

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ В ФРОНТАЛЬНЫХ ОБЛАКАХ

Т.А. Белый

*Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, просп. Акад. Палладина, 32, Киев 03142, Украина,
e-mail: belyit@gmail.com*

Статья посвящена исследованию взаимодействия электрических и микрофизических процессов фронтальной облачности. Исследован механизм обратной связи между укрупнением частиц в облаке и ростом объемного заряда. Получены численные оценки распределения плотности зарядов фронтальных облаков для разных временных интервалов. Показано, что учет процессов коагуляции заметно перераспределяет объемный заряд в облаках. Численный эксперимент проведен с использованием трехмерной прогностической модели фронтальной облачности.

Ключевые слова: численная трехмерная модель, облако, объемные заряды.

Введение. Электрические процессы, протекающие в облаках, различны в зависимости от их физического состояния – формы и стадии развития, распределения температуры, водности и др. Экспериментальным и теоретическим исследованиям электрических процессов и электризации частиц облаков посвящено значительное количество работ [3, 4, 9, 11–12, 16]. Рост облачных частиц и их электризация определяются механизмами взаимодействия частиц между собой и окружающей средой. Электризация частиц, в частности, зависит от свойств конвективных потоков, питающих облако, их мощности и электрической структуры.

Развитие облаков по высоте, появление осадков из них, усиление этих осадков сопровождаются изменениями напряженности электрического поля как внутри самих облаков, так и вовне [14, 18, 19]. Это означает, что образование осадков и грозового электричества напрямую связано с электрическими процессами в облаках и играет существенную роль в эволюции микроструктуры облаков.

Несмотря на значительное число работ, посвященных электрическим процессам в облаках, до настоящего времени остаются малоизученными многие микрофизические и особенно электрические процессы в конвективных облаках. Такое положение дел объясняется их сложностью и существенной недоступностью для экспериментального исследования. В связи с этим разработка численных моделей облаков и изучение на их основе различных проблем облако- и осадкообразования, а также электрических процессов являются важными научно-прикладными задачами.

Настоящая статья посвящена исследованию взаимодействия электрических и микрофизических процессов в конвективных облаках. Результаты расчетов проведены на основе численной модели облаков [7] с детальным учетом термодинамических и микрофизических процессов.

Математическая постановка модели. Микрофизические и термодинамические процессы во фронтальных облаках являются предметом длительных исследований на протяжении многих лет разными научными группами [2, 5, 7, 13, 19]. В последнее десятилетие такие исследования становятся особо актуальными, поскольку возрастают количество неблагоприятных метеорологических явлений, их интенсивность и объемы убытков.

Для получения электрических характеристик конвективной облачности в качестве исходной выступает численная модель облака с детальным учетом термодинамических и микрофизических процессов. Основы модели приведены в работах [6, 10] и сведены в монографии [7].

Моделирование образования и развития в пространстве и времени фронтальных облаков проводилось с помощью интегрирования системы уравнений динамики и термодинамики, а также кинетических уравнений для функции распределения облачных частиц по размеру с учетом ортографии. Базовые уравнения включают в себя [7] следующие уравнения:

- уравнения движения

$$du/dt = lv - P_x/\rho + \Delta u,$$

$$dv/dt = -l(u + u_f) - P_y/\rho + \Delta v,$$

$$dw/dt = -g - P_z/\rho + \Delta w,$$

где P_x, P_y, P_z – градиенты давления по координатам x, y, z ; l – ускорение Кориолиса; g – сила тяжести; ρ – плотность воздуха; u, v, w – проекции скорости ветра на оси x, y, z ;

- уравнение притока тепла

$$dT/dt = \sum_{k=1}^4 \alpha_k \epsilon_k + \alpha_p dp/dt + \Delta T,$$

$$\alpha_k = L_k c_p,$$

$$\alpha_p = (c_p - c_v)/c_p R,$$

где L_k – теплота конденсации ($k = 1, 2$) и сублимации ($k = 3, 4$); c_p – теплоемкость воздуха при постоянном давлении; c_v – теплоемкость воздуха при постоянном объеме; R – газовая постоянная сухого воздуха; ε_k – скорость конденсации водяного пара на облачных ($k = 1$) и дождевых каплях ($k = 2$), кристаллах ($k = 3$), снежных агрегатах ($k = 4$);

- уравнение притока влаги

$$dq/dt = -\sum_{k=1}^4 \varepsilon_k + \Delta q;$$

- уравнение неразрывности

$$\partial \rho u / \partial x + \partial \rho v / \partial y + \partial \rho w / \partial z = 0,$$

$$\rho = P/RT;$$

- кинетические уравнения для функции распределения облачных капель по размеру (микрофизические процессы):

$$\frac{df_1}{dt} = -\frac{\partial}{\partial r}(\dot{r}_1 f_1) + \frac{v_1}{G_0} \frac{\partial f_1}{\partial z} + I_a - I_{f1} - (c_{21} + c_{31}) f_1 + \Delta f_1,$$

$$\frac{df_2}{dt} = -\frac{\partial}{\partial r}(\dot{r}_2 f_2) + \frac{v_2}{G_0} \frac{\partial f_2}{\partial z} - I_{f2} - \frac{\partial}{\partial r}(\dot{r}_{c_{21}} f_2) + \Delta f_2,$$

$$\frac{df_3}{dt} = -\frac{\partial}{\partial r}(\dot{r}_3 f_3) + \frac{v_3}{G_0} \frac{\partial f_3}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial r}(\dot{r}_{c_{31}} f_3) + I_s + I_{f1} + I_{f2} + \Delta f_2.$$

Здесь f_i – функции распределения облачных капель по размерам (f_1 – мелкие капли, f_2 – дождевые капли, f_3 – кристаллы); r – радиусы частиц; $\dot{r}_{c_{ik}}$ – скорости роста отдельных частиц путем конденсации; $\dot{r}_{c_{ik}}$ – скорости роста отдельных частиц путем присоединения (коагуляции) облачных частиц частицами осадков ($i = 2, 3; k = 1$); c_{ni} – количество облачных частиц, захваченных частицами осадков ($n = 2, 3$); v_i – скорость падения частиц; I_a, I_s, I_{f1} – скорости образования капель на ядрах конденсации, кристаллов на ядрах льдообразования и замерзания капель соответственно [17]. G_0 – орографический множитель перехода от прямоугольной вертикальной координаты к орографической [7].

Электрический блок. Объемная плотность электрического заряда ρ в конвективном облаке складывается из трех частей: а) аномально большие заряды крупных капель; б) равновесные заряды мелких облачных капель; в) пространственный заряд ионов воздуха.

Равновесные заряды мелких облачных капель и пространственный заряд ионов дают сравнительно небольшую плотность объемных зарядов. Рост объемного заряда в результате диффузионных процессов и пространственного разделения зарядов при падении мелких капель происходит сравнительно медленно. Иной характер процесса при коагуляционном росте крупных капель. За короткое время в сравнительно тонком слое про-

исходит скопление огромных зарядов, которые до появления крупных капель были рассредоточены по большому объему.

Поэтому для оценки можно предположить, что в области аномально заряженных капель (где происходит активная коагуляция капель) вклад в величину ρ от равновесно заряженных облачных капель и ионов воздуха относительно невелик. Тогда объемная плотность электрического заряда будет для этой области представлена в виде

$$\rho = \sum_k n_k q_k,$$

где q_k – заряд капли радиуса r ; n_k – число аномально заряженных капель радиуса r в единице объема. Суммирование производится по всем размерам аномально заряженных капель, находящихся в данном объеме облака.

Подставив это выражение в уравнение Пуассона, получаем выражение для напряженности электрического поля, создающегося зарядами крупных капель:

$$\frac{dE}{dz} = 4\pi \sum_k n_k q_k.$$

Общую напряженность электрического поля, образованного зарядами крупных капель всех размеров, можно рассматривать как сумму “парциальных” напряженностей E_k , каждая из которых связана с каплями определенного размера. Для каждой из составляющих можно, таким образом, написать (отбрасывая индекс)

$$\frac{dE}{dz} = 4\pi n q.$$

В переохлажденных облаках электрические процессы связаны с различными механизмами льдообразования (замерзанием, аккрецией, коагуляцией, нуклеацией и др.). Заряды в облаках разделены (разделены) согласно размерам капель и кристаллических частиц. Механизм электризации, формирование и накопление электрического заряда в переохлажденных облаках происходят в результате замерзания капель и взаимодействия капель и кристаллов. Вследствие разности скоростей падения в воздухе микроосколков, заряжающихся при взрыве преимущественно положительно, и более крупных частиц, крупы или града, заряжающихся преимущественно отрицательно, происходит пространственное разделение зарядов. В передней части облака преобладает положительный объемный заряд, ниже – отрицательный.

Как показали экспериментальные наблюдения [1], для замерзших капель, диаметр которых больше 200 мкм, процесс электризации капли можно представить в виде выражения

$$q(m) = \alpha m.$$

Здесь m — масса замерзшей капли; α — коэффициент пропорциональности, значение которого изменяется в зависимости от содержания примесей в капле и температуры ее замерзания ($\alpha \approx 3,5 \cdot 10^{-10}$ Кл/г при T от -8 до -16 °C). Для кучевых облаков коэффициент α изменяется в пределах $10^{-10} \div 10^{-8}$ Кл/г.

Так как заряд q вычисляется как функция радиуса, для него удобно перейти к дифференцированию по r :

$$q_+ = b_1 \int_0^\infty m f_i(m) dm = b_1 \int_0^\infty m f_i(r) dr,$$

$$q_- = b_2 \int_0^\infty m f_i(m) dm = b_2 \int_0^\infty m f_i(r) dr,$$

где b_1, b_2 — коэффициенты пропорциональности; f_i — функции распределения облачных капель по размерам (см. выше).

Скорость изменения масс облачных частиц определяется скоростью изменения их радиусов: $dm/dt = 4\pi r^2 dr/dt$. Таким образом, напряженность электрического поля, образованного зарядами заряженных капель, пропорциональна удельному заряду капель и квадрату их радиуса.

Обсуждение результатов. Для численной оценки электрических характеристик облачности рассмотрен случай сильного снегопада, который наблюдался 15 декабря 2009 г. вблизи Одессы ($\varphi = 48^\circ 41'$, $\lambda = 36^\circ 32'$). Термодинамические и микрофизические процессы образования сильного снегопада подробно описаны в работе [8]. В настоящей статье рассмотрены только оценки рас-

пределения плотности объемного заряда в облачности.

При численном моделировании радиус распределения частиц выбирался в пределах 65–135 мкм. Для зимних облаков он выбран равным ~135 мкм. При таком распределении заряды распределяются приблизительно поровну. Распределение зарядов рассчитывалось только для кристаллов, причем кристаллы предполагались сферическими. Такой выбор был сделан в связи с тем, что в момент прохождения снегопада температура в исследуемом регионе была отрицательная [8]. Расчет распределения зарядов проводился для кристаллической фазы, так как она доминировала (рис. 1).

Мощные кристаллические облака, которые достигали по высоте порядка 10 км, имели высокую концентрацию мелких кристалликов у вершин облаков. Это приводило к образованию больших по площади очагов положительных зарядов, которые доминировали над отрицательными. По своей величине массы положительных и отрицательных зарядов близки между собой, однако со временем наблюдается тенденция к увеличению массы отрицательных зарядов.

На рис. 2 представлено пространственное распределение кристаллической облачности и электрических зарядов через 6 ч численного моделирования.

Как показано на рис. 2, наиболее мощные облака наблюдались в случае *б*. По величине в данной области доминировали отрицательные заряды, однако по занимаемой площади превышали положительные заряды. В случае *а* облака находились выше, чем в случаях *б* и *в*, а положительные заря-

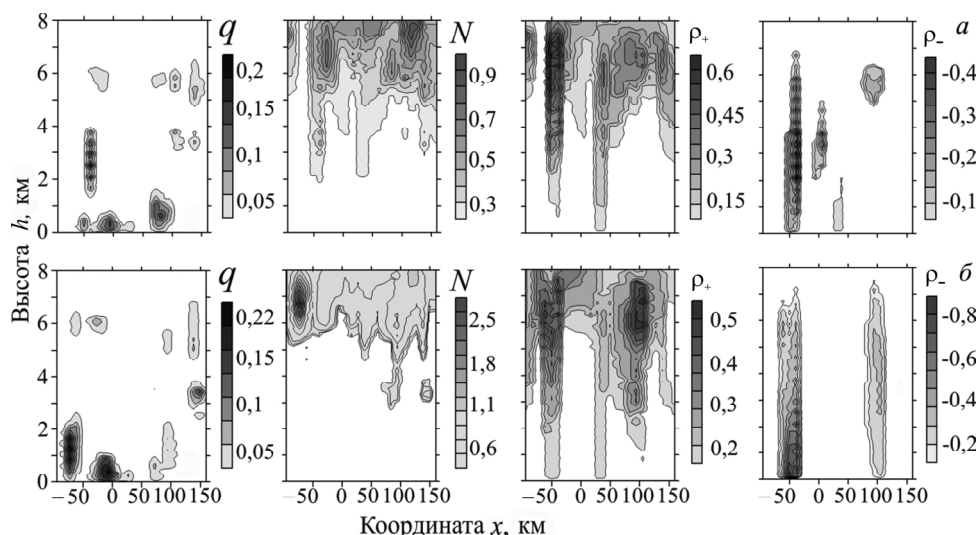


Рис. 1. Временной вертикальный разрез облачных характеристик без учета процессов коагуляции: q — водность, г/кг; N — концентрация кристаллов $10^3/\text{г}$; ρ_+ — положительный объемный заряд, нКл/м³; ρ_- — отрицательный объемный заряд, нКл/м³; a — время эволюции облачности $t = 2$ ч; b — время эволюции облачности $t = 3$ ч

Fig. 1. Time vertical cross-section of cloud characteristics without considering coagulation processes: q — water content, g/kg; N — concentration of crystals, $10^3/\text{g}$; ρ_+ — positive volume charge, nC/m³; ρ_- — negative volume charge, nC/m³; a — time of cloudiness evolution, $t = 2$ h; b — time of cloudiness evolution, $t = 3$ h

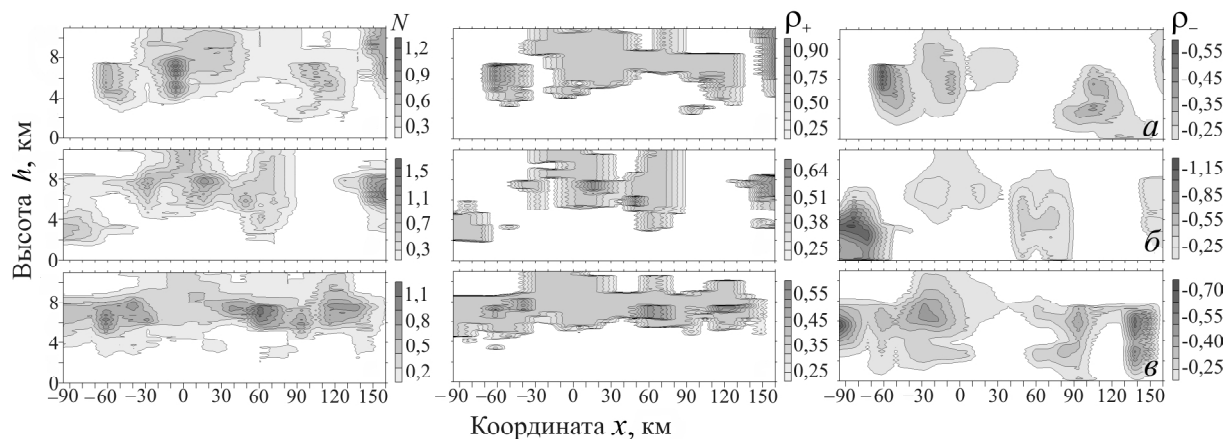


Рис. 2. Пространственный вертикальный разрез кристаллических облаков и электрических зарядов в них. Расстояние между случаями *a–в* составляет 5 км. Условные обозначения см. на рис. 1

Fig. 2. Spatial vertical cross-section of crystalline clouds and electric charges within them: N – concentration of crystals, $10^3/\text{g}$; ρ_+ – positive volume charge, nC/m^3 ; ρ_- – negative volume charge, nC/m^3 . The distance between cases of *a–в* is 5 km

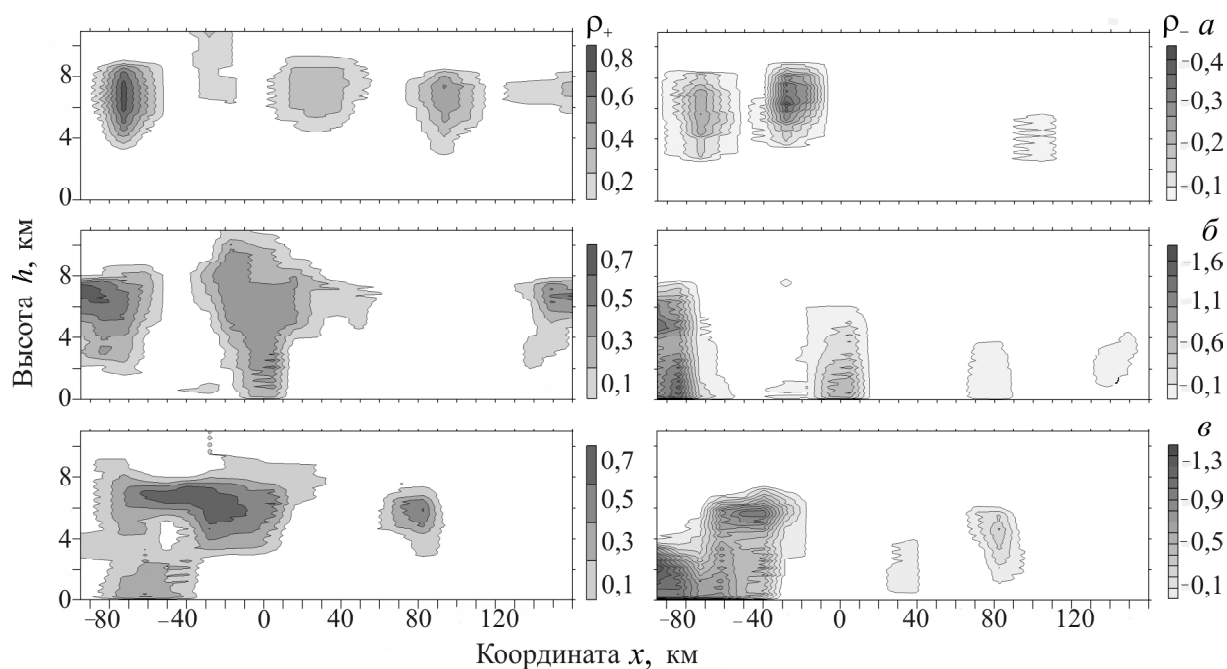


Рис. 3. Пространственный вертикальный разрез электрических зарядов в облаках при учете коагуляции капель с каплями и капель с кристаллами. Условные обозначения см. на рис. 1, 2

Fig. 3. Spatial vertical cross-section of electric charges in clouds with taking into account coagulation of droplets with droplets and droplets with crystals: ρ_+ – positive volume charge, nC/m^3 ; ρ_- – negative volume charge, nC/m^3 . See fig. 2 for line *a–в*

ды по своей величине и площади превышали отрицательные. По форме очаги с отрицательными зарядами чаще всего напоминают отдельные области, размещенные между положительными зарядами или ниже их. Положительные объемные заряды в облаках занимают наиболее широкие площади и чаще имеют овальную форму.

Учет процессов коагуляции существенно не изменил величину зарядов, но заметно изменил их перераспределение (рис. 3). Заряды разделены четче. Положительные заряды занимают меньшую площадь.

Выводы. В статье проведена адаптация трехмерной нестационарной модели фронтальных

облаков с детальным описанием термогидродинамических и микрофизических процессов для оценки электрических характеристик облачности.

Проведены численные эксперименты по исследованию взаимосвязи микрофизических характеристик и электрических процессов в облаках. Исследован механизм обратной связи между укрупнением частиц в облаке и ростом объемного заряда.

Численные эксперименты показали наличие широких площадей положительных объемных зарядов в верхней части облачности и полос отрицательных зарядов в нижний слоях. Слоистость распределения объемных зарядов в облаках хоро-

шо погоджується з отриманими результатами в роботі [15, с. 127]. Положителні заряди частіше всього перевищують негативні заряди за площею. Негативні заряди перевищують позитивні за величиною. Просторово-часове розподілення об'ємних зарядів визначається як мікрофізичними особливостями хмарності, так і еволюцією хмарності з часом.

1. *Аджієв А.Х.* Розподіл електричних зарядів при кристалізації крапель води / А.Х. Аджієв, С.Т. Тамазов // *Метеорологія і гідрологія*. — 1987. — № 7. — С. 57–62.
2. *Буйков М.В.* Чисельне моделювання хмарності різних форм: огляд / М.В. Буйков. — Обнинськ: ВНИИГМИ-МЦД, 1978. — 63 с.
3. *Красногорська Н.В.* Результати вимірювання зарядів частинок опадів у вільній атмосфері / Н.В. Красногорська // *Вісник АН СРСР. Серія геофізична*. — 1956. — № 1. — С. 844–852.
4. *Красногорська Н.В.* Об електричному полі кучових хмар / Н.В. Красногорська // *Вісник АН СРСР. Серія геофізична*. — 1961. — № 9. — С. 1426–1430.
5. *Матвеев Л.Т.* Динаміка хмар / Л.Т. Матвеев. — Л.: Гидрометеоиздат, 1981. — 311 с.
6. *Паламарчук Л.В.* Вивчення внутрішньої структури фронтальних зон за допомогою тривимірних напівемпіричних моделей / Л.В. Паламарчук, А.М. Пірнач // *Тр. УкрНИГМИ*. — 1992. — Вип. 243. — С. 107–124.
7. *Пірнач Г.М.* Чисельне моделювання хмар та опадів у системах атмосферних фронтів / Г.М. Пірнач. — К.: Ніка-Центр, 2008. — 296 с.
8. *Пірнач Г.М.* Чисельне моделювання фронтальних хмар із сильними снігопадами / Г.М. Пірнач, Т.А. Ромаш // *Наукові праці. УкрНДГМІ*. — 2011. — Вип. 261. — С. 18–36.
9. *Шишкін Н.С.* Хмари, опади і грозове електричність / Н.С. Шишкін. — Л.: Гидрометеоиздат, 1964. — 402 с.
10. *Belokobylski A.V.* Numerical simulation of the warm-season frontal clouds over Ukraine / A.V. Belokobylski, A.M. Pirnach // *Proc. 13th ICCP*. — Reno, Nevada, USA, 2000. — P. 1165–1169.
11. *Gunn R.* The electrification of cloud droplets in non-precipitating cumuli / R. Gunn // *Journal of Meteorology*. — 1952. — V. 9. — P. 397–402.
12. *Gunn R.* Diffusion charging of atmospheric droplets by ions and the resulting combination coefficients / R. Gunn // *Journal of Meteorology*. — 1954. — V. 11. — P. 339–347.
13. *Hobbs P.V.* The dynamical and microphysical structure of the occluded front and its modification by orography / P.V. Hobbs, R.A. Houze, T.J. Mateika // *Journal of the Atmospheric Sciences*. — 1975. — V. 32, iss. 8. — P. 1542–1562.
14. *Imyanitov I.M.* Electricity of the free atmosphere / I.M. Imyanitov, E.V. Chubarina. — Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations. — 1967. — 212 p.
15. *Leblanc F.* Planetary Atmospheric Electricity / F. Leblanc, K.L. Aplin, Y. Yair, R.G. Harrison, J.P. Lebreton, M. Blanc. — Dordrecht; Boston; London: Springer, 2008. — 535 p.
16. *Mason B.J.* A critical examination of theories of charge generation in thunderstorm / B.J. Mason // *Tellus*. — 1953. — V. 5. — P. 446–460.
17. *Pirnach A.M.* Construction and application of the various numerical models for study the cloud dynamics and structure of the frontal rainbands / A.M. Pirnach // *Atmospheric Research*. — 1998. — V. 47–48. — P. 355–376.
18. *Problems of atmospheric and space electricity* / Ed. by S.C. Coroniti / *Proceeding of the third international conference on atmospheric and space electricity held at Montreux, Switzerland May 5–10, 1963*. — Amsterdam; London; New York, 1965. — 365 p.
19. *Pruppacher H.R.* Microphysics of clouds and precipitation / H.R. Pruppacher, J.D. Klett. — Dordrecht; Heidelberg; London; New York: Springer, 2010. — 956 p.

Поступила в редакцію 12.02.2016 г.

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ ГУСТИНИ ЕЛЕКТРИЧНИХ ЗАРЯДІВ У ФРОНТАЛЬНИХ ХМАРАХ

Т.А. Білий

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, просп. Акад. Палладіна, 32, Київ 03142, Україна,
e-mail: belyit@gmail.com

Статтю присвячено дослідженню взаємодії електричних і мікрофізичних процесів фронтальної хмарності. Досліджено механізм зворотного зв'язку між укрупненням частинок у хмарі та зростанням об'ємного заряду. Отримано чисельні оцінки розподілу густини зарядів фронтальних хмар для різних часових інтервалів. Показано, що облік процесів коагуляції помітно перерозподіляє об'ємний заряд у хмарах. Чисельний експеримент проведено з використанням тривимірної прогностичної моделі фронтальної хмарності.

Ключові слова: чисельна тривимірна модель, хмара, об'ємний заряд.

T.A. Belyi

Institute of Geophysics, NAS of Ukraine, 32 Palladin Ave., Kiev 03142, Ukraine, e-mail: belyit@gmail.com

Purpose. The increased interest in active influence on clouds and fogs has drawn considerable attention to the possibility of using electric forces for this purpose. In this context, the development of cloud numerical models and the study, based on these models, of various problems of cloud and precipitation formation, as well as electrical processes have become important both in research and application.

Design/methodology/approach. A numerical experiment was conducted using atmosphere radio sounding field data on the basis of the three-dimensional prediction model of the frontal cloud cover. The model includes integr-differential equations with through consideration of thermodynamic and microphysical processes. Developed on the model physical principles, the methods for studying the microphysical and thermodynamic processes in the clouds are aimed at searching for feedback mechanisms between enlargement of the particles in the cloud and space charge growth.

Findings. Within the framework of the frontal cloud cover 3D model, we investigated a feedback mechanism between enlargement of the particles in the cloud and space charge growth. We obtained numerical estimates of the distribution of the front cloud charges density in different time intervals. The numerical experiments showed the presence of broad areas of positive space charges in the upper part of the cloud cover, as well as the presence of the negative charges in the bottom part. The stratified nature of space charges cloud distribution is well consistent with studies by other authors. The positive charge area often exceeds the negative charge area. The negative charges exceed the positive ones by magnitude. The spatiotemporal distribution of the space charges is determined both by microphysical characteristics of the cloud cover and the evolution of the latter over time. Allowance for the coagulation processes noticeably redistributes the space charge in the clouds.

Practical value/implications. The article deals with adaptation of the 3D non-stationary model of the frontal clouds with a detailed description of thermohydrodynamic and microphysical processes in order to estimate the electrical characteristics of the cloud cover. We carried out a series of numerical experiments to study the relationship of the microphysical characteristics and electrical processes in the clouds. We investigated a feedback mechanism between enlargement of the particles in clouds and growth of the space charge. Experimental studies of small-scale inhomogeneities of the space charge and measurements of the spectrum of individual drop size and charge in such inhomogeneities are of practical value for making a more accurate quantitative estimation of the electrical forces effect on non-electrical processes in clouds.

Keywords: three-dimensional numerical model, cloud, volume charge.

References:

1. Adzhiev A.Kh., Tamazov S.T. Separation of electric charges during crystallization of water droplets. *Meteorologiya i Gidrologiya*, 1987, no. 8, pp. 57-62 (in Russian).
2. Buikov M.V. Numerical modeling of stratiform clouds. Obninsk, RIHMI-WDC, 1978, 63 p. (in Russian).
3. Krasnogorskaya N.V. Rezul'taty izmereniya zaryadov chastits osadkov v svobodnoy atmosfere. *Izvestiya AN SSSR. Seriya geofizicheskaya*, 1956, no. 1, pp. 844-852 (in Russian).
4. Krasnogorskaya N.V. Ob elektricheskom pole kuchevyh oblakov. *Izvestiya AN SSSR. Seriya geofizicheskaya*, 1961, no. 9, pp. 1426-1436 (in Russian).
5. Matveev L.T. Dinamika oblakov. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1981, 311 p. (in Russian).
6. Palamarchuk L.V., Pirnach A.M. Issledovanie vnutrenney struktury frontal'nykh zon pri pomoshchi trekhmernykh poluempiricheskikh modeley. *Trudy UkrNIGMI*, 1992, issue 243, pp. 107-124 (in Russian).
7. Pirnach H.M. Chyselne modeliuvannia khmar ta opadiv u systemakh atmosfernykh frontiv. Kyiv, Nika-Tsentr, 2008, 296 p. (in Ukrainian).
8. Pirnach H.M., Romash T.A. Chyselne modeliuvannia frontalnykh khmar iz synymy snihopadamy. *Naukovi pratsi UkrNDHMI*, 2011, iss. 261, pp. 18-36 (in Ukraine).
9. Shishkin N.S. Oblaka, osadki i grozovoe elektrichestvo. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1964, 402 p. (in Russian).
10. Belokobyl'ski A.V., Pirnach A.M. Numerical simulation of the warm-season frontal clouds over Ukraine. *In proceedings 13th ICCP*, Reno, Nevada, USA, 2000, pp. 1165-1169.
11. Gunn R. The electrification of cloud droplets in non-precipitating cumuli, *Journal of Meteorology*, 1952, vol. 9, pp. 397-402.
12. Gunn R. Diffusion charging of atmospheric droplets by ions and the resulting combination coefficients. *Journal of Meteorology*, 1954, vol. 11, pp. 339-347.
13. Hobbs P.V., Houze R.A., Mateika T.J. The dynamical and microphysical structure of the occluded front and its modification by orography. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1975, vol. 32, iss. 8, pp. 1542-1562.
14. Imyanitov I.M., Chubarina E.V. Electricity of the free atmosphere. Jerusalem, Israel Program for Scientific Translations, 1967, 212 p.
15. Leblanc F., Aplin K.L., Yair Y., Harrison R.G., Lebreton J.P., Blanc M. Planetary atmospheric electricity. Dordrecht; Boston; London, Springer, 2008, 535 p.
16. Mason B.J. A critical examination of theories of charge generation in thunderstorm. *Tellus*, 1953, vol. 5, p. 446-460.
17. Pirnach A.M. The construction and application of numerical models to the study of cloud dynamics and the structure of winter frontal rain bands. *Atmospheric Research*, 1998, vol. 47-48, pp. 355-376.

18. Problems of atmospheric and space electricity. Edit by S.C. Coroniti. *Proceeding of the third international conference on atmospheric and space electricity held at Montreux, Switzerland May 5-10, 1963*, Amsterdam; London; New York, 1965, 365 p.
19. Pruppacher H.R. Klett J.D. Microphysics of clouds and precipitation. Dordrecht; Heidelberg; London; New York, Springer, 2010, 956 p.

Received 12/02/2016