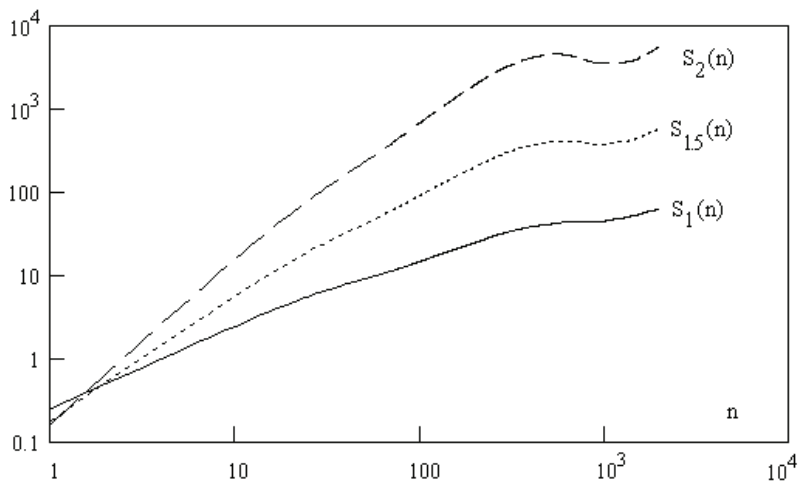


Рис. 2б. Графики СФ электрической турбулентности в грозовой облачности для порядков $m = 1, 1,5, 2$

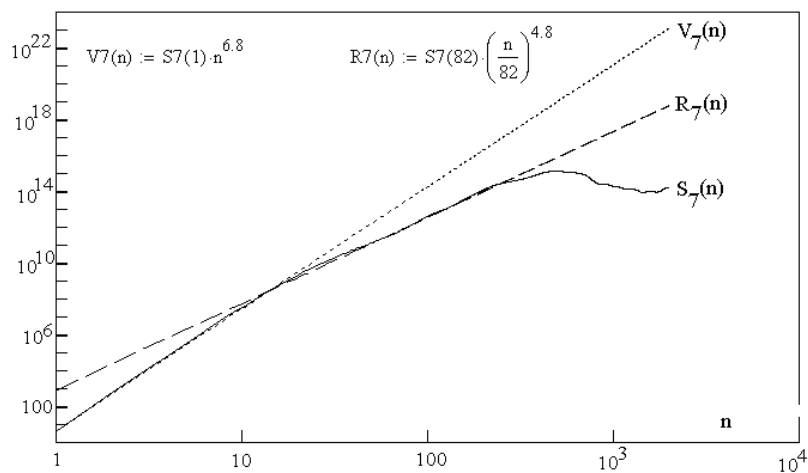


Рис. 2в. График СФ электрической турбулентности в грозовой облачности для порядка $m = 7$ и её степенные аппроксимации в инерционных интервалах: $V_7(n)$ для малых $n < 30$ масштабов $g_1(7)=6,8$, а $R_7(n)$ для средних ($30 < n < 450$) масштабов, когда $g_2(7)=4,8$

По расчётам график электрического потенциала $\delta U(z)$ для указанного диапазона высот оказывается весьма плавной функцией, но объёмная плотность электрического заряда $\rho(z)$ демонстрирует в грозовой облачности сильные флуктуации по высоте. Графики структурных функций (СФ) приведены на *рис. 2* и показывают наличие в электрической турбулентности двух инерционных интервалов, в которых приближённо выполняются степенные скейлинги для СФ: $S_m(L) \sim L^{g(m)}$, где $g(m)$ - скейлинговая экспонента. Для $m = 1$ получаем индекс Херста H , причём $H = g_1(1) \approx 1$ на малых масштабах и $H = g_2(1) \approx 0,71$ для средних масштабов. Индекс спектра мощности турбулентных флуктуаций α выражается через $g(2)$: $\alpha = 1 + g(2)$. Согласно расчётам 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 σ в рассматриваемом диапазоне высот получаем соответственно следующие значения:

$$E_{av} \approx 5,864 \text{ кВ/м}, \quad \sigma \approx 35,559 \text{ кВ/м}, \quad \text{где } \sigma^2 = \langle (E(z) - E_{av})^2 \rangle, \quad E(z) \equiv E_z(z).$$

Рассмотрим дополнительные параметры турбулентности: асимметрию распределения флуктуаций (skewness) Sk и куртозис K_1 , определяемые для выборки следующими выражениями:

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

Расчёты дают такие значения: $Sk \approx 0,776$, $K_1 \approx 6,242$. Отметим, что для нормального 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.

Следовательно, функция распределения электрического поля по величине имеет хорошо выраженный пик, и в электрической турбулентности присутствует сильная перемежаемость. Рассмотрим обобщённую масштабную инвариантности (ОМИ) для анализируемой выборки электрического поля. Из проведённого анализа следует, что имеются два инерционных интервала для электрической турбулентности: на малых $n < 30$ и на средних $30 < n < 450$ масштабах, где виден степенной скейлинг структурных функций (СФ): $S_m(n) \sim n^{g(m)}$, $g(m)$ - скейлинговая экспонента. 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 обобщённая масштабная инвариантность отсутствует. Это хорошо видно из *рис. 3*. Введём

нормированные структурные функции $Q_m(n)$: $Q_m(n) = S_m(n) / S_m(1)$. На рис. 3 представлены в качестве примера графики соответственно $Q_2(n)$, $Q_6(n)$ в зависимости от структурной функции $Q_3(n)$.

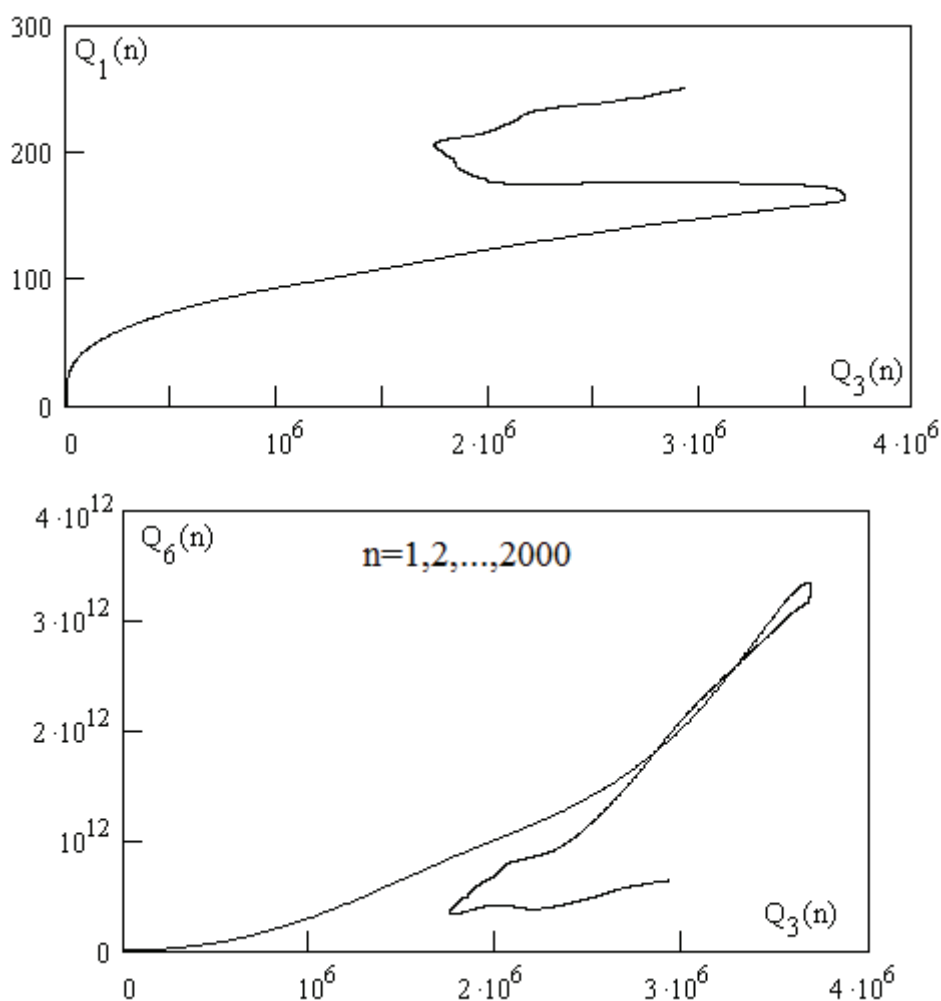


Рис. 3. Графики нормированных структурных функций $Q_2(n)$, $Q_6(n)$ в зависимости от структурной функции $Q_3(n)$

Как видим из рис. 3, графики имеют достаточно сложную форму и в lg-lg координатах отсутствует интервал линейной зависимости $Q_2(n)$, $Q_6(n)$ от $Q_3(n)$, который реализуется только при наличии обобщённой масштабной инвариантности. Отметим, что вид графиков при $S_3(n)$ порядка 10^5 и более связан с насыщением роста структурных функций на больших масштабах. Кроме того, сильная перемежаемость электрической турбулентности видна уже из высотного профиля электрического поля.

Заключение

Результаты выполненного анализа характеристик электрической турбулентности в грозовой облачности можно сформулировать следующим образом. Используя экспериментальные данные по измерению вертикальных профилей электрического поля $E(z)$ в грозовой облачности, аналитические аппроксимации для $E(z)$ в классе локализованных функций с оптимизацией выбора их параметров проведены расчёты с достаточно высоким разрешением по высоте структурных функций для вертикального профиля электрического поля. Выявлены инерционные интервалы электрических флуктуаций на малых и средних масштабах, получены аналитические аппроксимации СФ и определены скейлинговые экспоненты $g(m)$ в инерционных интервалах. Исследованы характеристики электрической турбулентности включая среднюю величину поля E_{av} в рассматриваемом диапазоне высот, стандартное отклонение σ , асимметрию функции распределения поля (skewness), куртозис, индекс Херста, структурные функции. Рассмотрен вопрос о возможности обобщённой масштабной инвариантности (ОМИ) электрической турбулентности в исследованной выборке вертикального профиля электрического поля $E(z)$ в грозовой облачности.

Показано, что в этой выборке ОМИ отсутствует. Предположено, что отсутствие ОМИ связано с достаточно сильной перемежаемостью электрической турбулентности. Данный вопрос будет рассмотрен в последующем анализе на основе разработки аналитической модели электрической турбулентности с двумя инерционными интервалами и введением перемежаемости электрической турбулентности по высоте.

Результаты проведённого анализа представляют интерес для последующих исследований влияния заряженных подсистем атмосферных вихрей на генерацию гидродинамической спиральности атмосферы и формирование неоднородной, самосогласованной структуры ветровых потоков. Электромагнитные силы внутри тропических циклонов могут воздействовать на динамику заряженных подсистем ТЦ, включая возникновение обратного каскада энергии и усиление 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 (Бондур, Пулинец, 2012).

Литература

1. *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.
2. *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.
3. *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.
4. *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.
5. *Козак Л.В., Пилипенко В.А., Чугунова О.М., Козак П.Н.* Статистический анализ турбулентности форшоковой области и магнитослоя Земли // Космические исследования. 2011. Т. 49. № 3, С. 202-212.
6. *Лидванский А.С., Хаердинов Н.С.* Статистика вариаций мюонов космических лучей во время гроз // Известия РАН. Серия физическая. 2011. Т. 75. № 6, 888-890.
7. *Моисеев С.С., Чхетиани О.Г.* Спиральный скейлинг в турбулентности // ЖЭТФ. 1996. Т. 110, Вып. 1(7). С. 357-370.
8. *Фрик П.Г.* Турбулентность: подходы и модели. М. - Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2010. 332 с.
9. *Branover H, Eidelman A., Golbraikh 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.
10. *Byrne G.J., Few A.A., Stewart M.F.* Electric Field Measurement within a Severe Thunderstorm Anvil // Journal of Geophysical Research. 1989. V. 94 (D5). P. 6297-6307.
11. *Dubrulle B.* Intermittency in fully developed turbulence: log-Poisson statistics and generalized scale covariance // Physical Review Letters. 1994. V. 73. P. 959-967.
12. *Horbury T.S., Balogh A.* Structure function measurements of the intermittent MHD turbulent cascade // Nonlinear Processes in Geophysics. 1997. V. 4. № 3. P. 185-199.
13. *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. V. 76. Iss.1-4. P. 346-354.
14. *Lazarev A.A., Moiseev S.S.* Geophysical Precursors of Early Stages of Cyclogenesis: Preprint IKI RAS. Pr – 1844, 1990. 13 p.
15. *Litvinenko L.N., Ryabov V.B., Usik P.V., Vavriv D.M.* Correlation Dimension // The New Tool in Astrophysics. Institute of Radio Astronomy, Academy of Sciences of Ukraine, Preprint № 64. Kharkov. 1992. 53 p.
16. *Marsh E., Tu C.Y.* Intermittency, non-Gaussian statistics and fractal scaling of MHD fluctuations // Nonlinear Processes in Geophysics. 1997. V. 4. № 1. P. 101-124.
17. *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. V. 54. № 11. P. 1423-1444.
18. *Marshall T.C. and Rust W.D.* Electrical structures and updrafts speeds in thunderstorms over the southern great-plains // Journal of Geophysical Research. 1995. V. 100 (D1). P. 1001-1015.
19. *Osborne A.R., Provenzale A.* Finite correlation dimension for stochastic systems with power-law spectra // Physica D. 1989. V. 35. № 2. P. 357-381.
20. *Schertzer D., Lovejoy S., Schmitt F. Chigirinskaya Y., Marsan D.* Multifractal cascade dynamics and turbulent intermittency // Fractals. 1997. V. 5. № 3. P. 427-471.
21. *She Z., Leveque E.* Universal scaling laws in fully developed turbulence // Physical Review Letters. 1994. V. 72. P. 336-339.
22. *Sura P. and Perron M.* Extreme events and the general circulation: observations and stochastic model dynamics // Journal of the Atmospheric Sciences. 2010. V. 67. № 9. P. 2785-2804.
23. *Zadorozhny A.M., Tyutin A.A.* Effects of geomagnetic activity on the mesospheric electric fields // Annales Geophysicae. 1998. V. 16. P. 1544-1551.

Structural characteristics of electrical turbulence for vertical profile of electric field with a strong splash

L.A. Mikhailovskaya¹, N.S. Erokhin^{1,2}, I.A. Krasnova², S.N. Artekha¹

¹Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

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

²Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

E-mail: sungirl8@mail.ru

As it is known, the thunderstorm clouds contain charged subsystems. These subsystems create high electric fields of the orders of 100 kV/m. Such fields may facilitate generation of intense wind flows in the atmosphere and strengthening weak vortices. Therefore, for correct description of the charged subsystems' role in the formation and subsequent dynamics of atmospheric vortex, it is necessary to analyze the structural characteristics of the electric fields in thunderstorm. In this paper, based on experimental data, an analysis of structural features of electrical turbulence $S_m(L)$ is performed in the case of large splash of vertical electric field profile $E_z(z)$ in thunderstorm at altitudes $z < 12$ km. The inertial ranges of electrical turbulence are investigated, scaling exponent, Hurst index values and kurtosis in them are obtained. Deviations of structural functions $S_m(L)$ from the power-scaling law are identified in the inertial ranges. The analysis has shown that a generalized scale invariance of electrical turbulence does not hold for intervals of small scales and medium ones. It may be associated with intermittency of electric turbulence and the presence of coherent electrical structures. The results obtained can be used for subsequent assessments of the electrical subsystems role in the generation of self-consistent, essentially inhomogeneous structure of wind flows in atmospheric vortices, for a numerical simulation of nonlinear dynamics using parameterization schemes that take into account the electrical subsystem of vortices, as well as to identify opportunities on the vortex dynamics. Moreover, it is of interest for further development of methodologies for processing remote sensing data on atmospheric vortices, more complete and correct physical interpretation of experimental data processing results.

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

References

1. Artekha S.N., Gol'braikh E., Erokhin N.S., O roli elektromagnitnykh vzaimodeistvii v dinamike moshchnykh atmosferynykh 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.
2. Artekha S.N., Erokhin N.S., O svyazi krupnomasshtabnykh vikhrevykh atmosferynykh 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.
3. Bondur V.G., Pulinet S.A., Vozdeistvie mezomasshtabnykh atmosferynykh 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.
4. 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.
5. Kozak L.V., Pilipenko V.A., Chugunova O.M., Kozak P.N., Statisticheskii analiz turbulentnosti forshokovoi oblasti i magnitosloya Zemli (Statistical analysis of turbulence of foreshock region and the Earth magnetosheath), *Kosmicheskie issledovaniya*, 2011, Vol. 49, No. 3, pp. 202-212.
6. Lidvanskii A.S., Khaerdinov N.S., Statistika variatsii myuonov kosmicheskikh luchei vo vremya groz (Statistics of variations of cosmic ray muons during thunderstorms), *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya*, 2011, Vol. 75, No. 6, pp. 888-890.
7. 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.
8. Friik P.G., *Turbulentnost': podkhody i modeli* (Turbulence: approaches and models), Moscow-Izhevsk: NITs "Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika", 2010, 332 p.
9. Branover H., Eidelman A., Golbraikh 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.

10. 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.
11. Dubrulle B., Intermittency in fully developed turbulence: log-Poisson statistics and generalized scale covariance, *Physical Review Letters*, 1994, Vol. 73, pp. 959-967.
12. 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.
13. 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, Issues 1-4, pp. 346-354.
14. Lazarev A.A., Moiseev S.S., *Geophysical precursors of early stages of cyclogenesis*, Preprint IKI RAS, Pr – 1844, 1990, 13 p.
15. Litvinenko L.N., Ryabov V.B., Usik P.V., Vavriv D.M., *Correlation dimension. The new tool in astrophysics*, Preprint No 64, Kharkov: Institute of radio astronomy, academy of sciences of Ukraine, 1992, 53 p.
16. 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.
17. 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.
18. 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), pp. 1001-1015.
19. 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.
20. 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.
21. She Z., Leveque E., Universal scaling laws in fully developed turbulence, *Physical Review Letters*, 1994, Vol. 72, pp. 336-339.
22. Sura P. and Perron M., Extreme events and the general circulation: observations and stochastic model dynamics, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2010, Vol. 67, No. 9, pp. 2785-2804.
23. Zadorozhny A.M., Tyutin A.A., Effects of geomagnetic activity on the mesospheric electric fields, *Annales Geophysicae*, 1998, Vol. 16, pp. 1544-1551.