

УДК 551.594.2

DOI: 10.23671/VNC.2017.1.9482

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГРОЗАХ В СЕВЕРО-КАВКАЗСКОМ РЕГИОНЕ

© 2017 А. В. Шаповалов¹, д.ф.-м.н., проф., М. Ю. Пашкевич², к.т.н.,
В. И. Рязанов¹, В. А. Шаповалов¹, к.ф.-м.н., Н. А. Березинский², к.ф.-м.н.,
Р. В. Шереметьев², к.ф.-м.н., А. С. Камруков³, к.т.н.

¹Высокогорный геофизический институт, Россия, 360030, Кабардино-Балкарская Республика, г. Нальчик, пр. Ленина, 2, e-mail: atajuk@mail.ru;

²Высокогорный научно-исследовательский испытательный центр авиационной техники и вооружения, Россия, 360030, Кабардино-Балкарская Республика, г. Нальчик, пр. Ленина, 2, e-mail: vniic@rambler.ru;

³Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Россия, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

В работе представлена трехмерная численная модель конвективного облака с учетом электрических процессов. На основе модели получены следующие параметры: плотности объемных зарядов в облаке, потенциал и напряженность электрического поля, создаваемого этими зарядами, детально рассматривается влияние электрического поля облака на микрофизические процессы взаимодействия облачных частиц и обратное влияние – микроструктуры на электрические параметры. Приведены результаты исследований формирования термогидродинамических, микроструктурных и электрических параметров грозовых облаков в Северо-Кавказском регионе.

Ключевые слова: электрические процессы, математическое моделирование, микроструктура облаков и осадков, грозы, град, электризация облаков.

Несмотря на несомненные успехи физики облаков, многие процессы, определяющие формирование микроструктурных и электрических характеристик облаков, до настоящего времени изучены недостаточно. Это относится к процессам появления электрического заряда на каплях и кристаллах в облаках, к влиянию сильного электрического поля на микрофизические процессы, к обратному влиянию – микроструктуры облака на заряд и поле, и к другим процессам. Лабораторные и натурные эксперименты ограничены условиями безопасности специалистов и оборудования. Исследование этих сложных процессов требует широкого применения математического моделирования.

Целью работы является исследование на основе модели формирования микроструктурных и электрических параметров, процессов осадкообразования при естественном развитии, а также взаимодействия физических процессов.

Математическое моделирование облаков с учетом электрических процессов развивается в нашей стране [Ашабоков, Шаповалов, 2008; Ашабоков и др., 2012; Шаповалов А., Шаповалов В., 2014; Коган и др., 1984; Ashabokov et al., 2014] и за рубежом [Clark, 1979; Rawlins, 1982; Straka, 2009]. Разработаны модели различной размерности и различной степени детальности учета микрофизических и электрических процессов. Модели с детальным описанием микрофизических процессов позволяют исследовать формирование микроструктурных характеристик облаков,

образование осадков, электризацию частиц и другие процессы. Для описания микрофизических процессов в них используются кинетические уравнения для распределений частиц по размерам или массам [Коган и др., 1984; Ashabokov et al., 2014]. Охватывается широкий спектр размеров частиц – от микронных размеров до миллиметровых капель и сантиметровых градин.

В работе представлена разработанная авторами трехмерная численная модель конвективного облака с детальным описанием гидротермодинамических, микрофизических и электрических процессов, приведены результаты расчетов параметров грозоградовых облаков.

Микрофизический блок модели описывает процессы нуклеации, конденсации, коагуляции капель с каплями, сублимации, аккреции, замерзания капель, осаждения облачных частиц в поле силы тяжести, их перенос воздушными потоками, а также взаимодействие облачных частиц под влиянием электрического поля облака.

В модели принят следующий физический процесс разделения зарядов на стадии формирования осадков – зарядение переохлажденных капель при их замерзании (знак заряда «минус»), образующиеся при этом осколки замерзания (микровыбросы) заряжены положительно.

Система уравнений для функций распределения по массам капель $f_1(\vec{r}, m, t)$, ледяных частиц $f_2(\vec{r}, m, t)$ и осколков замерзания капель $f_3(\vec{r}, m, t)$ имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\mathcal{J}_1}{a} + u \frac{\mathcal{J}_1}{ax} + v \frac{\mathcal{J}_1}{ay} + (w - V_1) \frac{\mathcal{J}_1}{az} &= \left(\frac{\mathcal{J}_1}{a} \right)_{\text{КД}} + \left(\frac{\mathcal{J}_1}{a} \right)_{\text{КТ}} + \left(\frac{\mathcal{J}_1}{a} \right)_{\text{АК}} + \\ &+ \left(\frac{\mathcal{J}_1}{a} \right)_{\text{ДР}} + \left(\frac{\mathcal{J}_1}{a} \right)_3 + \Delta f_1 + I_1, \\ \frac{\mathcal{J}_2}{a} + u \frac{\mathcal{J}_2}{ax} + v \frac{\mathcal{J}_2}{ay} + (w - V_2) \frac{\mathcal{J}_2}{az} &= \left(\frac{\mathcal{J}_2}{a} \right)_C + \left(\frac{\mathcal{J}_2}{a} \right)_{\text{АК}} + \left(\frac{\mathcal{J}_2}{a} \right)_3 + \Delta f_2 + I_2 + I_{\text{АВ}}, \\ \frac{\mathcal{J}_3}{a} + u \frac{\mathcal{J}_3}{ax} + v \frac{\mathcal{J}_3}{ay} + (w - V_2) \frac{\mathcal{J}_3}{az} &= \left(\frac{\mathcal{J}_3}{a} \right)_3 + \left(\frac{\mathcal{J}_3}{a} \right)_{\text{АК}} + \Delta f_3, \\ 0 \leq x \leq L_x, \quad 0 \leq y \leq L_y, \quad 0 \leq z \leq L_z, \quad 0 \leq m < \infty, \quad t > 0, \end{aligned} \tag{1}$$

где $V_1(m), V_2(m)$ – установившиеся скорости падения жидких и твердых частиц; $\left(\frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{\text{КД}}, \left(\frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{\text{КТ}}, \left(\frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{\text{АК}}, \left(\frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{\text{ДР}}, \left(\frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_3$ – изменения функции распределения капель за счет микрофизических процессов конденсации, коагуляции капель, аккреции капель и кристаллов, дробления и замерзания соответственно; $\left(\frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_C, \left(\frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_{\text{АК}}, \left(\frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_3$ – изменения функции распределения кристаллов за счет сублимации, аккреции и замерзания капель; $\left(\frac{\partial f_3}{\partial t} \right)_3, \left(\frac{\partial f_3}{\partial t} \right)_{\text{АК}}$ – изменения функции распределения $f_3(\vec{r}, m, t)$ за счет образования осколков при спонтанном замерзании переохлажденных облачных капель и их аккреции с кристаллами; I_1 и I_2 – источники капель и кристаллов; $I_{\text{АВ}}$ – источник искусственных кристаллов при активном воздействии льдообразующими реагентами.

Для системы уравнений (1) использовались следующие начальные и граничные условия:

$$f_1(\bar{r}, m, 0) = f_2(\bar{r}, m, 0) = f_3(\bar{r}, m, 0) = 0, \quad (2)$$

$$f_1(\bar{r}, m, t) = f_2(\bar{r}, m, t) = f_3(\bar{r}, m, t) = 0 \text{ при } x = 0, L_x,$$

$$f_1(\bar{r}, m, t) = f_2(\bar{r}, m, t) = f_3(\bar{r}, m, t) = 0 \text{ при } y = 0, L_y,$$

$$f_1(\bar{r}, m, t) = f_2(\bar{r}, m, t) = f_3(\bar{r}, m, t) = 0 \text{ при } z = L_z \quad (3)$$

$$\frac{\mathcal{F}_1}{\partial z} = \frac{\mathcal{F}_2}{\partial z} = \frac{\mathcal{F}_3}{\partial z} = 0 \text{ при } z = 0.$$

Для расчета электрического заряда и поля облака аппроксимированы экспериментальные зависимости выбросов микрочастиц от размера замерзающей капли и значений коэффициентов разделения зарядов, связанных с замерзанием капель воды и взаимодействием кристаллов с переохлажденными каплями, полученные в Высокогорном геофизическом институте.

При моделировании на каждом временном шаге рассчитываются объемные заряды в облаке, потенциал электростатического поля, создаваемого этими зарядами, а также горизонтальные и вертикальная составляющие напряженности электрического поля облака E_x , E_y , E_z .

Суммарное значение (положительного и отрицательного) объемных зарядов $\rho_e(\bar{r})$ используется для определения потенциала $U(\bar{r})$ создаваемого ими электростатического поля. Для этого на каждом временном шаге решается уравнение Пуассона:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = -\frac{\rho_e}{\epsilon_0}, \quad (4)$$

при следующих граничных условиях

$$\frac{\partial U}{\partial x} = 0 \Big|_{x=0, L_x}, \quad \frac{\partial U}{\partial y} = 0 \Big|_{y=0, L_y}, \quad \frac{\partial U}{\partial z} = 0 \Big|_{z=L_z}, \quad U = 0 \Big|_{z=0} \quad (5)$$

где ϵ_0 – диэлектрическая постоянная вакуума.

Напряженность электрического поля $E(x, y, z)$ в точке (x, y, z) , обусловленного зарядами r_e , расположенными в пространстве облака, определяется как градиент потенциала. Значения напряженности электрического поля учитывались при расчете коэффициентов электрической коагуляции облачных частиц. Для этой цели использовались аппроксимационные формулы, построенные по существующим теоретическим и экспериментальным данным для этого параметра.

Система уравнений модели решалась методом расщепления по физическим процессам и покомпонентного расщепления. [Коган и др., 1984].

Для сопоставления с данными наблюдений в модели рассчитывается радиолокационная отражаемость облака на длинах волн 3,2 и 10 см с использованием дискретного распределения частиц по размерам (массам).

На рисунках 1–3 приведены результаты исследований формирования термогидродинамических, микроструктурных и электрических параметров конвективного облака, полученных в ходе расчетов при неустойчивом состоянии атмосферы.

Размеры пространственной области при расчетах задавались от 60 км по горизонтали и 16 км – по вертикали. Шаг сетки по координатам X , Y составлял 500 м,

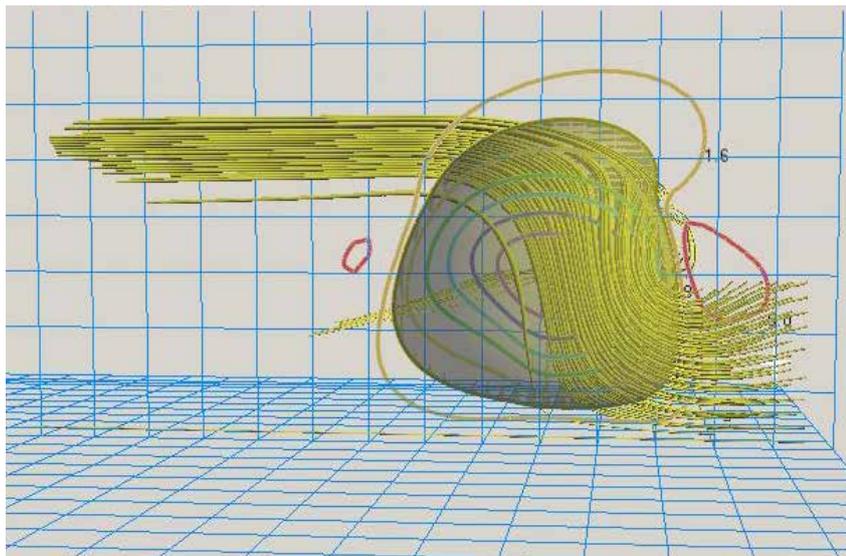


Рис. 1. Изолинии скорости восходящих и нисходящих потоков воздуха в вертикальной плоскости, проходящей через облако. Пучок линий – линии тока. В горизонтальной и вертикальной плоскостях приведены вспомогательные сетки с ячейками 2×2 км.

по Z – 250 м. Ось X направлена на восток, Y – на север. Облако инициировалось заданием импульса у поверхности земли с перегревом $\Delta T = 1-2$ °C. Форма и размеры импульса варьировались.

На рисунке 1 приведены изолинии скорости воздушных потоков в вертикальной плоскости, проходящей через облако. Отмечается наличие вихря с наветренной стороны облака (слева на рисунке 1) и с подветренной стороны.

Во всех вариантах моделирования конвективных облаков отмечались нисходящие потоки вокруг облака. С наветренной стороны они усиливаются внешним ве-

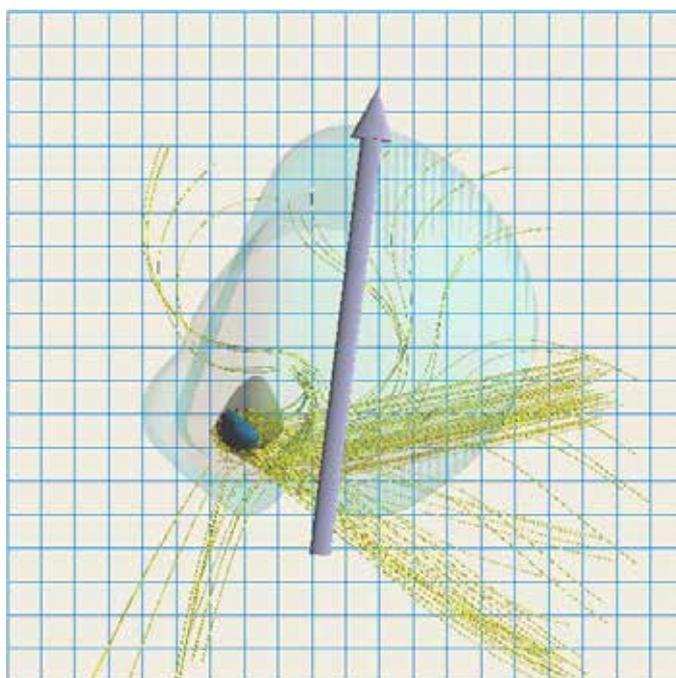


Рис. 2. Вид сверху на модельное облако, пучки линий – линии тока. Полупрозрачной изображена радиолокационная отражаемость 10 dBZ. Стрелка указывает направление ведущего потока.

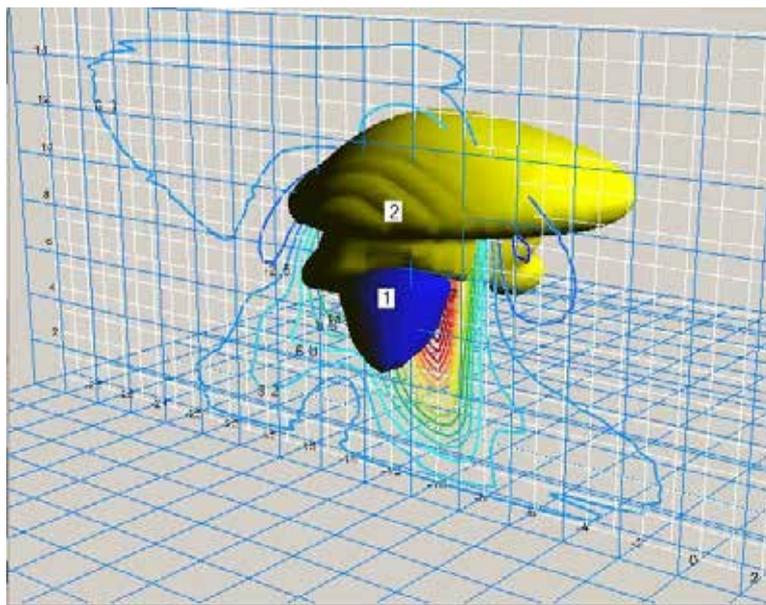


Рис. 3. Изолинии вертикальных потоков воздуха в облаке на 40 минуте развития.
1 – Крупные капли; 2 – мелкие и средние ледяные частицы.

тром, за облаком могут быть слабее, т.к. в этой области возникает гидродинамическая тень.

С помощью разработанных средств визуализации были определены потоки, питающие облако в зрелой стадии развития (рисунок 2). Наблюдается вток из подветренной области (уровень 4 км), справа от направления ведущего потока (уровень 0–0,5 км), с наветренной стороны справа от облака под углом примерно 45° (уровень 3 км).

Область сосредоточения крупнокапельной фракции (1) и область формирования ледяных частиц (2) на 40 минуте развития облака приведены на рисунке 3. Приведены также изолинии вертикальных потоков. Высота облака – 13 км, максимальная отражаемость – 63 dBZ.

В работе исследовано формирование положительного и отрицательного объемных электрических зарядов, рассчитаны характеристики электростатического поля. Расчетные значения напряженности электростатического поля применены в модели для корректировки коэффициента коагуляции облачных частиц. На рисунке 4 приведены результаты моделирования напряженности электростатического поля облака E_z (В/см), на 40-й минуте развития.

С помощью разработанных алгоритмов рассчитывались вертикальная E_z и горизонтальные E_x , E_y составляющие напряженности электрического поля. На 20-й минуте развития облака потенциал электрического поля составляет порядка $8,1 \times 10^8$ В. Компоненты напряженности поля имеют значения $E_x \gg 1200$ В/см, а $E_z \gg 2000$ В/см. С течением времени заряд в облаке, и, соответственно потенциал поля увеличиваются. Максимальные значения потенциала электрического поля, полученные в расчетах, имели значения около 850 МВ. Они согласуются с результатами расчетов других авторов.

Рассчитанные в каждый момент времени в узлах пространственной сетки значения напряженности электростатического поля учитывались при расчете коэффициентов коагуляции капель и кристаллов.

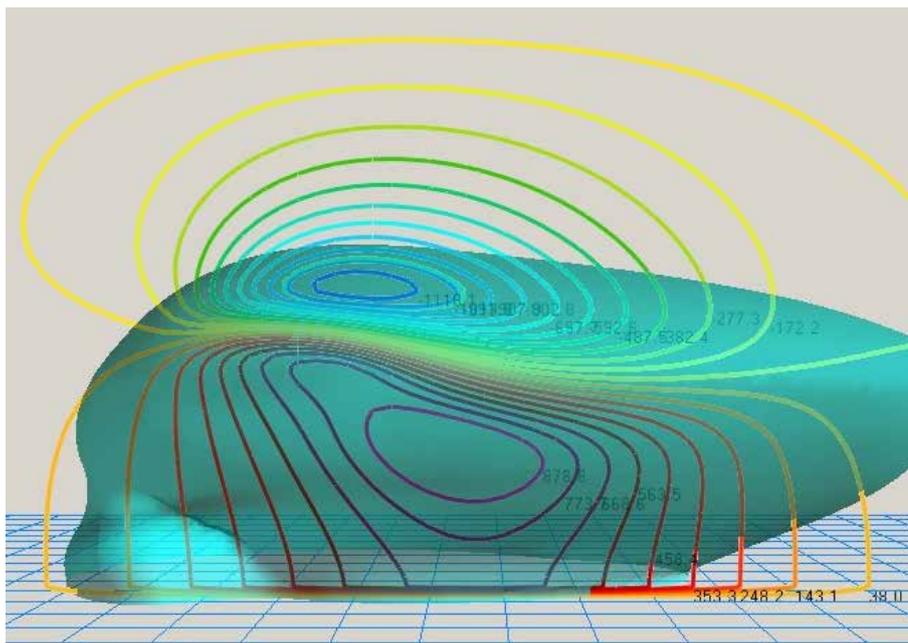


Рис. 4. Изолинии вертикальной компоненты напряженности поля E_z (В/см), на фоне изоповерхности отражаемости 10 dBZ

При значительной концентрации жидкой воды и при наличии в облаке некоторого количества крупных капель или кристаллов, рост осадков происходит достаточно быстро. До этого, основная часть времени при образовании осадков в облаке уходит на рост частиц до диаметра 100 мкм. Это связано с тем, что коэффициент взаимодействия мелких частиц очень маленький. По различным данным он составляет от 0,001 до 0,01. При наличии электрического поля и зарядов на частицах этот коэффициент значительно возрастает и при определенных условиях ($E > 1000$ В/см) может превышать 1,0.

Заключение

Формализован процесс накопления электрического заряда при замерзании капель и аккреции капель с ледяными частицами. Разработаны алгоритмы расчета потенциала, напряженности электростатического поля, электрической коагуляции.

На основе разработанной модели проведены численные эксперименты по исследованию формирования конвективных облаков при различных стратификациях атмосферы и фоновом ветре. Определены термогидродинамические, микроструктурные и электрические параметры в зоне мощного конвективного облака.

Определены основные потоки, питающие облако в зрелой стадии.

С помощью программных средств трехмерной визуализации выделены области формирования и роста ледяных частиц.

Исследовано распределение электрического заряда и напряженности поля в грозовых облаках в Северо-Кавказском регионе.

Проанализировано взаимодействие динамических, микрофизических и электрических процессов. Получено, что за счет электрической коагуляции время роста частиц осадков в мощном конвективном облаке уменьшается на 20–30%.

Литература

1. Ашабоков Б. А., Шаповалов А. В. Конвективные облака: численные модели и результаты моделирования в естественных условиях и при активном воздействии. – Нальчик, 2008. – 254 с.
2. Ашабоков Б. А., Бейтуганов М. Н., Куповых Г. В., Шаповалов А. В., Продан К. А., Шаповалов В. А. Численное моделирование электрических характеристик конвективных облаков // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. – 2012. – №6. – С. 65–68.
3. Коган Е. Л., Мазин И. П., Сергеев Б. Н., Хворостьянов В. И. Численное моделирование облаков. – М., 1984. – 186 с.
4. Шаповалов А. В., Шаповалов В. А. Трехмерная визуализация геофизической информации для решения прикладных задач // Наука. Инновации. Технологии. – 2014. – №1. – С. 65–73.
5. Ashabokov B.A., Shapovalov A.V., Kuliev D.D., Prodan K.A., and Shapovalov V.A. Numerical Simulation of Thermodynamic, Microstructural, and Electric Characteristics of Convective Clouds at the Growth and Mature Stages // Radiophysics and Quantum Electronics: Volume 56, Issue 11 (2014). – Pp. 811–817.
6. Clark T. Numerical Simulation with a Tree-Dimension Cloud Model: lateral Boundary Condition Experiments and Multiceller Severe Storm Simulations // J. Atm. Sci, 1979. – V. 36, №11. – Pp. 2191–2215.
7. Rawlins F. A numerical study of thunderstorm electrification using a three dimensional model incorporating the ice phase // Quart. Jour. of the Royal Met. Society, 1982. – V. 108. – Pp. 779–801.
8. Straka J. M. Cloud and precipitation microphysics. Principles and Parameterizations. – Cambridge University Press, 2009. – 392 p.

DOI: 10.23671/VNC.2017.1.9482

SIMULATION OF ELECTRICAL PROCESSES IN THUNDERSTORMS IN THE NORTH CAUCASUS REGION

© 2017 A. V. Shapovalov¹, Sc. Doctor (Phys.-Math.), prof., M. Y. Pashkevich², Sc. Cand. (Tech.), V. I. Ryazanov¹, V. A. Shapovalov¹, Sc. Candidate (Phys.-Math.), N. A. Berezinskiy², Sc. Candidate (Phys.-Math.), R. V. Sheremetev², Sc. Candidate (Phys.-Math.), A. S. Kamrukov³

¹High-mountain geophysical institute, Russia, 360030, Republic of Kabardino-Balkaria, Nalchik, Lenin Avenue, 2, e-mail: atajuk@mail.ru;

²Alpine Research and Testing Center of aircraft and weapons, Russia, 360030, Republic of Kabardino-Balkaria, Nalchik, Lenin Avenue, 2, e-mail: vniic@rambler.ru;

³Bauman Moscow state technical university, Russia, 105005, Moscow, Baumanskaya 2-ya str., 5/1

The paper presents three-dimensional numerical model of convective clouds with the account of electrical processes. Based on the model obtained the following parameters: density of volume charge in the cloud, the potential and the electric field created by these charges, considers in detail the influence of the electric field of the cloud microphysical processes of interaction of cloud particles and the reverse influence of the microstructure on the electrical parameters. The results of thermohydrodynamic studies of the formation, microstructure and electrical parameters of storm clouds in the North Caucasus region.

Keywords: Electric processes, mathematical modeling, microstructure of clouds and precipitation, thunderstorms, hail, electrification of clouds.