

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ КРУПНОМАСШТАБНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ВИХРЕЙ И ИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

MODELING OF TIME DYNAMICS OF LARGE-SCALE ATMOSPHERIC VORTEXES AND THEIR ELECTRIC CHARACTERISTICS

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

Институт космических исследований РАН

The analysis of modified small-parameteric mathematical model describing the tropical hurricane full life cycle has been performed. It has been shown that under the suitable choice of the system incoming parameters this model reproduces realistically enough the main features of the spiral vortice temporal dynamics. It is noted the possibility of this model generalization to describe the seasonal behaviour of regional large-scale cyclogenesis. The model studied may be used to analyze the solar-terrestrial relationships influence on the dynamics of crisis atmospheric phenomena like tropical cyclones. It is considered the vertical structure of thundercloud system electric parameters. The analytical approximations of some experimental data on cloud electric fields have been elaborated for the altitude range up to 16 km. On the basis of these approximations the altitude profiles of volume electric charge density and electric potential arising in the atmospheric vortices have been calculated. The small-scale structure of altitude distribution of volume electric field charge density has been obtained but the electric potential has very smooth profile. The calculations performed are necessary to the following study on the basis of electro-hydrodynamics the dynamics and the development of crisis atmospheric processes and their correlation relationships with the solar-magnetosphere activity.

Введение

В проблеме солнечно-земных связей одним из главных является вопрос о влиянии этих связей на динамику крупномасштабных вихревых процессов в атмосфере кризисного характера типа тропических ураганов (см., например, [5, 10, 13, 14]). В виду относительной малости числа региональных атмосферных кризисных событий (ТЦ) на временных интервалах порядка десятка лет для анализа статистических закономерностей, в частности, спектральных характеристик, а также корреляционных связей между солнечной активностью и интенсивностью циклогенеза необходима разработка малопараметрических моделей, описывающих временную динамику отдельного ТЦ. Наиболее простая модель формирования урагана и его квазистационарной стадии, содержащая систему нелинейных уравнений для максимальной скорости ветра и температуры поверхности океана в ТЦ, была предложена в работе [6]. Ее обобщение для полного жизненного цикла урагана проведено в работе [3], а учет конкуренции двух ТЦ в заданном регионе рассмотрен в работе [7]. В настоящем сообщении продолжен анализ полного жизненного цикла ТЦ для других исходных параметров задачи, в частности, изучен случай, когда в начальном состоянии для слабого спирального возмущения еще не выполнены условия интенсификации вихря и неустойчивость развивается позднее. Поскольку ранее, например, в работе [1] было показано, что в динамике формирования мощных спиральных вихрей типа ураганов важную роль могут играть заряженные подсистемы ТЦ, способствующие генерации спиральности и поддержанию наблюдаемой неоднородной структуры вихря, необходимо развивать модели ТЦ с учетом вкладов электрических взаимодействий. Для численных расчетов и оценок этих вкладов требуются пространственные распределения объемной плотности электрического заряда и возникающих электрических полей. На данном этапе исследований, ниже используя экспериментальные данные по регистрации электрического поля в грозовой облачности, представлены результаты разработки аналитической аппроксимации измеренного электрического поля, по которым затем вычислены вертикальные профили объемной плотности электрического заряда $\rho(z)$ и электрического потенциала $U(z)$. Оказалось, что потенциал $U(z)$ имеет плавный профиль, однако функция $\rho(z)$

содержит сильные мелкомасштабные флуктуации, которые могут быть эффективным источником генерации средней спиральности в урагане. Отметим, что именно спиральность, определяемая формулой $\mathbf{v} \text{ rot } \mathbf{v}$, способствует повышенной устойчивости возбуждаемого в атмосфере крупномасштабного вихря (см., например, работы [2, 4, 8]).

1. Временная динамика возмущений для полного жизненного цикла ТЦ

Для анализа полного жизненного цикла урагана используем следующую систему нелинейных уравнений для максимальной скорости ветра $V(t)$ и температуры поверхности океана $T(t)$ в ТЦ

$$dV / dt = \gamma \cdot (T - T_*) \cdot V - \sigma \cdot V^2, \quad dT / dt = -\beta \cdot (T - T_1) \cdot V^2 + (T_f - T) / \tau.$$

Выбор значений параметров γ , σ , β , τ , температур T_* , T_1 и функции $T_f(t)$ был обоснован ранее в работах [3, 6], скорость $V(t)$ измеряется в м / сек, температура $T(t)$ в °С, время t в сутках. Интенсификация слабых возмущений скорости начинается при температурах T выше порогового значения T_* . Полагаем $T_* = 26,5$ °С, $T_1 = 23$ °С. Чтобы учесть изменение фоновых условий для переменной равновесной температуры T_f в расчетах бралась функция $T_f(t) = T_0 + \delta T_1 [1 + \text{th } s_1(t)] - \delta T_2 [1 + \text{th } s_2(t)]$, где δT_1 , δT_2 характерные значения изменения T_f , $s_1(t) = (t - t_1) / \tau_1$, $s_2(t) = (t - t_2) / \tau_2$. Рассмотрим случай, когда начальное значение $T_f = T_0$ ниже порогового значения T_* , затем увеличение T_f приводит к развитию неустойчивости и интенсификации слабого возмущения. Однако последующее снижение T_f ниже порогового значения, обусловленное, например, смещением ТЦ в область более холодной воды, дает затухание сильного вихря. Результаты численных расчетов, например, при выборе исходных параметров $T_0 = 25$, $\delta T_1 = 1,4$, $\delta T_2 = 1,5$, $\tau_1 = \tau_2 = 1$, $t_1 = 3$, $t_2 = 18$ и $V(0) = 0,3$ показаны на рис.1 типичными графиками скорости и температуры.

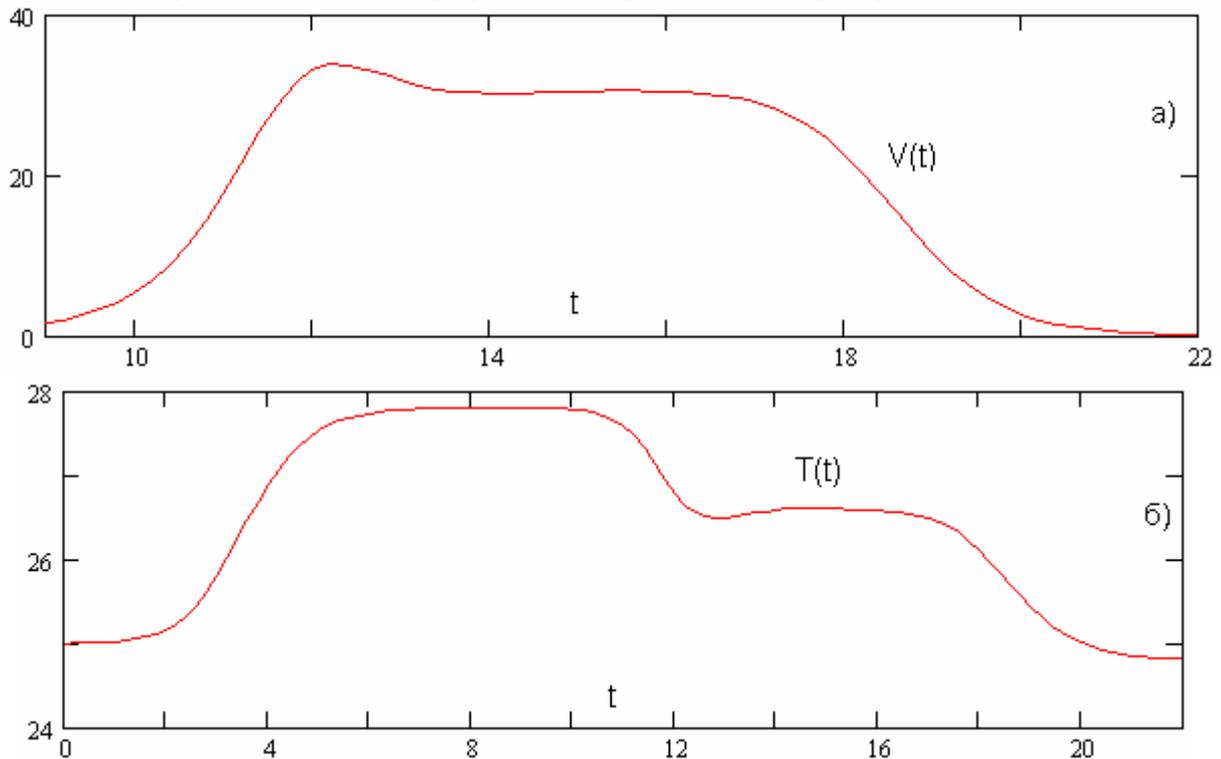


Рис.1. Временная динамика урагана. Полный жизненный цикл.

При интенсификации вихря достигается максимальное значение скорости ветра (для данного выбора исходных параметров) $\max V = 33,79$. На квазистационарной стадии ТЦ температура поверхности океана $T \approx 26,6$ т.е. слегка выше порогового значения T_* . Таким образом, использованная выше модель достаточно реалистично воспроизводит

основные особенности эволюции крупномасштабного тропического возмущения типа ТЦ за полный жизненный цикл урагана включая возникновение кризисного состояния, интенсификацию вихря, его квазистационарную фазу и стадию затухания. Выбором исходных параметров задачи можно управлять динамикой ТЦ, в частности, менять максимальную скорость ветра, начало стадии интенсификации возмущения, длительность квазистационарной фазы, время подготовки системы к развитию неустойчивости и пр. Следовательно, на основе модификации данной модели с учетом экспериментальных данных по параметрам крупномасштабных тропических возмущений можно разработать аналитическую модель сезонного хода интенсивности регионального циклогенеза. Предварительная проработка показала, что обобщение модели путем введения эффективного источника и временной вариации входящих параметров позволяет также учесть влияние на крупномасштабный циклогенез солнечно-земных связей, других факторов, например, явления Эль-Ниньо, а, кроме того, получить тренды интенсивности крупномасштабного циклогенеза на временных интервалах порядка 11-летних циклов солнечной активности.

2. Мелкомасштабная структура электрических подсистем атмосферного вихря

Имеющиеся экспериментальные данные (см., например, [9, 11]) свидетельствуют о наличии в структуре интенсивных атмосферных вихрей заряженных подсистем и сильных электрических полей, которые необходимо учитывать при анализе динамике ТЦ, включая возбуждение спиральных движений и поддержание неоднородной структуры мощного вихря [1]. При этом для проведения численных расчетов электрогидродинамических уравнений и уравнений для генерации спиральности, необходимо знать пространственные распределения электрических полей и плотности электрического заряда. В численных исследованиях удобно использовать аналитические аппроксимации данных, полученных из наземных, самолетных и спутниковых измерений.

В указанной связи на основе ряда 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. Аналитическая аппроксимация электрического поля искалась в виде $E(z) = \sum_n g_n(z)$, где $g_n(z)$ локализованные в окрестности некоторых высот z_m функции $g_m(z) = A_m / [1 + \chi_m (z - z_m)^2]$, параметр χ_m характеризует толщину области локализации функции $g_m(z)$, A_m ее амплитуду. Затем на основе этих аппроксимаций были выполнены расчеты вертикального профиля объемной плотности электрического заряда в вихре $\rho_q(z)$ и возникающих электрических потенциалов $\delta U(z)$ исходя из следующих формул

$$\delta U(z) = \int_h^z dz' E(z'), \quad \rho_q(z) = - (1 / 36 \pi) \times dE / dz ,$$

где поле E измеряется в keV/m, высота z в km, перепад потенциала $\delta U(z)$ в МэВ, плотность электрического заряда $\rho(z)$ в нКл / м³.

В рассмотренных примерах характерные объемные плотности электрического заряда оказались в диапазоне от единиц до десятков нанокulon на кубический метр, а возникающие электрические потенциалы менялись в диапазоне от единиц до десятков МэВ в слоях с характерной толщиной δz порядка километров. В качестве иллюстрации изложенного на рис.2 представлены типичные примеры высотных профилей вертикального электрического поля $E(z)$, возникающих электрических потенциалов $\delta U(z)$ и объемной плотности электрического заряда $\rho_q(z)$. Согласно рис.2 в средней

части заряженной области перепад электрического потенциала составил величину, порядка 200 МэВ. Обратим внимание на сильные флуктуации объемной плотности электрического заряда, представленные на рис.2в.

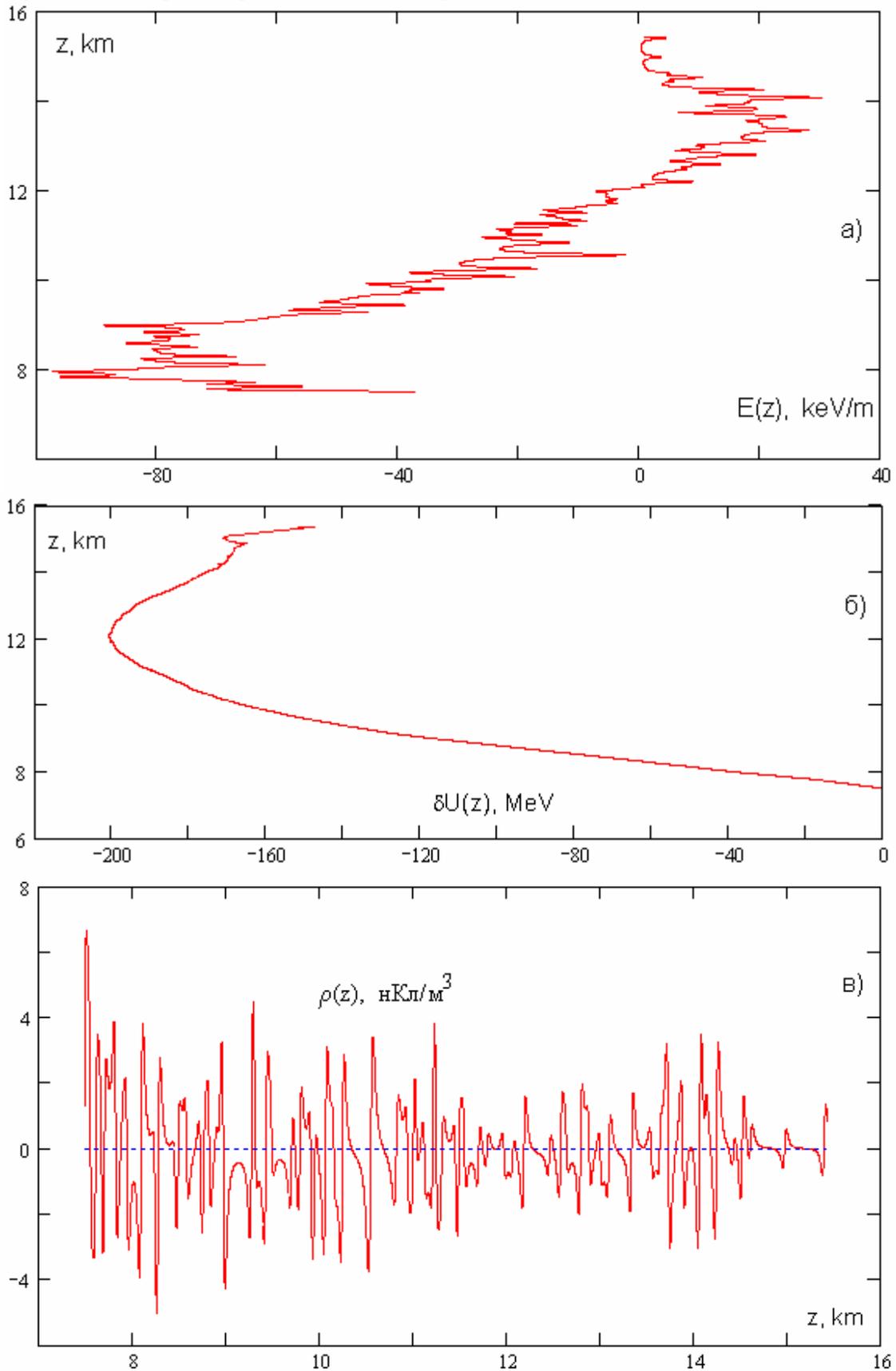


Рис.2.

Таким образом, из выполненных расчетов следует, что плазмоподобная подсистема атмосферного вихря является сильно стратифицированной по высоте с характерными вертикальными размерами положительно и отрицательно заряженных, вытянутых в горизонтальной плоскости, слоев в десятки и первые сотни метров.

Настоящее исследование представляет интерес для прогнозирования опасных природных явлений типа ураганов и поиска возможностей активного воздействия на данные объекты в целях снижения наносимого ими ущерба. Кроме того, это необходимо для последующих детальных исследований по данной проблеме, включая анализ влияния заряженных плазмоподобных систем атмосферы на генерацию спиральности и формирование крупномасштабных вихревых движений, для развития методик численных расчетов энергетических и спиральных характеристик поля скорости в условиях возникновения спирально-вихревой неустойчивости атмосферы с учетом влияния электрических структур.

Заключение

К изложенному выше можно добавить следующее. Разработка малопараметрических физико-математических моделей жизненного цикла крупномасштабных вихрей типа тропических ураганов представляет интерес для ряда задач, включая исследование особенностей крупномасштабного регионального циклогенеза, развития методик его прогнозирования, для исследований роли солнечно-земных связей в динамике природных атмосферных катастроф, а также при анализе влияния тропических ураганов на крупномасштабную циркуляцию атмосферы.

Корреляционные связи между солнечной активностью и кризисными процессами в нижней атмосфере была замечены сравнительно давно. Однако позднее более детальные исследования на временных интервалах большей длительности выявили их изменчивость, например, они могут ослабевать, исчезать или менять знак [12]. В частности, уменьшив в исходных данных влияние Эль-Ниньо на тропический циклогенез, удалось выявить 11-летнюю цикличность в тропическом циклогенезе северо-западной части Тихого океана и показать, что она находится в противофазе с солнечной активностью. В то же время, в северной Атлантике крупномасштабный циклогенез находится в фазе с солнечной активностью, но эта связь выражена слабее.

Вполне очевидно, что в динамике кризисных атмосферных процессов играют роль целый ряд факторов помимо прямого влияния солнечно-магнитосферной активности. Так, предварительный анализ, выполненный для тихоокеанского региона по данным спутника GOES-7 показал, что наблюдаются статистически значимые корреляции между всплесками рентгеновского излучения Солнца и средними параметрами тайфунов с характерным временем запаздывания реакции нижней атмосферы порядка нескольких суток [12]. Следовательно, наиболее эффективно солнечно-земные связи могут воздействовать на крупномасштабный циклогенез в зонах, где атмосфера чаще находится вблизи порога устойчивости, а действие других факторов заметно ослаблено. Поэтому именно здесь в первую очередь возможен триггерный запуск генерации интенсивных спиральных вихрей.

Список литературы

1. 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.
2. Ерохин Н.С., Моисеев С.С. Общие характеристики и механизмы развития природных кризисных процессов. – В сб. "Проблемы геофизики XXI века", под ред. А.В.Николаева, – М. : Наука, 2003. Т. 1. С. 160-182.
3. Ерохин Н.С., Зольникова Н.Н., Михайловская Л.А. О роли солнечно-земных связей в динамике крупномасштабных кризисных процессов в атмосфере // Международная байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. Труды IX

конференции молодых ученых "Физические процессы в космосе и околоземной среде". – Иркутск : ИСЗФ СО РАН, 2006. С. 28-33.

4. Моисеев С.С., Сагдеев Р.З. Тур А.В., Хоменко Г.А., Шукуров А.М. Физический механизм усиления вихревых возмущений в атмосфере // ДАН СССР. 1983. Т. 273, № 3. С. 549-553.
5. Пудовкин М.И., Распопов О.И. Механизм влияния солнечной активности на нижнюю атмосферу и метеопараметры // Геомагнетизм и аэрономия. 1992. Т. 32. С. 1-22.
6. Ярошевич М.И., Ингель Л.Х. Тропический циклон как элемент системы океан-атмосфера // Доклады АН. 2004. Т. 399, № 3. С. 397-400.
7. Ярошевич М.И., Ингель Л.Х. Опыт "синергетического" подхода к исследованию взаимодействия тропических циклонов // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42, № 6. С. 1-5.
8. 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.
9. 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.
10. Kerntaler S.C, Toumi R., Haigh J.D. Some doubts concerning a link between cosmic ray fluxes and global cloudiness. // Geophysical Research Letters. 1999. V.26. № 7. P.863–865.
11. 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.
12. Pankov V., Gusev A., Pugacheva G., Voitskovsky M., Prokhin V., Martin I. Influence of solar activity on the tropical cyclogenesis in Western Pacific, COSPAR-2006-A-01016; Session C2.1-0049-06.
13. Tinsley B.A. Influence of solar wind on the global electric circuit and inferred effects on cloud microphysics, temperature, and dynamics in the troposphere // Space Science Reviews. 2000. V. 94. P. 231–258.
14. Tsiropoul S. Signatures of solar activity variability in meteorological parameters // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2003. V. 65. P. 469– 482.