

Исследование скейлинговых параметров структурных функций атмосферного электричества для грозовой облачности

**Ерохин Н.С., Зольникова Н.Н., Михайловская Л.А.,
Луков С.Л.**

Институт космических исследований РАН, 117997 Москва,
Профсоюзная 84/32

Институт космических исследований БАН, Ул.Московска, 6,
София 1000, Болгария

E-mails: nerokhin@mx.iki.rssi.ru,

Москва, ИКИ РАН, ноябрь 2008

Аннотация

На основе данных измерений высотного профиля электрического поля $E(z)$ в грозовой облачности на высотах z до 16 km численными расчетами исследованы скейлинговые характеристики структурных функций электрических флуктуаций. Разработаны аналитические аппроксимации для экспериментальных графиков поля $E(z)$ с использованием системы локализованных функций, которые в дальнейшем использованы для получения высотных профилей электрического потенциала и объемной плотности электрического заряда. Установлено, что характерная величина крупномасштабных вариаций электрического потенциала может достигать сотен мегавольт при толщинах слоев по высоте порядка километров. Показано наличие сильных флуктуаций объемной плотности электрического заряда величиной порядка десятков нанокulon в кубическом метре и более с характерными масштабами по высоте в диапазоне от десятков до сотен метров.

Численно найдены структурные функции для флуктуаций электрического поля с порядками $0 < m \leq 6$. Выявлены инерционные интервалы электрической турбулентности, находящиеся в области малых и средних масштабов. Для найденных инерционных интервалов вычислены скейлинговые экспоненты. Полученный скейлинг структурных функций свидетельствует о наличии когерентных структур и перемежаемости турбулентности.

Результаты выполненного анализа представляют интерес для исследований роли электрических структур интенсивных атмосферных вихрей в процессах генерации гидродинамической спиральности и поддержания наблюдаемой, самосогласованной, существенно неоднородной структуры движений газа в мощных атмосферных вихрях, а также для изучения механизмов возникновения ионосферных отпечатков тропосферных вихрей. Так в настоящее время известно, что над областями интенсивного тайфуногенеза возникают долгоживущие структурные образования, обнаруживаемые, например, по изменениям концентрации озона.

Введение

Как известно, присутствие спиральности $\mathbf{H} = \mathbf{v} \text{ rot } \mathbf{v}$ в атмосферных и плазменных вихрях повышает их устойчивость и увеличивает время жизни (см., например, [1-3]). Важно также отметить, что спиральность \mathbf{H} способствует возникновению обратного каскада энергии (от малых в большие масштабы). С другой стороны анализ возможных механизмов генерации спиральных движений в приложении к мощным атмосферным вихрям типа торнадо или тайфунов приводит к заключению – для их корректного описания необходимо учитывать вклады заряженных подсистем как в формирование неоднородной, самосогласованной структуры вихрей, так и в их последующую нелинейную динамику [4-6]. Экспериментальные данные по измерениям высотного профиля вертикального электрического поля $E_z(z)$ в грозовой облачности [7,8] указывают на наличие достаточно сильных мелкомасштабных флуктуаций с масштабами порядка (10÷100) м. Поэтому для корректных оценок вклада заряженных подсистем в генерацию спиральных движений газа в интенсивных вихрях требуется изучение структурных харак-

теристик электрических флуктуаций, в частности, исследование структурных функций $S_m(L)$, где $L = z_1 - z_2$ разница высот двух прилегающих слоев. В настоящем докладе по аналогии с методами изучения гидродинамической турбулентности [9] рассмотрены структурные функции $S_m(L)$ для вертикального распределения электрического поля в грозовой облачности $E_z(z)$. Методика расчетов $S_m(L)$ состоит в следующем. Экспериментальные графики измеренного высотного профиля электрического поля $E_z(z)$ в диапазоне высот z до $h = 16 \text{ km}$ используются в качестве базовых данных для численных расчетов. При этом на первом этапе проводится оцифровка экспериментальных графиков $E(z)$ с переменным шагом по высоте z . Получается новая выборка $E_i = E(z_i)$, для которой разрабатывается аналитическая аппроксимация $E_a(z)$ на основе системы 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 .

Следует отметить, что эти аналитические аппроксимации позволяют определять высотные профили объемной плотности электрического заряда $\rho_a(z)$ и электрического потенциала $U_a(z)$.

На следующем этапе вычислений производится оцифровка функций $E_a(z)$, $\rho_a(z)$ в точках $z_i = \lambda i$, где $1 \leq i \leq N$ и $N = h / \lambda$, для высот $z < h$ с постоянным шагом $\lambda = 10 \text{ m}$. Следовательно, получаем новые ряды данных $E_a(z_i)$, $\rho_a(z_i)$ для последующих вычислений структурных функций. В частности, для выборки $E_a(z_i)$ расчеты структурной функции $S_m(L)$ порядка m проводятся по формуле (см., например, [9,10])

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

где пространственное усреднение выполняется для области высот $0 < z < h - L$ и полагается $\lambda \leq L \leq h / 3$. Аналогичная формула может быть использована для выборки $\rho_a(z_i)$ при расчетах структурных функций объемной плотности электрического заряда. Согласно [9,10] графики зависимости структурных функций $S_m(L)$ от масштаба L делаются в $\log\text{-}\log$ координатах. Эти графики (см. ниже) показывают наличие инерционных интервалов, в которых имеется линейные зависимости $\log S_m(L)$ от $\log L$, что означает степенные зависимости вида $S_m(L) \sim L^{g(m)}$ где $g(m)$ так называемая скейлинговая экспонента.

Численные расчеты структурных функций

Для вычисления структурных функций были взяты экспериментальные графики высотного профиля электрического поля $E(z)$ из работ [7,8]. Пример такого графика для области высот атмосферы $0.194 < z / \text{km} < 13.13$ приведен ниже на рис.1, где поле E измеряется в единицах kV/m .

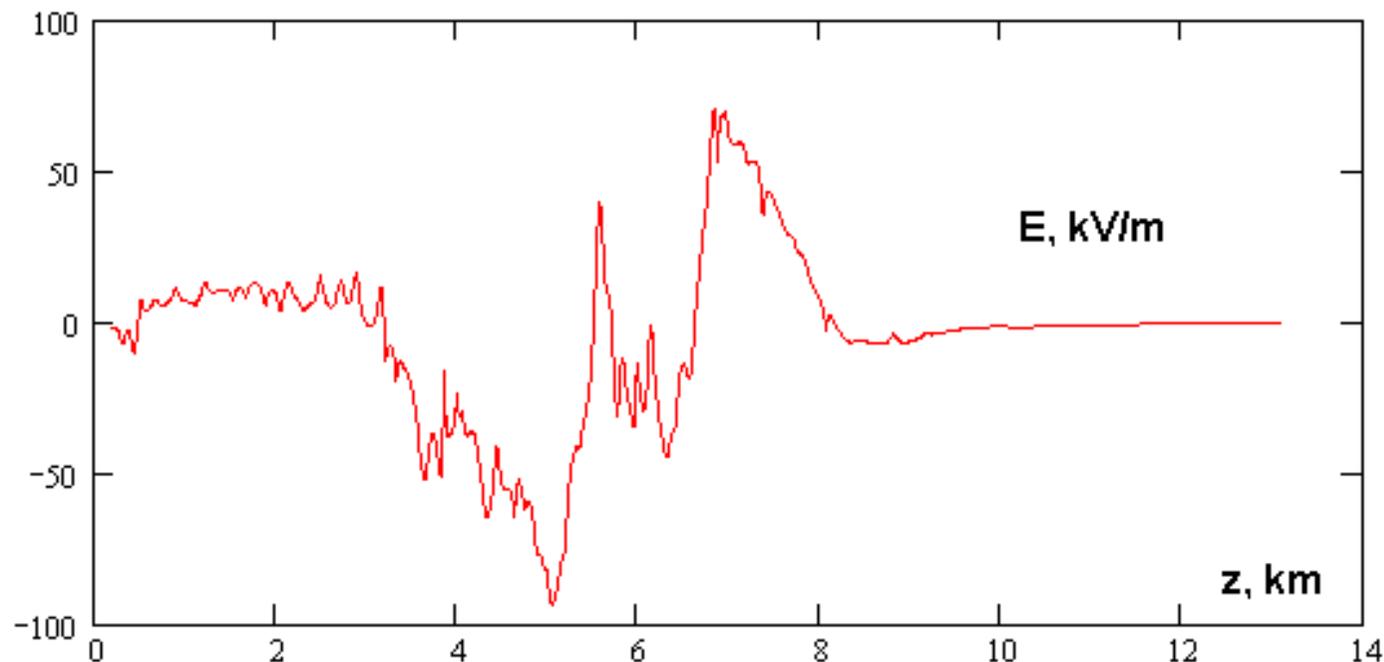


Рис.1. Высотный профиль электрического поля $E(z)$ в грозовой облачности.

Как видим, имеются мелкомасштабные вариации поля E . Заметим, что аналитическая аппроксимация данного экспериментального графика содержит сумму 12 функций $r_n(z) : E_a(z) = \sum_n r_n$, где введено обозначение $r_n(z) = \sum_j b_{nj}$, коэффициенты a_{nj} измеряются в kV/m , а высота z в km , $b_{nj}(z) = a_{nj} / [1 + k_{nj}^2 (z - z_{nj})^2]$.

Для упрощения расчетов структурных функций $S_m(L)$ введем положение i -го слоя $z_i(km) = 0.194 + 0.01(i - 1)$, где $i = 1, 2 \dots N$, причем $N = 1294$ и $L_n(km) = 0.01n$, а номер n меняется в следующем интервале $n = 1, 2 \dots 431$. Таким образом имеем $S_m(L) \equiv S_m(n)$ и $E(z_i) \equiv E_i$. В итоге структурная функция $S_m(n)$ находится по формуле $S_m(n) = \sum_i | E_i - E_{i+n} |^m / (N - n)$.

Для значений СФ-порядков $m = 2, 3, 4, 5, 6$ графики зависимостей структурных функций $S_m(n)$ от безразмерного масштаба $n = L / 10 m$ представлены на рис.2 в $\log\text{-}\log$ координатах. Для лучшего сравнения кривых на этом рисунке даны графики нормированных СФ, собственно функций $R_m(n) = S_m(n) / S_m(1)$, для которых $R_m(1) = 1$.

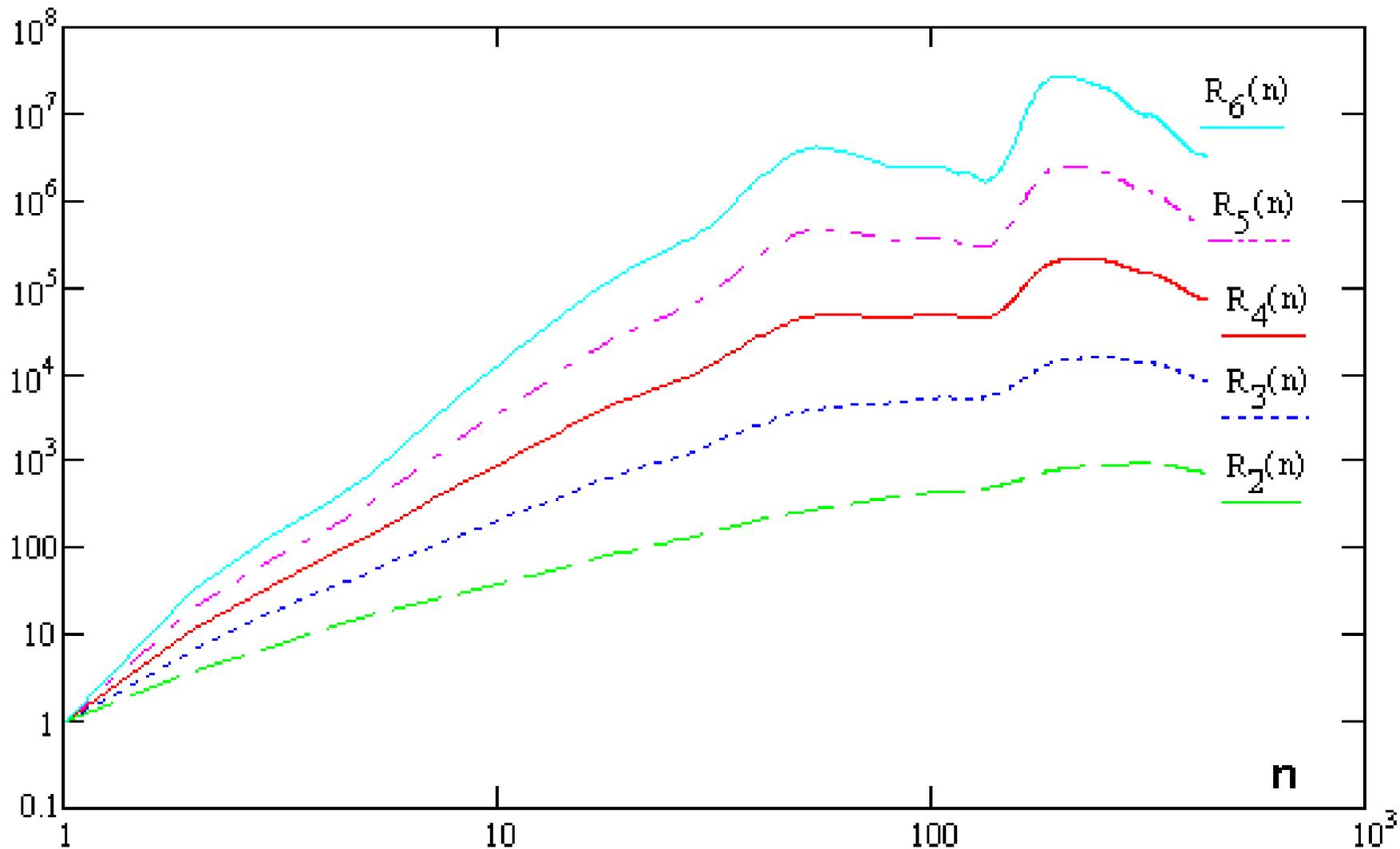


Рис.2. Графики нормированных структурных функций
 $R_m(n) = S_m(n) / S_m(1)$.

Согласно рис.2 насыщение роста структурных функций происходит на масштабах $L_m \sim (60 \div 350) m$, конкретные значения которых зависят от величины порядка СФ m . Например, в случае $m = 1$ насыщение роста имеет место для масштабов $L_1 > 350 m$. Как видно из рис.2, масштаб L_m уменьшается при увеличении порядка m . В частности, для $m = 6$ имеем оценку $L_6 \sim 60 m$.

Другое заключение относится к наличию инерционных интервалов электрических флуктуаций. Присутствуют два инерционных интервала : первый на малых масштабах $L < 10 m$, а второй – на средних $L < 350 m$. Положение инерционных интервалов зависит от порядка структурной функции m . В частности, графики $S_1(n)$ и ее асимптотик показаны на рис.3, где кривая 1 представляет $S_1(n)$, а кривые 2 и 3 дают ее асимптотики соответственно на малых и средних масштабах.

Аналогичные графики структурных функций и их асимптотик в инерционных интервалах для следующих значений порядков СФ $m = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 2, 4, 6$ приведены на рис.4-рис.10 соответственно с указанием значений скейлинговых экспонент $g(m)$.

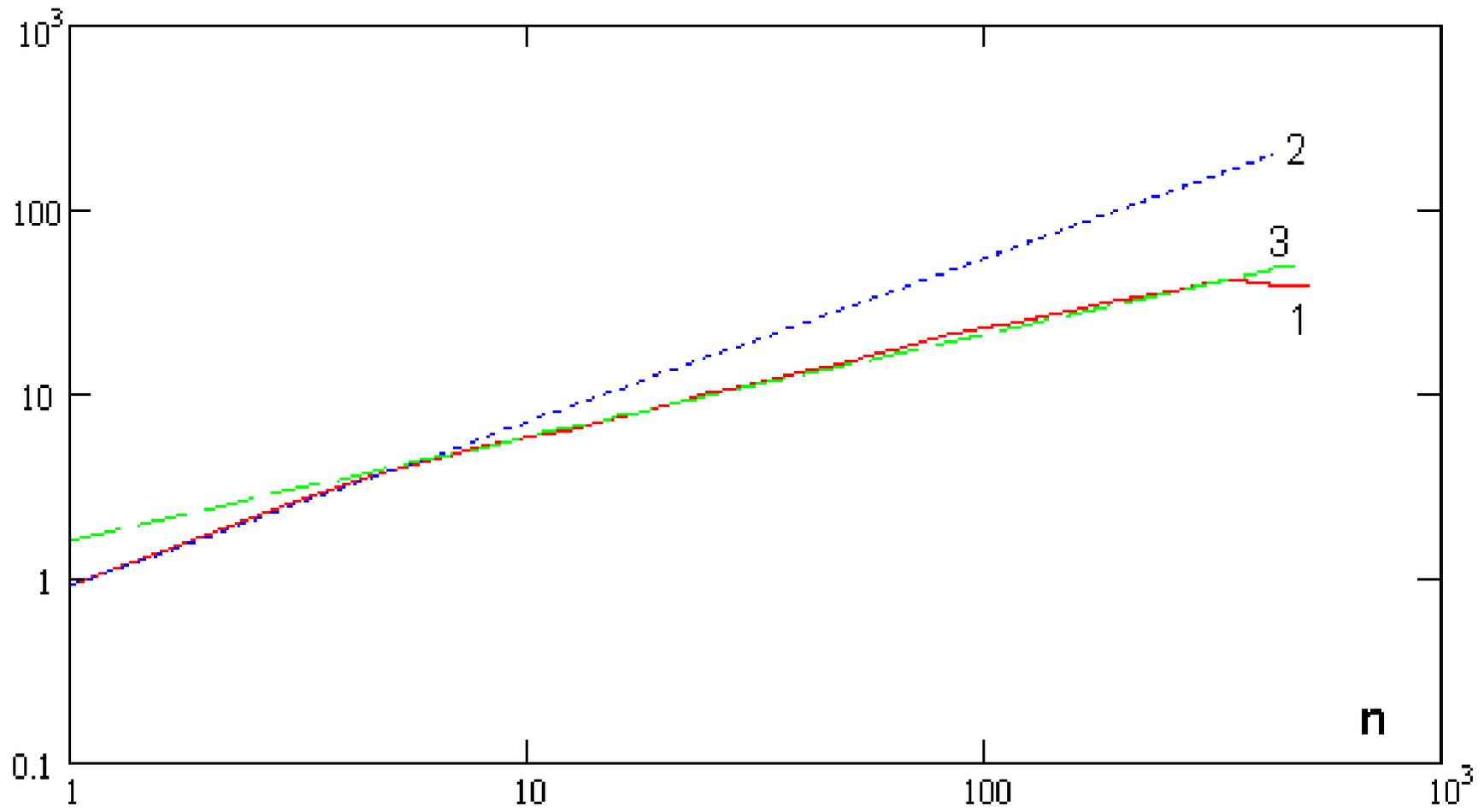


Рис.3. Структурная функция $S_1(n)$ – curve 1 и ее асимптотики (кривые 2 и 3).

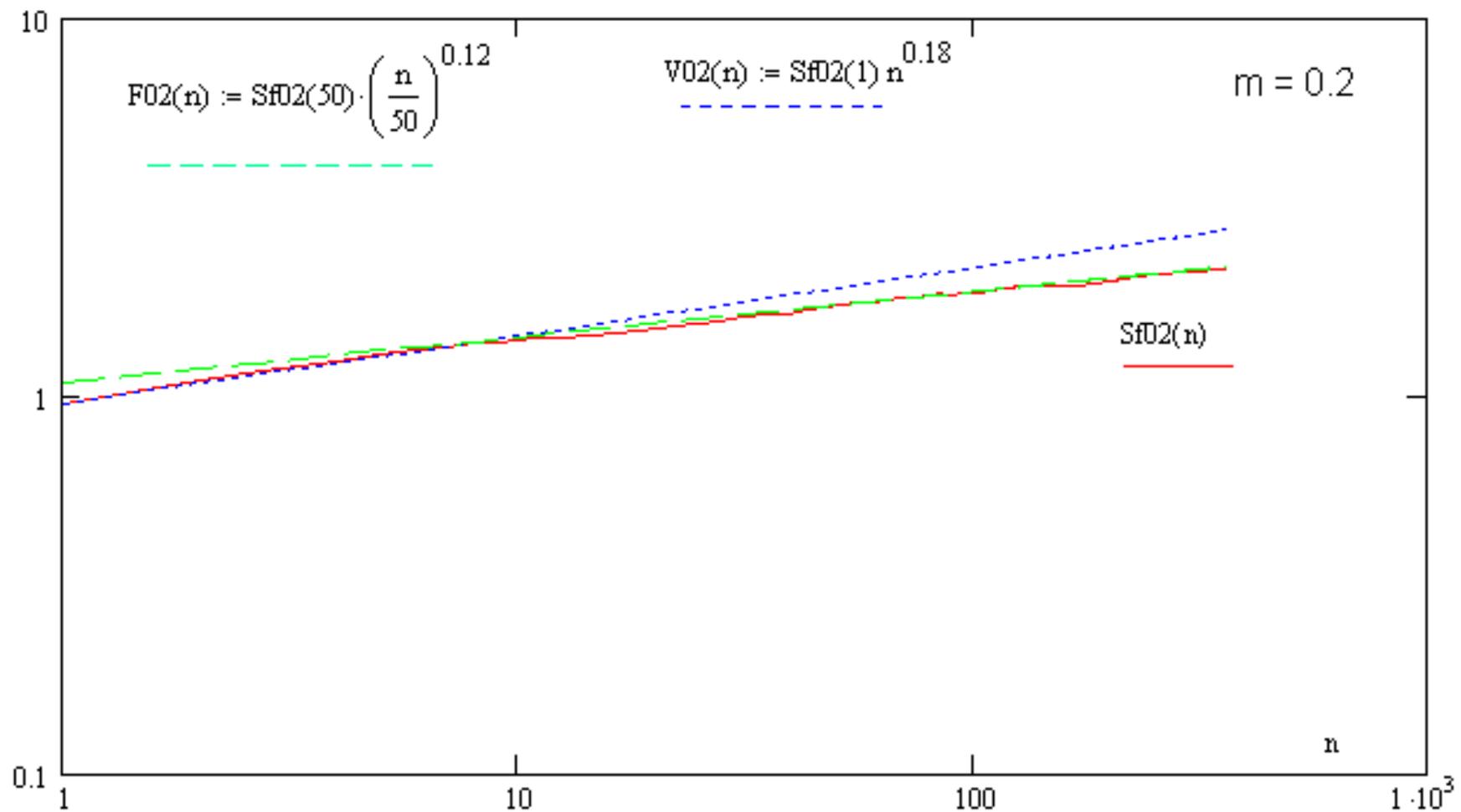


Рис.4. Структурная функция $S_m(n)$ для $m = 0.2$ и ее асимптотики.

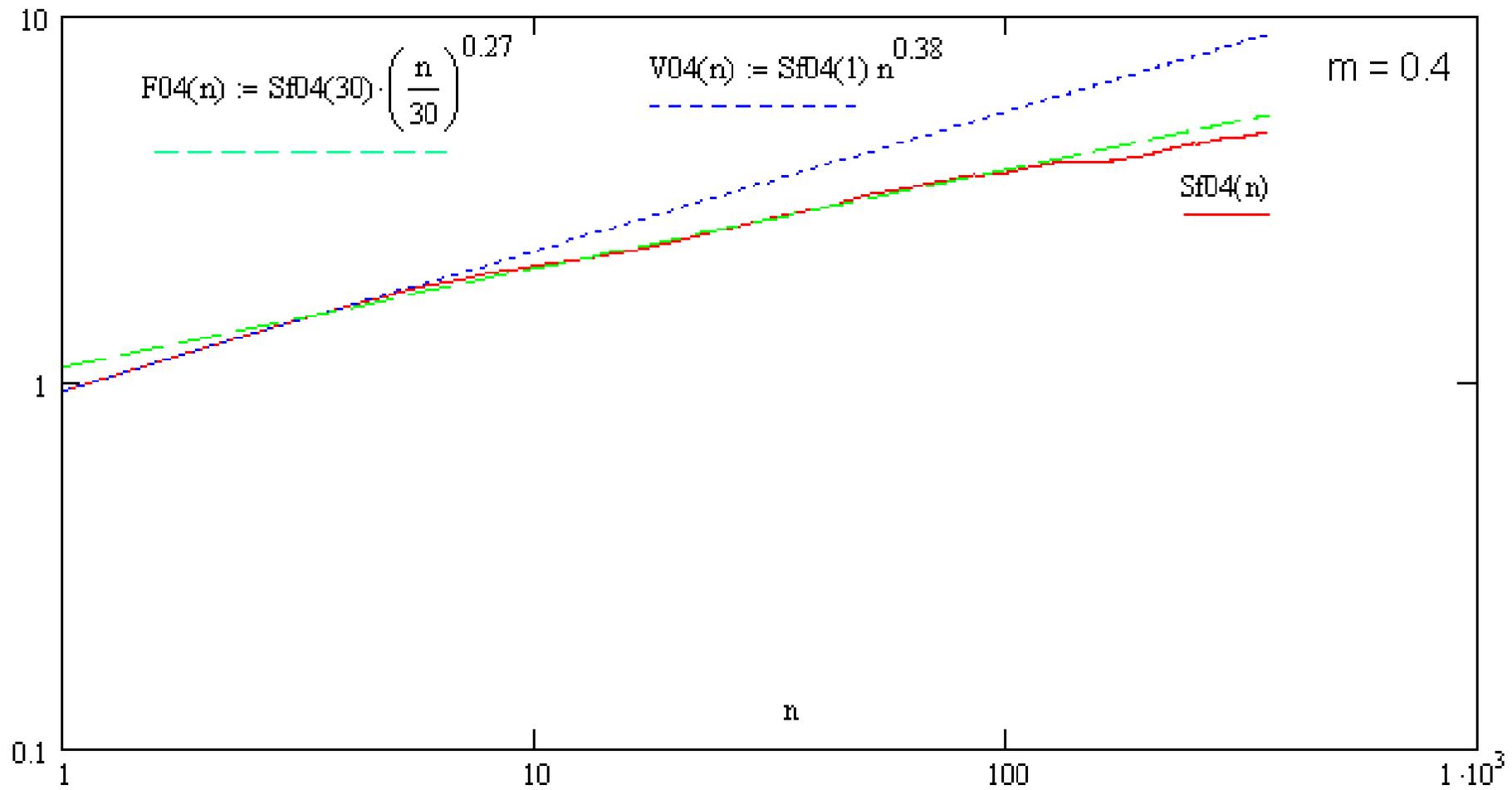


Рис.5. Структурная функция $S_m(n)$ для $m = 0.4$ и ее асимптотики.

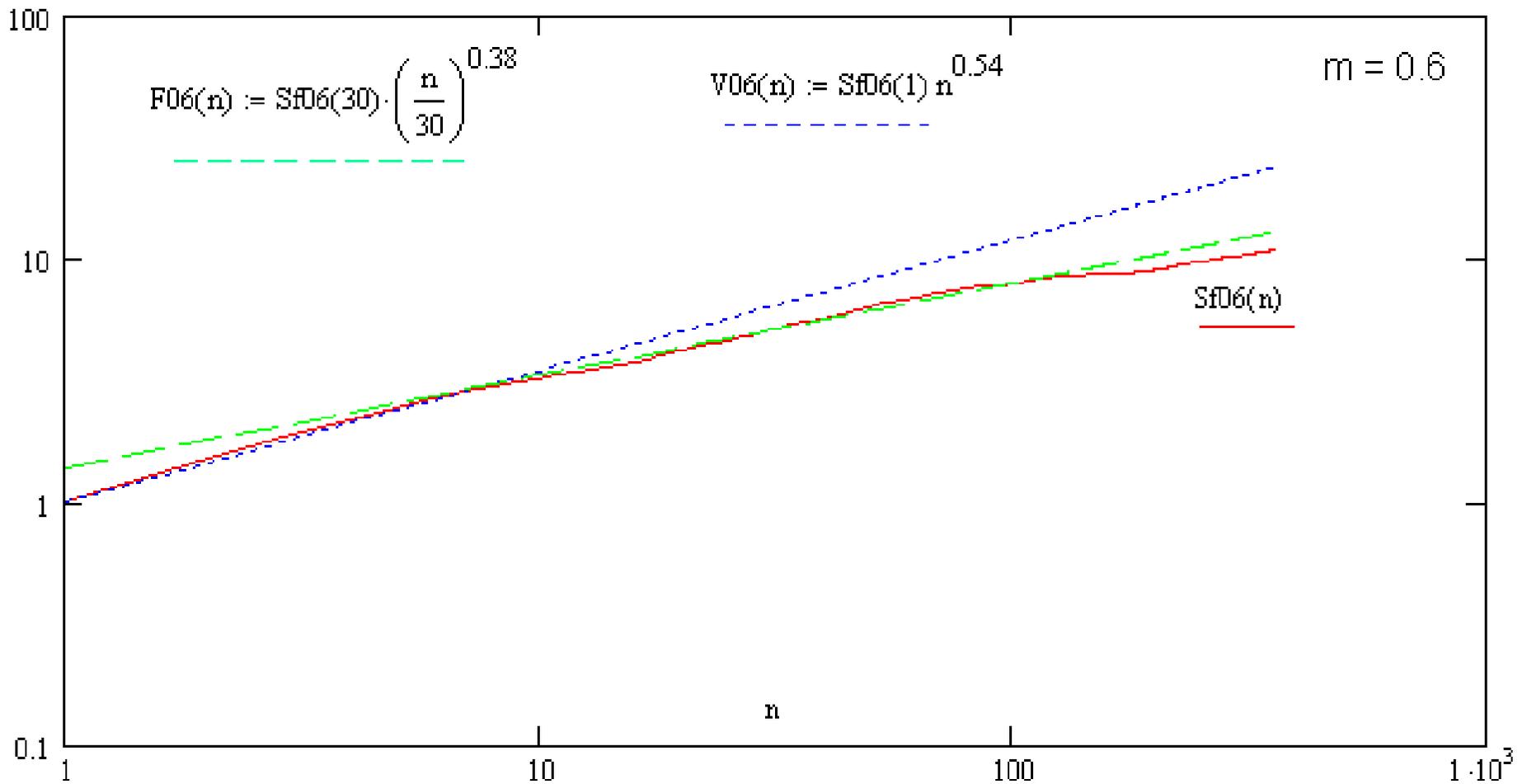


Рис.6. Структурная функция $S_m(n)$ для $m = 0.6$ и ее асимптотики.

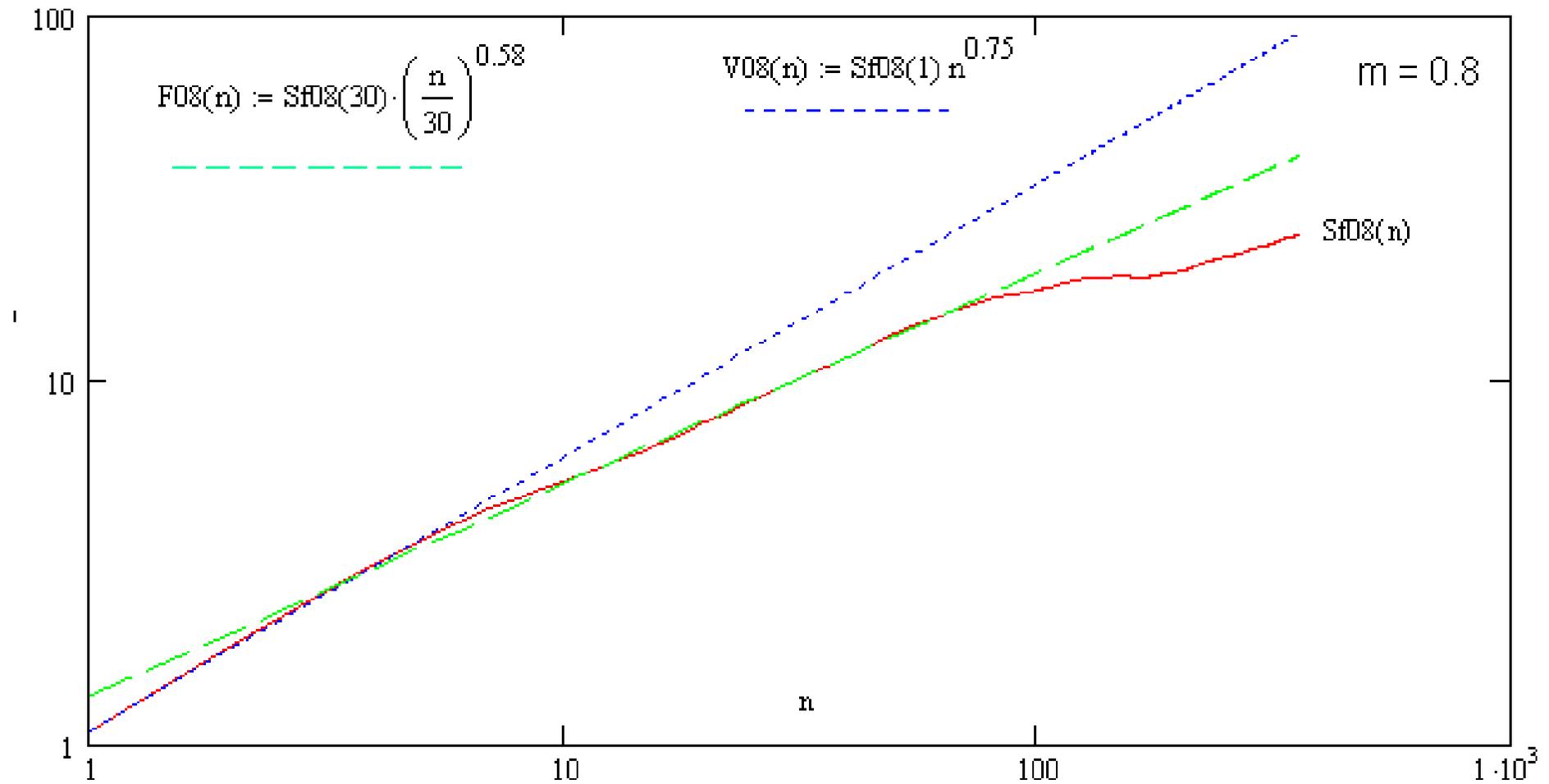


Рис.7. Структурная функция $S_m(n)$ для $m = 0.8$ и ее асимптотики.

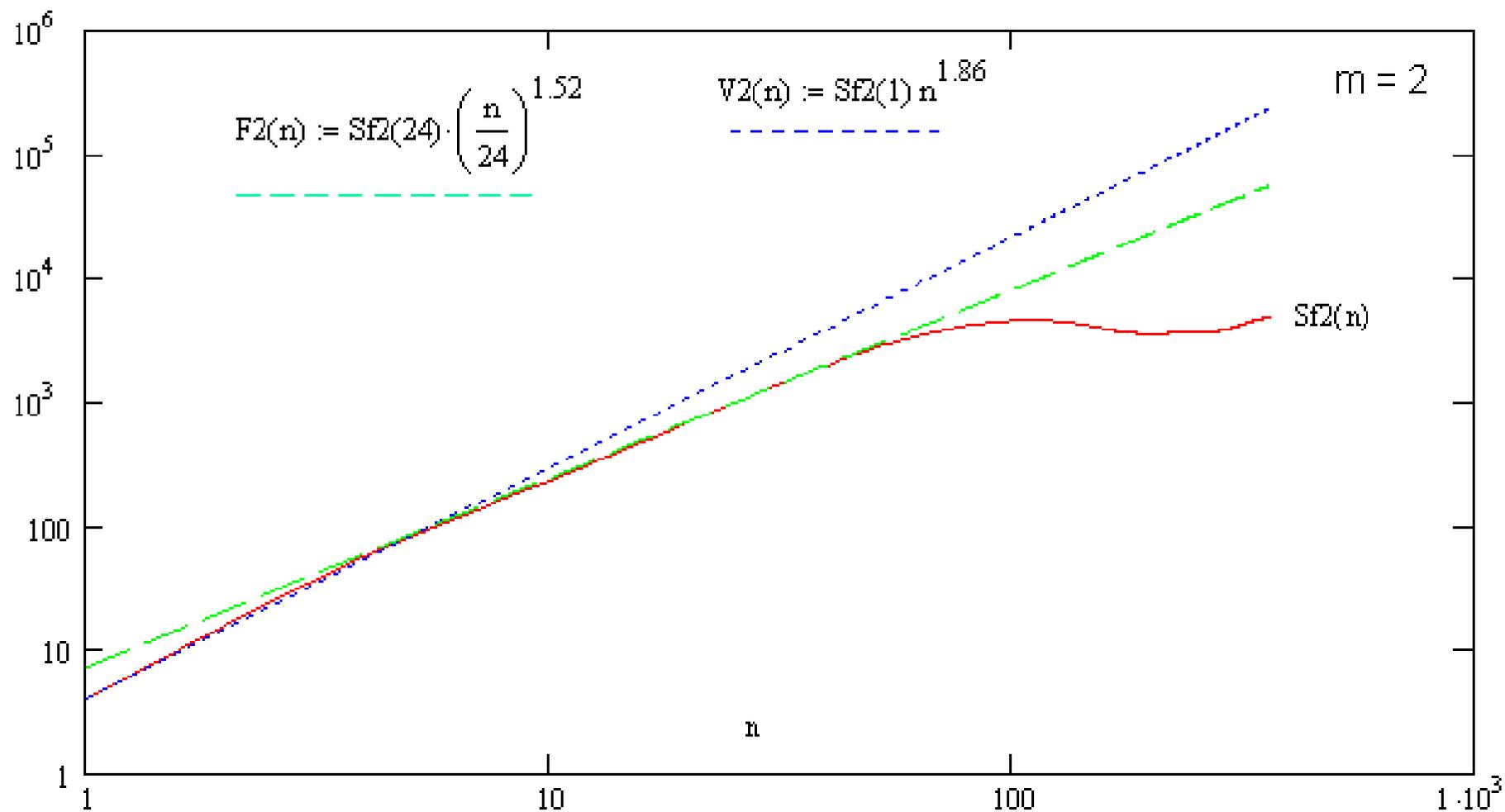


Рис.8. Структурная функция $S_m(n)$ для $m = 2$ и ее асимптотики.

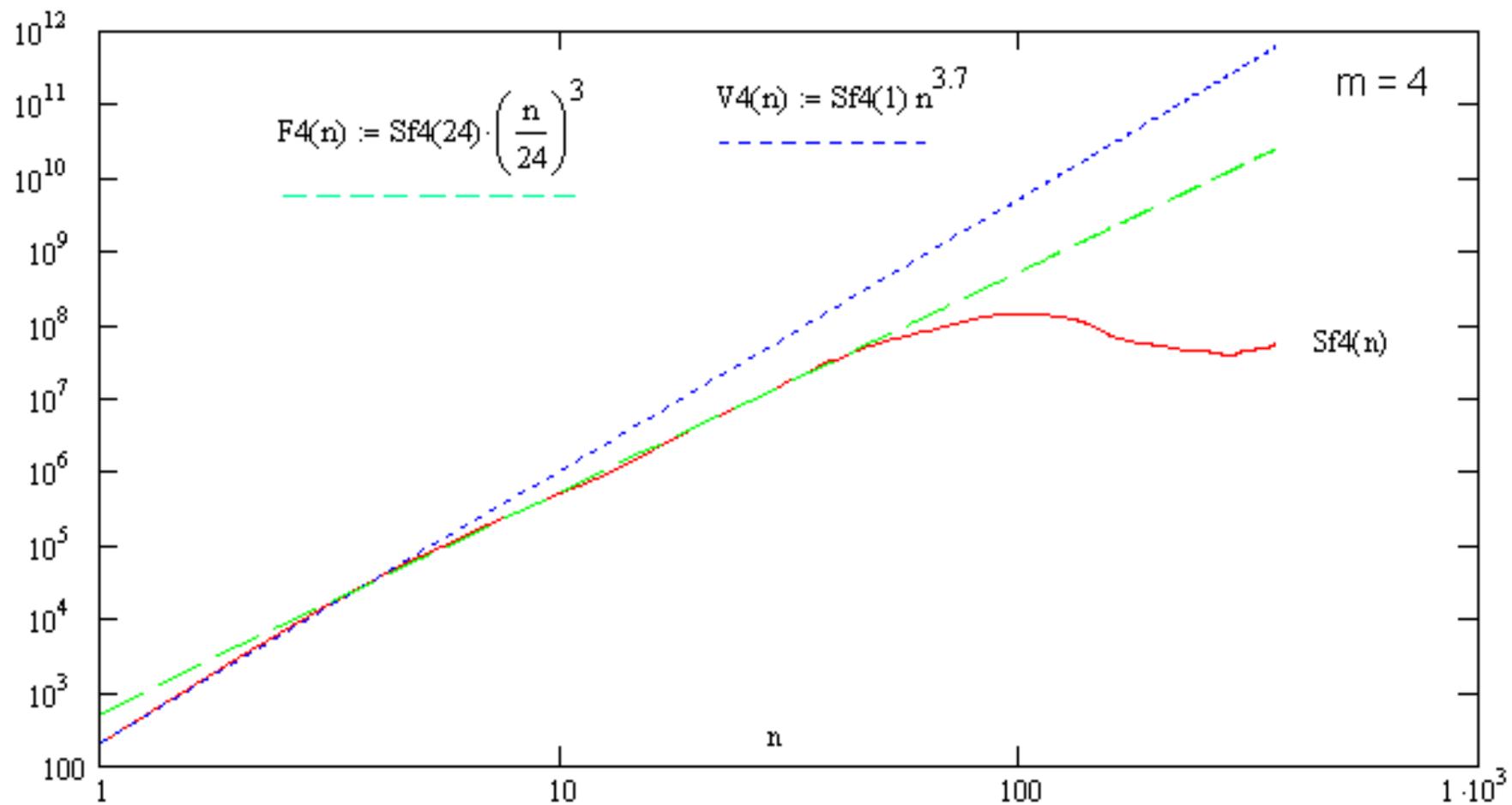


Рис.9. Структурная функция $S_m(n)$ для $m = 4$ и ее асимптотики.

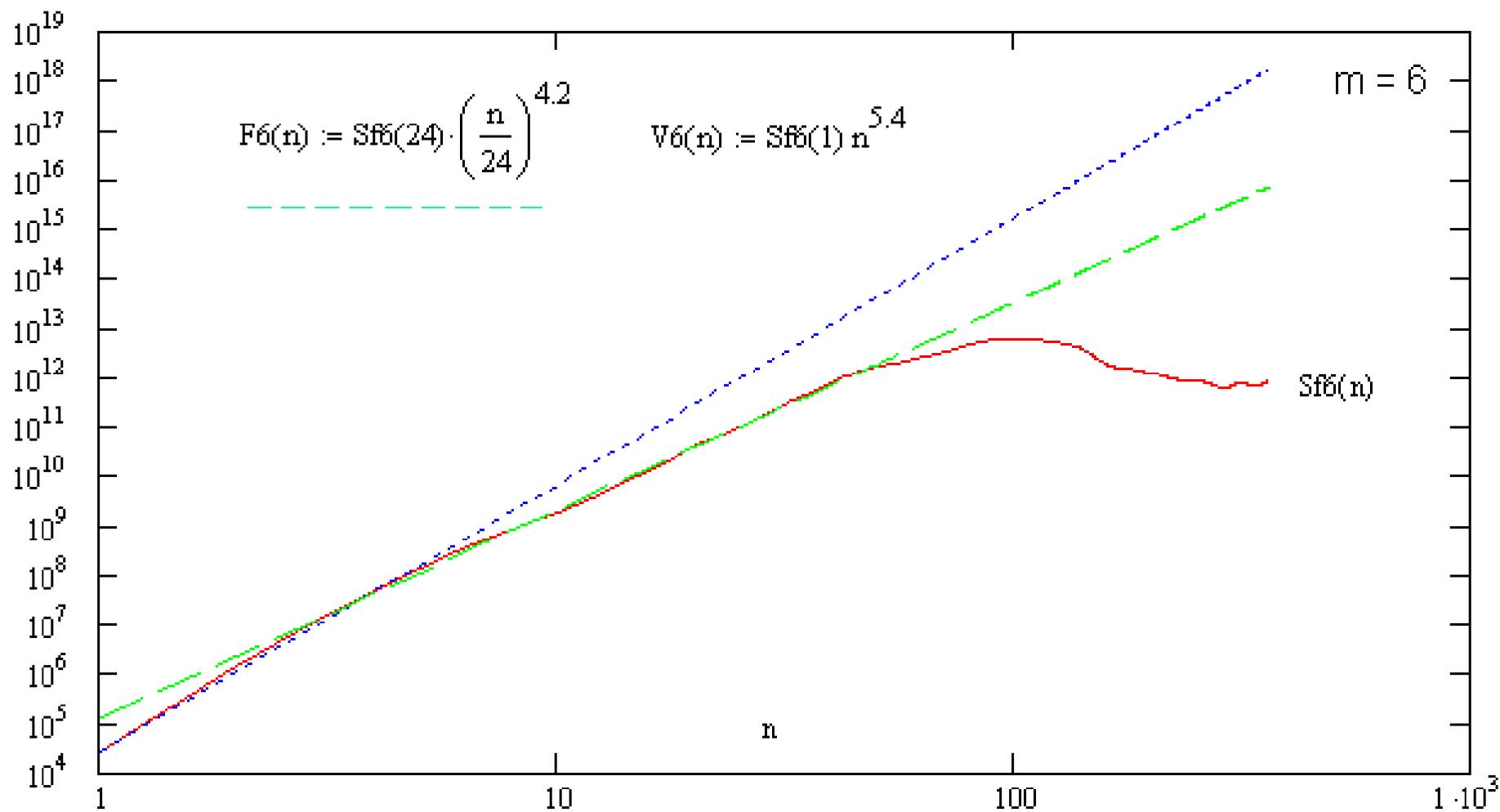


Рис.10. Структурная функция $S_m(n)$ для $m = 6$ и ее асимптотики.

Наиболее широкие инерционные интервалы имеет структурная функция $S_1(n)$ – , представленная вместе с ее асимптотиками на рис.11.

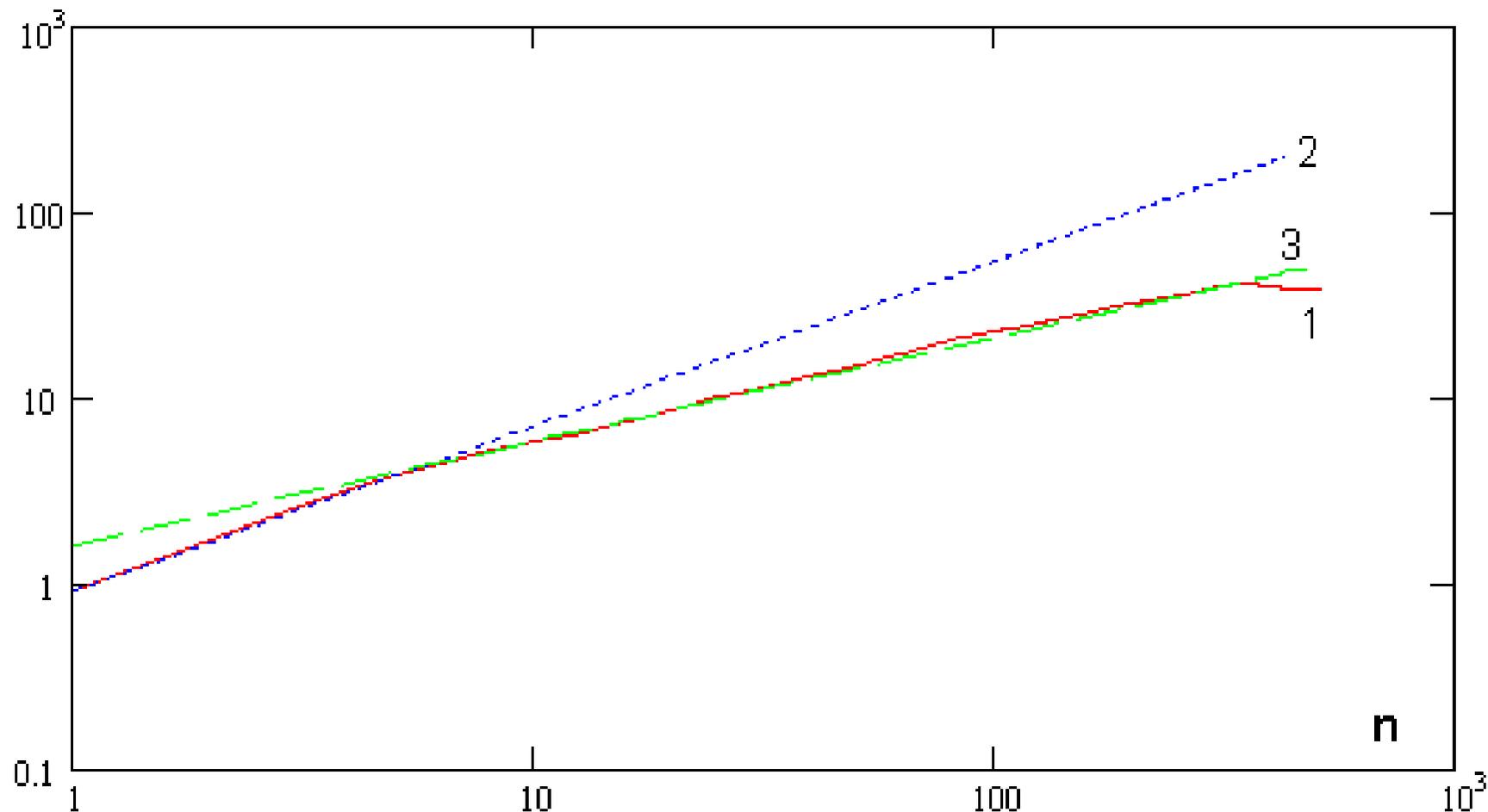


Рис11. Структурная функция $S_1(n)$ – кривая 1 и ее асимптотики.

Проведенные расчеты показали, что в первом инерционном интервале имеем $n < 7$ с $g(1) \approx 0.89$, однако второй инерционный интервал приходится на масштабы $7 < n < 356$, где $g(1) \approx 0.556$.

Для случая $m = 3$ первый инерционный интервал находится на масштабах $n < 6$ причем $g(3) \approx 2.544$, а второй инерционный интервал занимает $6 < n < 49$, в котором $g(3) \approx 1.872$. Такое поведение структурных функций свидетельствует о наличии в облаках электрических структур на малых и средних масштабах. По результатам данного анализа построены графики скейлинговых экспонент $g_1(m)$ и $g_2(m)$ для первого и второго инерционных интервалов соответственно, показанные на рис.12 вместе с их аппроксимациями.

Здесь необходимо отметить, что для однородной и изотропной колмогоровской турбулентности в гидродинамике при отсутствии перемежаемости скейлинговая экспонента равна $g_k(m) = m / 3$. В случае однородной, изотропной, спиральной турбулентности в гидродинамике при отсутствии перемежаемости для скейлинговой экспоненты имеем выражение $g_h(m) = 2m / 3$.

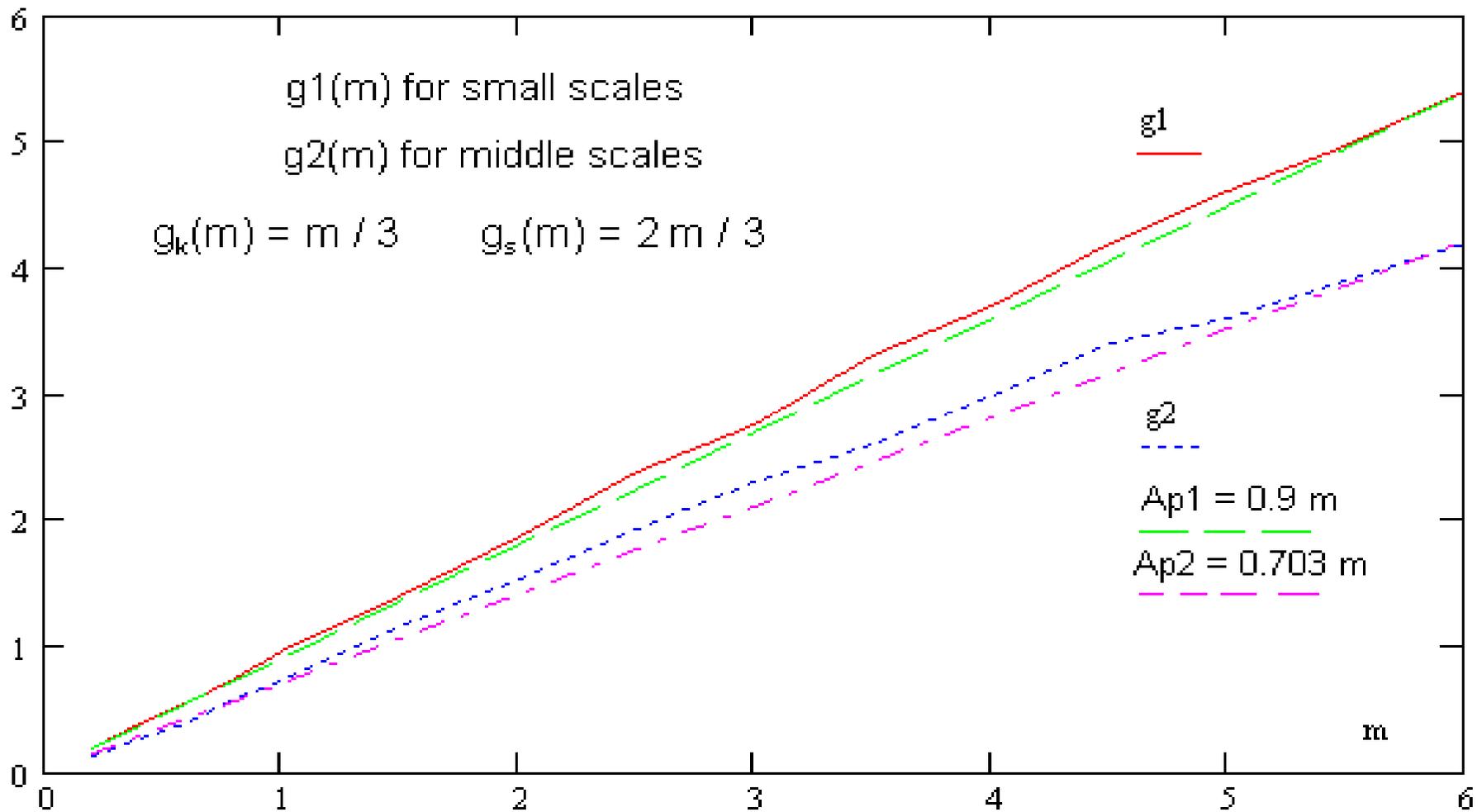


Рис.12. Графики скейлинговых экспонент $g_1(m)$ и $g_2(m)$ с их аппроксимациями A_{p1} и A_{p2} .

Заключение

Результаты выполненного анализа состоят в следующем. Используя экспериментальные данные зондовых измерений высотного профиля электрического поля $E_z(z)$ в грозовой облачности для высот z до $h = 16 \text{ km}$ произведена оцифровка экспериментальных кривых с переменным шагом по высоте. Новая выборка E_i использована для последующей разработки аналитических аппроксимаций $E_a(z)$ на основе системы локализованных по высоте функций со свободными параметрами. Аналитические аппроксимации позволяют вычислять, в частности, объемную плотность электрического заряда $\rho_a(z)$ и электрический потенциал $U_a(z)$. Графики поля $E_z(z)$ и объемной плотности электрического заряда $\rho_a(z)$ демонстрируют достаточно сильные вариации по высоте на характерных масштабах в интервале $\delta z \sim (10 \div 200) \text{ m}$.

Проведена оцифровка аналитических функций $E_a(z)$, $\rho_a(z)$ в слоях $z_i = \ell i$, $1 \leq i \leq N$ где $N = h / \ell$, для $z < h$ с шагом по высоте $\ell = 10 \text{ m}$.

Вычислены структурные функции $S_m(n)$ для порядков $m = 1, 2, 3, 4, 5, 6$. На основе структурных функций показано наличие инерционных интервалов для электрических флуктуаций и получены оценки для скейлинговых экспонент $g(m)$. Исследование нормированных структурных функций указывает на присутствие электрических когерентных структур в заряженных подсистемах атмосферных вихрей.

Проведенное исследование улучшает наши представления о структурных характеристиках электрических вариаций в заряженных подсистемах интенсивных атмосферных вихрей. Полученные результаты могут быть использованы, в частности, для последующих оценок вклада заряженных подсистем атмосферных вихрей в генерацию крупномасштабной спиральности, в формирование устойчивой, самосогласованной, неоднородной структуры ветровых потоков в долгоживущих о вихревых объектах.

Из проведенного анализа следует вывод о необходимости измерения электрических параметров атмосферных вихрей с высоким пространственным разрешением – порядка 10 м.

Настоящее исследование представляет интерес также с точки зрения разработки упрощенных физико-математических моделей интенсивных вихрей, в частности, с использованием эффективных схем параметризации, учитывающих роль заряженных подсистем вихря, а также для поиска возможностей влияния на их динамику.

Настоящая работа выполнена при поддержке Отделения физических наук РАН в рамках программы ОФН-12.

Литература

11. Moiseev S.S., Sagdeev R.Z., Tur A.V., Khomenko G.A., Shukurov A.M. The physical mechanism of vertical perturbation amplification in the atmosphere. Doklady Akademii Nauk. 1983. V.273. No 3. P.549-552. (in Russian).
22. Moiseev S.S., Chkhetiani O.G. The helical scaling of turbulence. JETP. 1996. V.110. No.7. P.357-371. (in Russian)

3. Branover H., Moiseev S.S., Golbraikh E., Eidelman A. Turbulence and Structures: Chaos, Fluctuations, and Helical Self-Organization in Nature and Laboratory. San Diego: Academic Press. 1999. 270 P.
4. Arteha S.N., Golbraikh E., Erokhin N.S. On the Role of Electromagnetic Interactions in Dynamics of the powerful Atmospheric Vortices. Problems of Atomic Science and Technique. 2003. № 4. P.94-99. (in Russian).
5. Arteha S.S., Erokhin N.S. Electric Structures Influence on the Atmospheric Spiral Vortices Stability. Proceedings 9-nd International Symposium on Ball Lightning (ISBL-06). Eds. by G.C.Dijkhuis, D.K.Callebaut & M.Lu. Eindhoven University of Technology. Eindhoven. The Netherlands. 2006. P.3-9.
6. Arteha S.N., Erokhin N.S. Analytical models of small-scale stratification of charged subsystems in atmospheric vortices. Proceedings of the "VI Russian Conference on the Atmospheric Electricity". Nizhnii Novgorod. IAP RAS. 2007, P.103-104.

7. 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.
8. Marshall T.C., Rust W.D. Electrical Structure and Updraft Speeds in Thunderstorms over the Southern Great Plains. Journal of Geophysical Research. 1995. V.100. P.1001-1015.
9. Handbook of Turbulence. Eds. W.Frost and T.H.Moulden. Plenum Press. New York and London. 1977. 535 P.
10. 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.

Благодарю за внимание !!