

ГЕНЕРАЦИЯ СПИРАЛЬНЫХ СТРУКТУР В ПРИСУТСТВИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР В АТМОСФЕРНОЙ ГРОЗОВОЙ ОБЛАЧНОСТИ

Николай Ерохин¹, Сергей Артеха¹, Людмила Михайловская¹, Румен Шкевов²

¹Институт космических исследований – Российская академия наук

²Институт космических исследований – Болгарская академия наук
e-mail: nerokhin@mx.iki.rssi.ru

SPIRAL STRUCTURES GENERATION IN THE PRESENCE OF ELECTRIC STRUCTURES IN CLOUDY ATMOSPHERE

Nikolay Erokhin¹, Sergey Arteha¹, Ludmila Mikhailovskaya¹, Roumen Shkevov²

¹Space Research Institute – Russian Academy of Sciences

²Space Research Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: nerokhin@mx.iki.rssi.ru

Ключевые слова: Пространственные распределения электрических полей, генерация спиральности, атмосферные вихри, профили электрического потенциала, объемная плотность заряда, профили вертикального электрического поля, грозовая облачность

Key words: Electric fields spatial distributions, spiral generation, atmospheric vortexes, electric potential structures, charge volume distribution, vertical electrical field profile, storm overcast

Аннотация: Экспериментальные наблюдения свидетельствуют о наличии в интенсивных атмосферных вихрях протяженных заряженных областей и сильных электрических полей, которые необходимо учитывать при моделировании динамики ТЦ включая генерацию спиральности. При этом для численных расчетов требуются пространственные распределения электрических полей и плотностей зарядов. В настоящем докладе представлены результаты аналитических аппроксимаций некоторых измерений высотного профиля вертикального электрического поля в грозовой облачности атмосферы, что представляет интерес для численных расчетов вклада электрических структур вихря в генерацию и устойчивое поддержание неоднородных спиральных ветровых движений. Была выполнена оцифровка данных по высотному профилю вертикального электрического поля, затем получена аналитическая аппроксимация экспериментальной кривой в классе локализованных функций и на ее основе определены высотные профили электрического потенциала и объемной плотности заряда. В области тропосферы перепады потенциала составили величину порядка сотен МэВ, а объемные плотности заряда – порядка десятков нКл / м³.

Abstract: The experimental observations manifest an existence inside intensive atmospheric vortexes of extended charged areas and strong electrical fields, which is necessary to take into account for modeling process of the tropical cyclone dynamics, including spiral generation. Moreover, in numerical calculations of electric fields spatial distributions and charges density are required. Analytical approximations, results of some high-altitude profile measurements of the vertical electrical field in atmosphere storm overcast are presented. It is very interesting for the numerical calculations of contribution of the vortex electrical structures in generation and steady maintenance of non-uniform spiral wind movements. The data digitization of high-altitude vertical electric field profile has been made. Then the experimental curve of analytical approximation in a class of localized functions is received. On that base a high-altitude profile of electric potential and charge volume distribution are determined and plotted. The amplitude of the potential differences in troposphere are in order of hundreds MeV and charge volume distribution - in order of tens nC/m³.

Содержание работы

На изучение природы ураганов, тайфунов, тропических циклонов (ТЦ) и других кризисных атмосферных процессов во многих странах мира выделяется значительное количество сил и средств, а на устранение последствий данных стихийных бедствий – еще больше. Несмотря на имеющийся прогресс в области исследования ТЦ, ситуация остается далекой от создания исчерпывающей алгоритмической теории, не говоря уже о возможности влияния на генезис ТЦ (его траекторию, другие характеристики). Кроме того, экспериментальные наблюдения свидетельствуют о наличии в

структуре ТЦ и торнадо протяженных заряженных областей и сильных электромагнитных полей. Следовательно, все характеристики вихрей надо рассматривать самосогласованно.

Однако исследования атмосферного электричества выделены в отдельную область, рассматриваемую как частное следствие погодных явлений.

Отметим, что микрофизические процессы в облаках могут быть инициированы космическим излучением. Так несмотря на малость потока космических лучей по сравнению с электромагнитным излучением Солнца (на 8 порядков), они играют важную роль как источник ионизации на высотах от 3 км до 35 км поскольку продуцируют образование ионов, влияющих на электрические свойства атмосферы, образование грозových облаков, глобальную электрическую цепь. Отметим также, что солнечная активность модулирует поток космических лучей.

Для организации численных расчетов электрогидродинамических уравнений вихря и уравнений для генерации спиральности, необходимо знать пространственные распределения электрических полей и плотностей зарядов. Это можно выполнить с помощью аналитических аппроксимаций данных, полученных из наземных, самолетных и спутниковых измерений.

Поскольку нас интересует прежде всего крупномасштабная структура движений, поэтому и плотности зарядов и поля могут браться сглаженными по некоторым характерным масштабам. Однако мелкомасштабная структура, характеризующая локальные быстро пульсирующие изменения параметров, также будет давать усредненные нелинейные вклады в корреляторы уравнений движения атмосферы и тем самым влиять на динамику крупномасштабных движений.

В настоящей работе на основе имеющихся экспериментальных данных была выполнена оцифровка графического материала (вертикальные профили электрического поля) и разработаны аналитические аппроксимации для вертикальных профилей электрического поля плазменных подсистем крупномасштабного вихря в области высот до 16 км. Затем были проведены расчеты вертикального профиля объемной плотности электрического заряда и возникающих электрических потенциалов.

Характерные объемные плотности электрического заряда в грозовой облачности оказались в диапазоне от единиц до десятков нанокулон на кубический метр, а возникающие электрические потенциалы менялись в диапазоне от единиц до сотен МВ. Следует заметить, что объемные плотности электрического заряда могут быть больше на один-три порядка величины.

Полученные результаты могут быть использованы в целях последующих исследований электромагнитных механизмов генерации вращения и формирования спиральных движений в крупномасштабных вихрях включая тропические ураганы.

Проводимые исследования важны для понимания наблюдаемой динамики формирования ТЦ, разработки методик прогнозирования опасных природных явлений и технологий мониторинга зон тайфунотропа, а также для поиска возможностей воздействия на развитие кризисных атмосферных процессов.

При построении аналитических аппроксимаций для электрических характеристик грозовой облачности атмосферы использовались данные измерений электрического поля в грозовой облачности над территорией США.

Так на рис.1 приведен типичный вертикальный профиль измеренного электрического поля $E(z)$ в области высот $z \in (3,21 \div 5,63)$ км. Максимальные напряженности в данном случае были порядка 50 кВ/м. Отметим сильную мелкомасштабную изменчивость поля $E(z)$ на вертикальных масштабах порядка десятков метров. При оцифровке графика на рис.1 для учета мелкомасштабных вариаций электрического поля было использовано 110 неравномерно распределенных точек. График поля $E_a(z)$ по результатам оцифровки дан на рис.2. Аналитическая аппроксимация электрического поля искалась в виде следующего набора локализованных функций: $E_a(z) = \sum_n g_n(z)$, где $g_n(z)$ локализованные в окрестности некоторых высот функции.

Всего было использовано 11 таких функций, в частности,

$$g_2(z) = 12,4 / [1 + (10 \cdot z - 54,3)^2], \quad g_{11}(z) = \sum_m A_m / [1 + \chi_m (10 \cdot z - c_m)^2],$$

где суммирование по m происходит в интервале $1 \leq m \leq 6$, $A_1 = 4$,

$$A_2 = -3, \quad A_3 = 3, \quad A_6 = -4,3, \quad A_4 = A_5 = 2,5, \quad \chi_1 = \chi_2 = \chi_3 = 200, \quad \chi_4 = \chi_6 = 300,$$

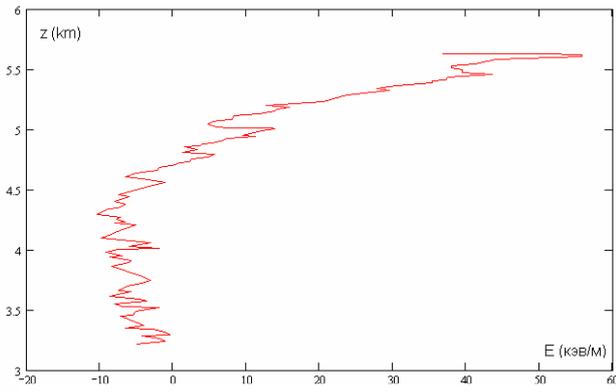


Рис. 1. Вертикальный профиль измеренного электрического поля $E(z)$ в области высот $z \in (3,21 \div 5,63)$ км

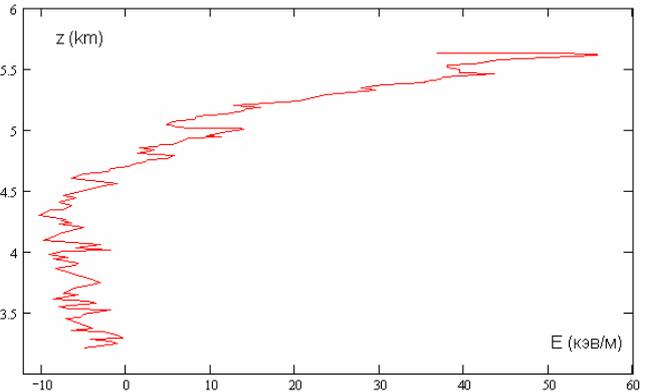


Рис. 2. График поля $E_a(z)$ по результатам оцифровки

$$\chi_5 = 100, c_1 = 47,7, c_2 = 45,06, c_3 = 45,55, c_4 = 53,26, c_5 = 51,5, c_6 = 52.$$

В целях сравнения и демонстрации качества аппроксимации графики экспериментально измеренного поля $E(z)$ и его аналитической аппроксимации $E_a(z)$ представлены на рис.3. Как видим, с учетом погрешности измерений, получилось довольно хорошее соответствие кривых. На основе разработанной аналитической аппроксимации $E_a(z)$ были вычислены высотный профиль перепада электрического потенциала и объемная плотность электрического заряда исходя из следующих формул:

$$\delta U(z) = \int_h^z dz' E_a(z'), \quad \rho(z) = -(1 / 36 \pi) dE_a(z) / dz,$$

где поле E измеряется в keV / m , высота z в km , перепад потенциала $\delta U(z)$ в MB , а объемная плотность электрического заряда $\rho(z)$ в $\text{нКл} / \text{м}^3$. Графики $\delta U(z)$ и $\rho(z)$ представлены на рис.4, рис.5 и рис.6. В рассматриваемом случае максимальная величина перепада электрического потенциала порядка 10 МэВ , характерное значение объемной плотности электрического заряда порядка единиц $\text{нКл} / \text{м}^3$ с максимумом в верхней части слоя порядка $20 \text{ нКл} / \text{м}^3$. Важно иметь в виду, что в грозовой облачности наблюдаются и гораздо большие (на один-три порядка величины) объемные плотности электрического заряда. Отметим достаточно плавный профиль потенциала $\delta U(z)$ и сильные мелкомасштабные флуктуации объемной плотности заряда $\rho(z)$.

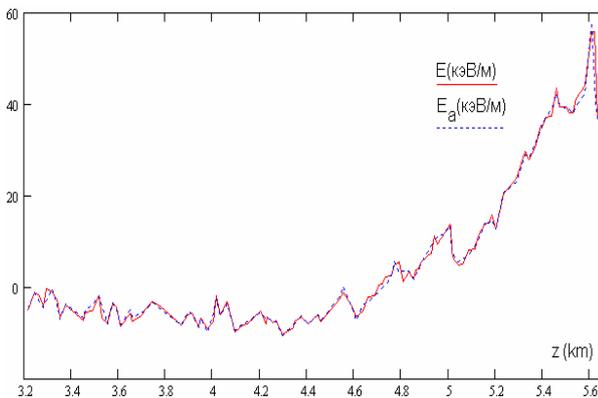


Рис. 3. Экспериментально измеренное поле $E(z)$ и его аналитической аппроксимации $E_a(z)$

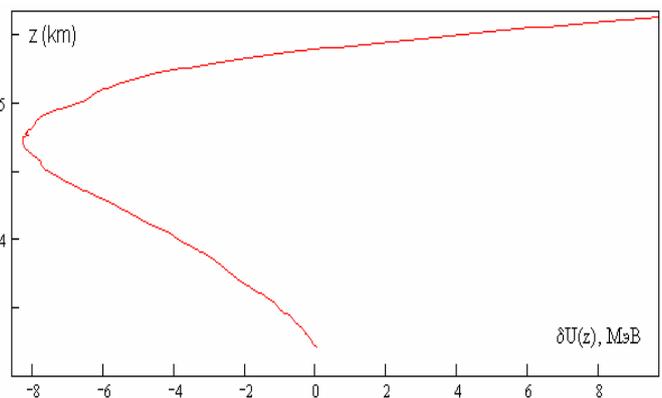


Рис. 4. Перепад потенциала $\delta U(z)$ в MB в зависимости от высоты z в km .

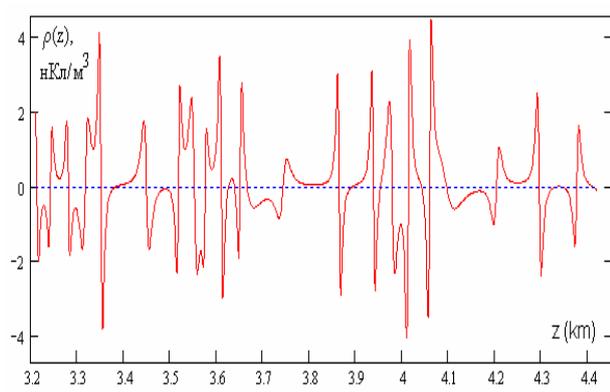


Рис. 5. Объемная плотность электрического заряда $\rho(z)$ в нКл/м³ в зависимости от высоты $3.2 < z \text{ [km]} < 4.4$.

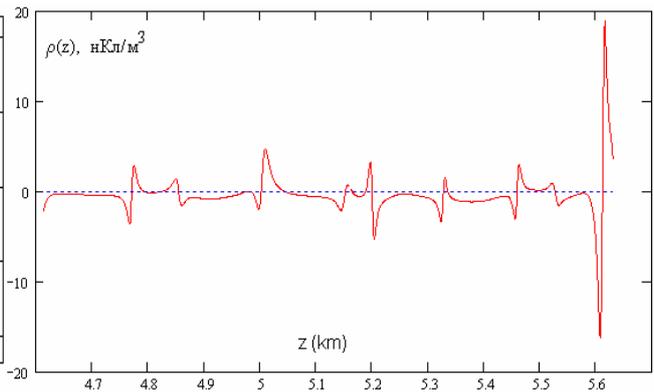


Рис. 6. Объемная плотность электрического заряда $\rho(z)$ в нКл/м³ в зависимости от высоты $4.2 < z \text{ [km]} < 5.6$.

Другой случай аналитической аппроксимации измерений электрического поля в диапазоне высот $0,364 < z / \text{km} < 15,424$ представлен ниже на рис.7. Вычисленные на основе полученной аппроксимации высотные профили перепада электрического потенциала и объемной плотности электрического заряда даны на рис.8, рис.9, а на рис.10 для верхней части области измерений. Согласно рис.8 в средней части заряженной области перепад электрического потенциала составил значительную величину, порядка 240 МВ. Отметим также сильные флуктуации объемной плотности электрического заряда.

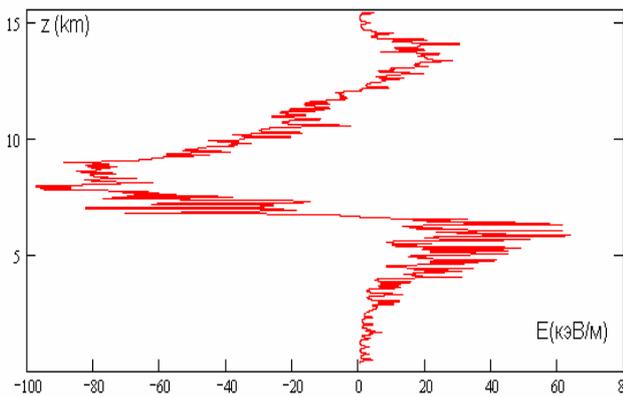


Рис. 7. Аналитическая аппроксимация измерений электрического поля в диапазоне высот $0,364 < z \text{ [km]} < 15,424$.

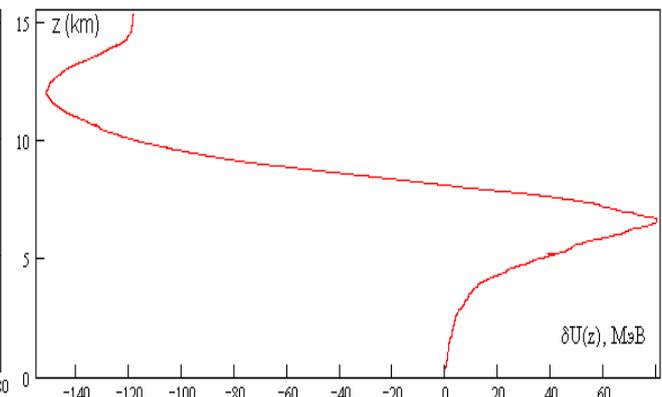


Рис. 8. Высотный профиль перепада электрического потенциала в диапазоне высот $0 < z \text{ [km]} < 15,424$.

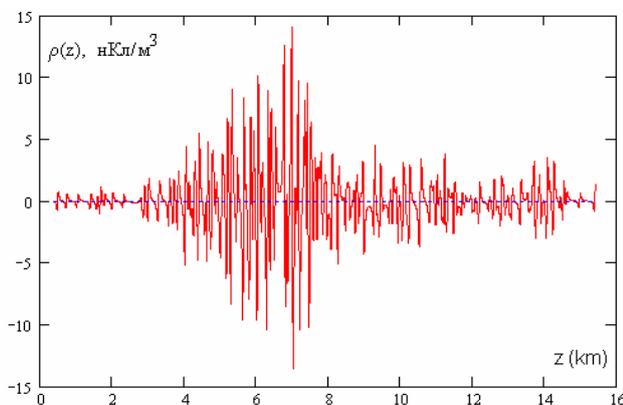


Рис. 9. Профиль объемной плотности заряда в диапазоне высот $0 < z \text{ [km]} < 14$.

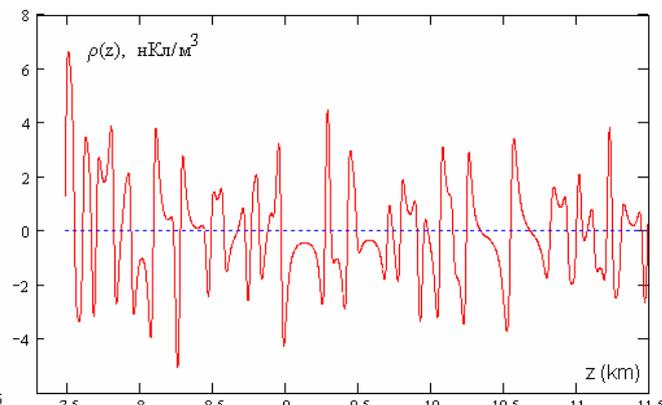


Рис. 10. Профиль объемной плотности заряда в диапазоне высот $7.5 < z \text{ [km]} < 11.5$.

Снова плазмоподобная подсистема вихря является сильно стратифицированной с характерными вертикальными размерами положительно и отрицательно заряженных слоев в десятки и первые сотни метров. Аналогичные результаты получены и для других измерений вертикального электрического поля в грозовой облачности, в частности, аналитические аппроксимации $E(z)$ имеются для профиля поля, показанного на рис.11 в диапазоне высот $0,228 < z / \text{km} < 11,62$.

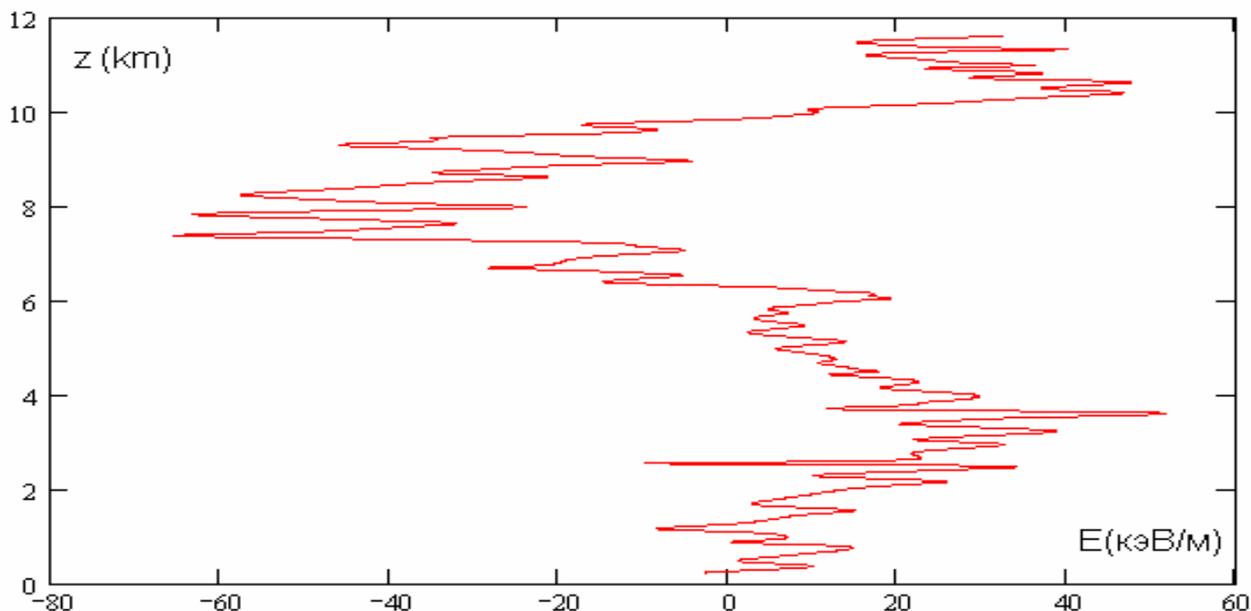


Рис. 11. Аналитическая аппроксимация электрического поля $E(z)$ в диапазоне высот $0,228 < z / \text{km} < 11,62$

Заключение

В настоящем докладе представлены результаты разработки аналитических аппроксимаций для экспериментальных данных по регистрации вертикального электрического поля и вычисленные на их основе высотные профили электрического потенциала и объемной плотности заряда в грозовой облачности. Результаты данного анализа необходимы для последующих детальных исследований по динамике крупномасштабных спиральных вихрей в атмосфере включая дальнейшую разработку аналитических аппроксимаций для определяющих характеристик плазменных подсистем крупномасштабного вихря (включая профиль электрического потенциала) и исследованию влияния заряженных плазмоподобных систем атмосферы на генерацию спиральности и формирование неоднородных спиральных крупномасштабных движений. Кроме того это необходимо для развития методик численных расчетов энергетических и спиральных характеристик поля скорости в условиях возникновения спиральновихревой неустойчивости атмосферы.

Литература

1. Riehl H. Tropical Meteorology. – Mc Graw-Hill, 1954
2. Хаин А.П., Г.Г. Сутырин. Тропические циклоны и их взаимодействие с океаном. – Л: Гидрометеиздат, 1983.
3. Моисеев С.С., Р.З. Сагдеев, А.В. Тур и др. ДАН, 1983, т.273, с.549.
4. Моисеев С.С., Р.З. Сагдеев, А.В. Тур и др. ЖЭТФ, 1983, т.85, 1979.
6. Stozhkov Y.I., J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 29 (2003), p.913.
7. Николаенко А. П., М. Хайякава. Радиофизика, 1998, т.16, №6, с. 699.
8. Чижелски Р. Физика атмосферы и океана, 1999, т. 35, N 2, с.174.
9. Чхетиани О.Г., С.С. Моисеев, Гольбрайх Е. ЖЭТФ, 1998, т.114, с.946.
10. Артеха С.Н., Е. Гольбрайх, Н.С. Ерохин. Вопросы атомной науки и техники, 2003, № 4, с. 94.
11. Артеха С.Н., Н.С. Ерохин. Электромагнитные Явления, 2005, т.5, с.3.
12. Byrne G.J., A.A. Few, M.F. Stewart. Jour. Geophys. Res., 1989, v.94, p.6297.
12. Black R.A., J. Hallet. Jour. Atmos. Sciences, 1999, № 11, p.2004.
13. Davydenko S.S., E.A. Mareev, T.C. Marshall. Stolzenberg M. Jour. Geophys. Res., 2004, v.109, D11103, 10 p.
14. Stolzenberg M., T.C. Marshall, W.D. Rust, B.F. Smith. Mon. Weather Rev., 1994, p.1777.