

УДК 551.576:551.594

## ИССЛЕДОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МИКРОФИЗИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКАХ ПРИ ИХ ЭВОЛЮЦИИ

© 2004 г. Е.А. Корчагина, А.В. Шаповалов

The two-dimension numerical model is used to research the interaction of microphysical and electrical processes in convective clouds during its micro-structuring. The results of numerical simulations of microstructural and electrical parameters' evolution are given. The formation of precipitation in clouds regarding as well as neglecting electrical phenomena is considered.

В исследованиях физических процессов в облаках и их взаимодействия в последние годы возрастает роль математического моделирования, которое в комплексе с лабораторными и натурными физическими экспериментами позволяет анализировать некоторые важные аспекты физических процессов в конвективных облаках.

Анализ теоретических и экспериментальных работ по физике облаков показывает, что еще мало изучено влияние электрических зарядов на частицах и электрического поля на протекающие в облаке микрофизические процессы и обратная связь между ними [1–5].

Целью данной работы является теоретическое исследование проблемы взаимодействия термодинамических, микрофизических и электрических процессов в конвективных облаках при их эволюции.

В качестве инструмента исследований выступает двумерная математическая модель конвективного облака с детальной термодинамикой, микрофизикой и учетом электрических процессов. Использование двух пространственных координат связано с существенным усложнением микрофизического блока в предложенной постановке. В реализованной авторами модели коэффициент коагуляции частиц не является постоянной величиной, а зависит от напряженности электростатического поля облака, рассчитываемой в каждый момент времени. Объем расчетов на каждом временном шаге значительно возрастает по сравнению со случаем использования коэффициента коагуляции частиц, зависящего только от их размера, поэтому применение трехмерной модели становится затруднительным.

В работе приведены результаты расчетов эволюции термодинамических, микроструктурных и электрических параметров конвективного облака. Рассмотрено образование осадков без электрических явлений и с их учетом. С помощью модели проведена количественная оценка влияния электрических процессов на формирование осадков, исследована положительная обратная связь между ансамблем частиц и электрическим полем облака.

### Численная модель конвективного облака

Ниже представлено краткое описание разработанной авторами модели конвективного облака с детальным описанием термодинамических, микрофизических и электрических процессов. В отличие от имеющихся в настоящее время моделей [6–11] рассчитывались плотности объемных зарядов в облаке, потенциал и напряженность электрического поля, создаваемого этими зарядами, учитывалось влияние электрического поля облака на процессы слияния облачных частиц.

В основе предлагаемой модели конвективного облака с учетом электрических процессов лежат известные уравнения гидротермодинамики влажной конвекции [6,7,12]:

$$\frac{du}{dt} = -\frac{\partial \pi'}{\partial x} + \Delta' u; \quad (1)$$

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{\partial \pi'}{\partial z} + g \left( \frac{\theta'}{\theta_0} + 0,61q' - Q_S \right) + \Delta' w;$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = \sigma w; \quad (2)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{L_k}{C_p} \frac{\theta}{T} \left( \frac{\delta M_k}{\delta t} \right) + \frac{L_c}{C_p} \frac{\theta}{T} \left( \frac{\delta M_c}{\delta t} \right) + \frac{L_3}{C_p} \frac{\theta}{T} \left( \frac{\delta M_3}{\delta t} \right) + \Delta' \theta; \quad (3)$$

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{\delta M_k}{\delta t} - \frac{\delta M_c}{\delta t} + \Delta' q;$$

$$\text{где } \frac{d}{dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + w \frac{\partial}{\partial z};$$

$$\Delta' \equiv \frac{\partial}{\partial x} K \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial}{\partial z};$$

$u(x,z)$ ,  $w(x,z)$  – компоненты вектора скорости воздушных потоков в облаке;  $\theta(x,z)$  – потенциальная температура;  $\pi(x,z) = c_p \bar{\theta} (p(x,z)/1000)^{R/c_p}$  – безразмерное давление;  $\bar{\theta}$  – средняя потенциальная температура;  $R$  – газовая постоянная;  $q(x,z)$  – удельная влажность воздуха;  $Q_S(x,z)$  – суммарное отношение смеси жидкой и твердой фаз в облаке;  $\sigma(z)$  – параметр, учитывающий изменение плотности воздуха с высотой;  $P(x,z)$  и  $T(x,z)$  – соответственно давление и температура;  $C_p$  – теплоемкость воздуха при постоянном давлении;  $L_k$ ,  $L_c$ ,  $L_3$  – удельная теплота конденсации, сублимации и замерзания;  $\pi'(x,z)$ ,  $\theta'(x,z)$ ,  $q'(x,z)$  – отклонения безразмерного давления, потенциальной температуры и удельной влажности от их фоновых значений в окружающей атмосфере  $\pi_\phi(x,z)$ ,  $\theta_\phi(x,z)$  и  $q_\phi(x,z)$ ;  $\left( \frac{\delta M_k}{\delta t} \right)$ ,

$\left( \frac{\delta M_c}{\delta t} \right)$  – изменения удельной влажности за счет диффузии пара на капли и кристаллы;  $\left( \frac{\delta M_3}{\delta t} \right)$  – масса

капельной воды, замерзающей в единицу времени в единице объема воздуха;  $K(x,z)$  – коэффициент турбулентной диффузии. Для границ пространственной области используются обозначения  $0, L_x$  и  $0, L_z$ .

Система (1)–(3) решается при следующих начальных и граничных условиях:

$$u(x,z,0) = u^0(x,z,0);$$

$$\begin{aligned} w(x,z,0) &= w^0(x,z,0); \\ \theta(x,z,0) &= \theta^0(x,z,0); \\ u &= u_0(z); \theta = \theta_0(z); p = p_0(z); q = q_0(z) \text{ при } x=0, L_x. \\ u &= w = 0, \theta = \theta_0(0), p = p_0(0), q = q_0(0) \text{ при } z=0 \\ u &= u(L_z), w = 0, \theta = \theta_0(L_z), p = p_0(L_z), q = q_0(L_z) \text{ при } z = L_z. \end{aligned} \quad (4)$$

Предлагаемая модель отличается микрофизическим блоком, который 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 отличие от моделей с параметризованной микрофизикой [9–11] нами рассматривается непрерывный спектр частиц в облаке. Система уравнений для функций распределения по массам капель  $f_1(x,z,m,t)$ , ледяных частиц  $f_2(x,z,m,t)$  и осколков замерзания капель  $f_3(x,z,m,t)$  имеет следующий вид [13]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_1}{\partial t} + u \frac{\partial f_1}{\partial x} + (w - V_1) \frac{\partial f_1}{\partial z} = & \left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{\text{КД}} + \left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{\text{КГ}} + \left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{\text{АК}} + \\ & + \left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{\text{ДР}} + \left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_3 + \Delta' f_1 + I_1; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_2}{\partial t} + u \frac{\partial f_2}{\partial x} + (w - V_2) \frac{\partial f_2}{\partial z} = & \left( \frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_C + \left( \frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_{\text{АК}} + \\ & + \left( \frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_3 + \Delta' f_2 + I_2 + I_{\text{АВ}}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_3}{\partial t} + u \frac{\partial f_3}{\partial x} + (w - V_2) \frac{\partial f_3}{\partial z} = \\ = \left( \frac{\partial f_3}{\partial t} \right)_3 + \left( \frac{\partial f_3}{\partial t} \right)_{\text{АК}} + \Delta' f_3, \end{aligned}$$

где  $V_1(m), V_2(m)$  – установившиеся скорости падения жидких и твердых частиц;  $\left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{\text{КД}}, \left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{\text{КГ}},$

$\left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{\text{АК}}, \left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{\text{ДР}}, \left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_3$  – изменения функции

распределения капель за счет микрофизических процессов конденсации, коагуляции капель, аккреции капель и кристаллов, дробления и замерзания соответственно;  $\left( \frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_C, \left( \frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_{\text{АК}}, \left( \frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_3$  – измене-

ния 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

$f_3(r,m,t)$  за счет образования осколков при спонтанном замерзании облачных капель и аккреции.

Для системы уравнений (6) используются следующие начальные и граничные условия:

$$\begin{aligned} f_1(x,z,m,0) &= f_2(x,z,m,0) = f_3(x,z,m,0) = 0; \\ f_1(x,z,m,t) &= f_2(x,z,m,t) = f_3(x,z,m,t) = 0 \text{ при } x=0, L_x; \end{aligned} \quad (7)$$

$$f_1(x,z,m,t) = f_2(x,z,m,t) = f_3(x,z,m,t) = 0 \text{ при } z=L_z; \quad (8)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial z} = \frac{\partial f_2}{\partial z} = \frac{\partial f_3}{\partial z} = 0 \text{ при } z=0.$$

Для описания коагуляционных процессов в облаке применялось интегродифференциальное уравнение в виде, представленном в [7].

Расчет взаимодействия капель и кристаллов проводился на основе следующих соотношений:

$$\left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_A = -f_1(x,z,m,t) \int_0^\infty \beta_2(m,m') f_2(x,z,m',t) dm'; \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_A = & -f_2(x,z,m,t) \int_0^\infty \beta_2(m',m) f_1(x,z,m',t) dm' + \\ & + \int_0^\infty f_1(x,z,m',t) \beta_2(m',m-m') f_2(x,z,m-m',t) dm'; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\beta_2(m,m') = \pi(r(m) + r(m'))^2 \cdot |V_1(m) - V_2(m')| \cdot E(m,m'),$$

где  $r(m)$  и  $r(m')$  – радиусы сталкивающихся частиц;  $E(m,m')$  – коэффициент слияния, который рассчитывается по аппроксимационным формулам.

Изменение функции  $f_1(x,z,m,t)$  вследствие дробления капель рассчитывалось по формуле [6]:

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_d = \\ = -f_1(x,z,m,t) P(m) + \int_m^\infty P(m) Q(m,m') f_1(x,z,m',t) dm'. \end{aligned} \quad (11)$$

В этом выражении  $P(m)$  есть вероятность распада в единицу времени капли массой  $m$ ;  $Q(m,m')$  – вероятность образования капли массой  $m$  при распаде капли массой  $m'$ .

Расчет изменений функций  $f_1(x,z,m,t)$  и  $f_2(x,z,m,t)$  за счет кристаллизации капель проводился с использованием функции вероятности замерзания в единицу времени капли массой  $m$  в точке  $(x,z)$ , обозначенной  $R(x,z,m)$  [6,12]:

$$\left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_d = - \left( \frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_d - f_1(x,z,m,t) R(x,z,m); \quad (12)$$

$$R(x,z,m) = A \exp \left[ B (T_M(m) - T_B(x,z)) \right], \quad (13)$$

где  $A, B$  – параметры;  $T_M(m)$  – медианная температура замерзания капель массой  $m$ ;  $T_B(x,z)$  – температура воздуха в точке  $(x,z)$ .

Появление новых капель и ледяных частиц в естественных условиях учитывается с помощью функций  $I_1$  для капель и  $I_2$  – для кристаллов [12]

Слагаемые, описывающие испарение, конденсацию и сублимацию, имеют вид [7]:

$$\left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{\text{КД}} = - \frac{\partial}{\partial m} \left( f_1(\bar{r}, m, t) \frac{dm}{dt} \right); \quad (14)$$

$$\left( \frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_C = - \frac{\partial}{\partial m} \left( f_2(\bar{r}, m, t) \frac{dm}{dt} \right). \quad (15)$$

Более подробно выражения для слагаемых, входящих в уравнения модели (1) – (15), представлены в работах [6,7,12,13].

Численное моделирование процессов электризации конвективных облаков связано с трудностями принципиального характера, одной из которых является корректное описание микрофизических процессов электризации облачных частиц. При моделирова-

нии облакообразования с учетом разделения электрических зарядов большинство исследователей не учитывают или упрощают детальное описание процессов разделения зарядов [10,11].

Для исследования закономерностей взаимодействия поля и частиц в облаке нужна детализация этих процессов, что и предпринято в настоящей работе.

Как известно, в конвективных облаках одновременно реализуются ряд механизмов электризации облачных частиц. В разработанной модели учитываются процессы электризации облачных частиц на основе экспериментально исследованных закономерностей развития грозовой деятельности облаков и значений коэффициентов разделения зарядов, связанных с замерзанием капель воды, ростом крупы и градин и взаимодействием градин с кристалликами льда и переохлажденными каплями [3,14].

За счет микрофизических процессов замерзания капель и аккреции в облаке идет накопление отрицательного заряда на ледяных частицах. Одновременно формируется положительный заряд, состоящий из зарядов отдельных частиц – осколков замерзания капель.

Для замерзающих капель, диаметр которых больше 200 мкм, с достаточной точностью процесс электризации описывается выражением [14]

$$q(m) = \alpha_1 m, \quad (16)$$

где  $m$  – масса замерзшей капли;  $\alpha_1$  – коэффициент пропорциональности, значение которого меняется в зависимости от содержания примесей в капле и температуры ее замерзания ( $\alpha \approx 3,5 \cdot 10^{-10}$  Кл/г при  $T = -8 \dots -16$  °C).

На крупных кристаллах, крупе и градинах накапливается электрический заряд за счет захвата переохлажденных капель. Заряд пропорционален массе, замерзшей на них воды. При этом коэффициент пропорциональности зависит от температуры растущей частицы, а также от концентрации и химического состава примесей в облачной воде и принимает значение от  $10^{-10}$  до  $10^{-8}$  Кл/г.

Образование осколков при замерзании капель учитывается следующим образом:

$$\left( \frac{\partial f_3}{\partial t} \right)_3 = \int_m^\infty n(m, m') R(x, z, m', t) f_1(x, z, m', t) dm', \quad (17)$$

где  $n(m, m')$  – число ледяных осколков массы  $m$ , образующихся при замерзании капель массы  $m'$ ;  $R(x, z, m', t)$  – вероятность замерзания капель массой  $m'$  в единицу времени.

Образование осколков в процессе аккреции ледяных кристаллов с облачными каплями описывается формулой

$$\left( \frac{\partial f_3}{\partial t} \right)_{AK} = \int_m^\infty n(m, m') R_2(x, z, m', t) dm', \quad (18)$$

где

$$R_2(x, z, m', t) = f_1(x, z, m', t) \cdot \int_0^\infty \beta_2(m', \xi) f_2(x, z, \xi, t) d\xi -$$

число столкновений кристаллов массой  $\xi$  с каплями массой  $m'$ , приводящих к замерзанию последних и образованию осколков.

Число ледяных осколков  $n(m, m')$  определяется с помощью аппроксимаций экспериментальных зависимостей выбросов микрочастиц от размеров замер-

зающих капель. Для капель с  $r < 75$  мкм используются данные Лезема и Мейсона, приведенные в [3]. Для капель больших размеров применяются данные, полученные в работе [14].

Микроскопические осколки замерзания выносятся потоками в верхнюю часть облака, где образуется преимущественно положительный объемный заряд  $\rho_+(x, z, t)$ . Область сосредоточения отрицательно заряженных ледяных частиц образует зону преимущественно отрицательного объемного заряда  $\rho_-(x, z, t)$ .

Объемные заряды на временном шаге рассчитывались по формулам:

$$\begin{aligned} \rho_-(x, z, t) &= a_2 \int_0^\infty m f_2(x, z, m, t) dm - \rho_2(x, z), \\ \rho_+(x, z, t) &= a_3 \int_0^\infty m f_3(x, z, m, t) dm - \rho_3(x, z), \end{aligned} \quad (19)$$

где  $a_2$  и  $a_3$  – коэффициенты разделения зарядов;  $\rho_2(x, z)$  и  $\rho_3(x, z)$  – уменьшение объемных зарядов в результате тока проводимости атмосферы и разрядов.

Рассчитанные значения суммарных объемных зарядов  $\rho_\Sigma(x, z, t)$  используются далее для определения потенциала  $U(x, z)$  создаваемого ими электрического поля. Для этого на каждом временном шаге (при фиксированном  $t$ ) решается уравнение Пуассона

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = -\frac{\rho_\Sigma}{\epsilon_0} \quad (20)$$

при следующих граничных условиях

$$\frac{\partial U}{\partial x} = 0 \Big|_{x=0, L_x}, \quad \frac{\partial U}{\partial z} = 0 \Big|_{z=L_z}, \quad U = 0 \Big|_{z=0}, \quad (21)$$

где  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная вакуума;

$$\rho_\Sigma(x, z, t) = \rho_+(x, z, t) + \rho_-(x, z, t).$$

Напряженность электрического поля  $E(x, z, t)$  определяется как градиент потенциала по формуле:

$$E(x, z, t) = - \left( n_x \frac{\partial U}{\partial x} + n_z \frac{\partial U}{\partial z} \right). \quad (22)$$

Значения напряженности электрического поля учитываются в модели при определении коэффициентов коагуляции облачных частиц согласно теоретическим и экспериментальным зависимостям Л.М.Левина и Н.В.Красногорской [4,5].

Влияние электрического поля на эффективность столкновения заряженных капель зависит от размеров частиц, знака и величины зарядов. Кроме эффекта поляризации капель, электрическое поле вызывает изменение скорости движения заряженных частиц, если их размеры достаточно малы. Чем меньше относительные скорости движения капель, тем больше импульс электрических сил. Поэтому влияние электрического поля тем значительнее, чем ближе размеры взаимодействующих частиц [4].

Для решения системы уравнений модели на временном интервале  $(t_n, t_{n+1})$  используются методы расщепления, прогонки, верхней блочной релаксации [15].

Алгоритм расчета уравнений переноса субстанций основан на прогонке с чередованием направлений (продольно-поперечная схема). Эллиптическое неоднородное уравнение для отклонения давления  $\pi'$  [7], полученное применением оператора дивергенции к уравнениям движения (1), с использованием уравне-

ния неразрывности (2), решается методом верхней блочной релаксации [15]. Этот же метод применяется при решении уравнения Пуассона для потенциала электрического поля (20).

Интегрирование системы уравнений модели проводилось по пространственно-временной области  $D \times T : \{0 \leq x \leq L_x, 0 \leq z \leq L_z, \tau > 0\}$ .

Размеры пространственной области составляли 50 км по горизонтали и 18 км по вертикали. Шаг сетки по оси  $x$  составлял 200 м, по оси  $z$  – 100 м, по времени – 10 с.

По массам облачных частиц использовалась сетка с переменным шагом, при этом градации задавались следующим образом [7]:  $m_0 = 2,5 \cdot 10^{-10}$  г;  $m_{n+1} = 1,414 \cdot m_n$ ;  $n \in [1 : 60]$ . Для ледяных частиц использованы 75 категорий масс, которые перекрывают все размеры, включая град ( $d_{\max} \approx 5$  см).

### Исследование коагуляционного роста облачных частиц в электростатическом поле различной напряженности

Формирование осадков в облаке происходит при наличии в облаке достаточно крупных частиц ( $r > 50$  мкм), называемых зародышами осадков. Зародыши крупных капель не могут образоваться только в результате конденсации [2,3], поэтому для объяснения их роста привлекают различные механизмы, в том числе электрическую коагуляцию [3–5].

Для оценки влияния электрического поля на коагуляцию облачных частиц в данной работе были проведены численные эксперименты по моделированию образования осадков в пространственно однородной системе при наличии электрических полей различной интенсивности. Коэффициент коагуляции аппроксимировался в зависимости от напряженности электрического поля  $E_z$  [4,5]. Некоторые результаты расчетов отображены на рис. 1, на котором представлена зависимость хода процесса коагуляции капель при различных значениях напряженности электрического поля в облаке. По оси ординат отложена водность по градациям радиусов,  $g/m^3$ .

С увеличением напряженности поля быстрее образуются зародыши осадков и спектр смещается в сторону крупных капель. Из первоначального спектра облачных капель (кривая 1) образуются дождевые капли при отсутствии поля за 35 мин, а при напряженности  $E_z = 1000$  В/см за 23 мин, при этом мелкокапельная часть спектра коагулирует практически полностью. Таким образом, процесс осадкообразования сокращается в присутствии электрических полей приблизительно на одну треть общего

времени образования осадков. При больших значениях  $E_z$  влияние поля может быть еще существеннее, если следовать зависимости коэффициента коагуляции от напряженности электрического поля [5].

Полученные в работе результаты, относящиеся к взаимодействию частиц, размером ниже известного в физике облаков предела в 19 мкм, согласуются с результатами, полученными в экспериментальных исследованиях [16]. В частности, в этих экспериментах наблюдалось заметное увеличение числа капель радиусами 25–45 мкм при высоковольтных разрядах, тогда как в отсутствие разрядов размер капель составлял 7–15 мкм.

### Результаты расчетов полей термодинамических микроструктурных и электрических параметров конвективного облака

На основе уравнений разработанной модели (1)–(22) были выполнены расчеты по моделированию конвективных облаков при различных реальных стратификациях атмосферы (использовались данные зондирования атмосферы в аэропорту «Минеральные Воды» и на научно-исследовательском полигоне ВГИ «Кызбурун-2» в весенне-летний период).

Облако инициировалось заданием теплового импульса в начальный момент времени у поверхности земли с перегревом  $\Delta T = 1,0$ – $1,5$  °С.

Некоторые результаты моделирования термодинамических и микроструктурных параметров конвективных облаков представлены в [12], и они не противоречат данным полевым наблюдений.

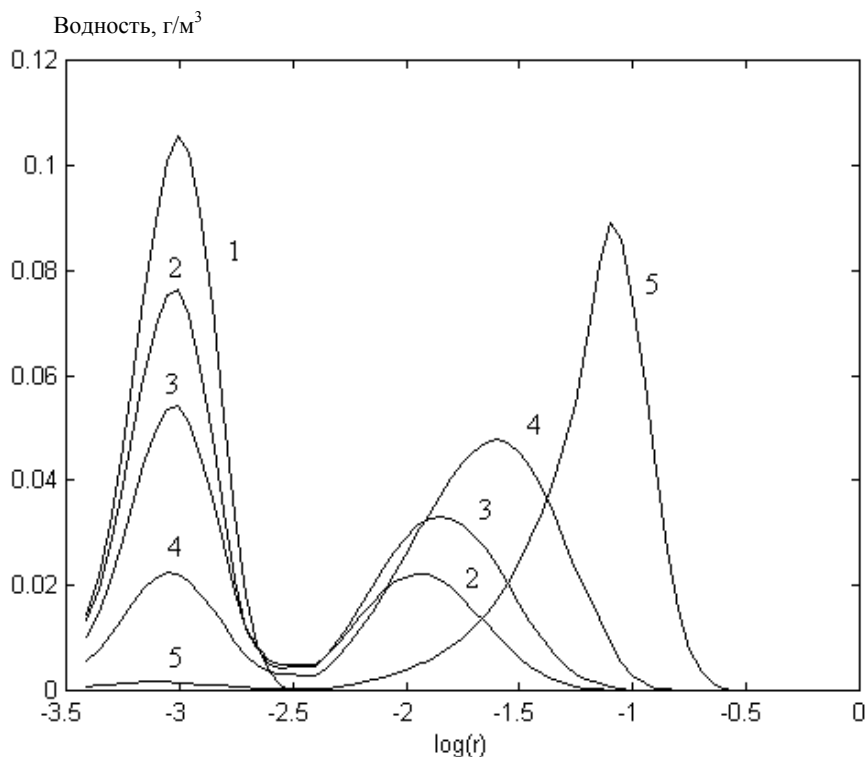


Рис. 1. Изменение спектра облачных капель при коагуляции за 20 минут  
1 – начальное распределение; 2 – в отсутствии электрического поля ( $E_z = 0$ );  
3 – в электрическом поле с напряженностью  $E_z = 100$  В/см; 4 –  $E_z = 300$  В/см;  
5 –  $E_z = 1000$  В/см

Остановимся на других результатах исследований на основе модели облака.

Многие авторы высказывают мысль, что важную роль в облаках играет взаимодействие различных физических процессов [1–3, 6, 7]. В [12] исследовались некоторые виды взаимодействий процессов в облаках и оценена их роль, а в настоящей работе сделана попытка анализа одного из наиболее сложных видов взаимодействия: электрических и микрофизических с наличием положительной обратной связи между ними.

Формирование микроструктуры на начальной стадии развития облака определялось микрофизическими процессами конденсационного роста отдельных облачных капелек. По результатам расчетов облака состояли на начальной стадии (примерно до 20-й мин) из капель воды, позднее – из смеси капель и кристаллов. При отрицательных температурах воздуха наблюдалось смешанное фазовое состояние, при этом капли были переохлажденными.

Превращение мощных кучевых облаков в кучево-дождевые сопровождалось оледенением их вершин, формированием частиц осадков, а также появлением значительных объемных электрических зарядов, которые вызывают молниевые разряды.

Накопление электрического заряда в облаках происходило вследствие замерзания капель и аккреции капель с ледяными частицами. Из-за разности скоростей падения осколков замерзания и более крупных частиц, крупы или градин, происходило пространственное разделение зарядов. В предвершинной части облака формировался положительный объемный заряд, ниже – отрицательный.

Электрическое строение облака на 20-й мин развития для одного из вариантов исходных данных (радиозондирования атмосферы) представлено на рис. 2. Интегральный положительный заряд в единице объема достигает значений  $6 \cdot 10^{-3}$  Кл  $\text{км}^{-3}$ , отрицательный  $-1,1 \cdot 10^{-2}$  Кл  $\text{км}^{-3}$ , что согласуется с существующими представлениями [1–3].

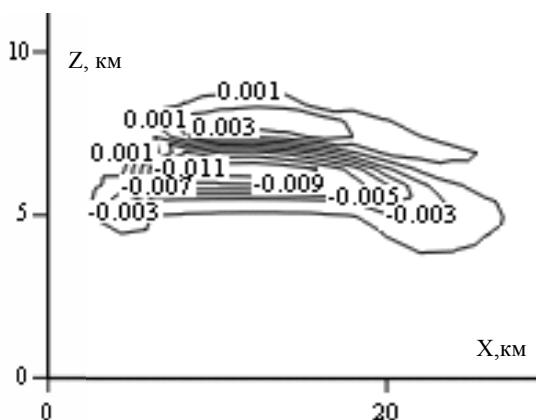


Рис. 2. Распределение отрицательного (а), положительного (б) и суммарного (в) объемных зарядов в облаке на 20-й минуте развития, Кл/ $\text{км}^3$

На каждом временном шаге численно решалось уравнение для потенциала электрического поля, рассчитывались вертикальная  $E_z$  и горизонтальная  $E_x$  составляющие напряженности электрического поля. Некоторые результаты моделирования электрических

параметров для одного из облаков представлены на рис. 3.

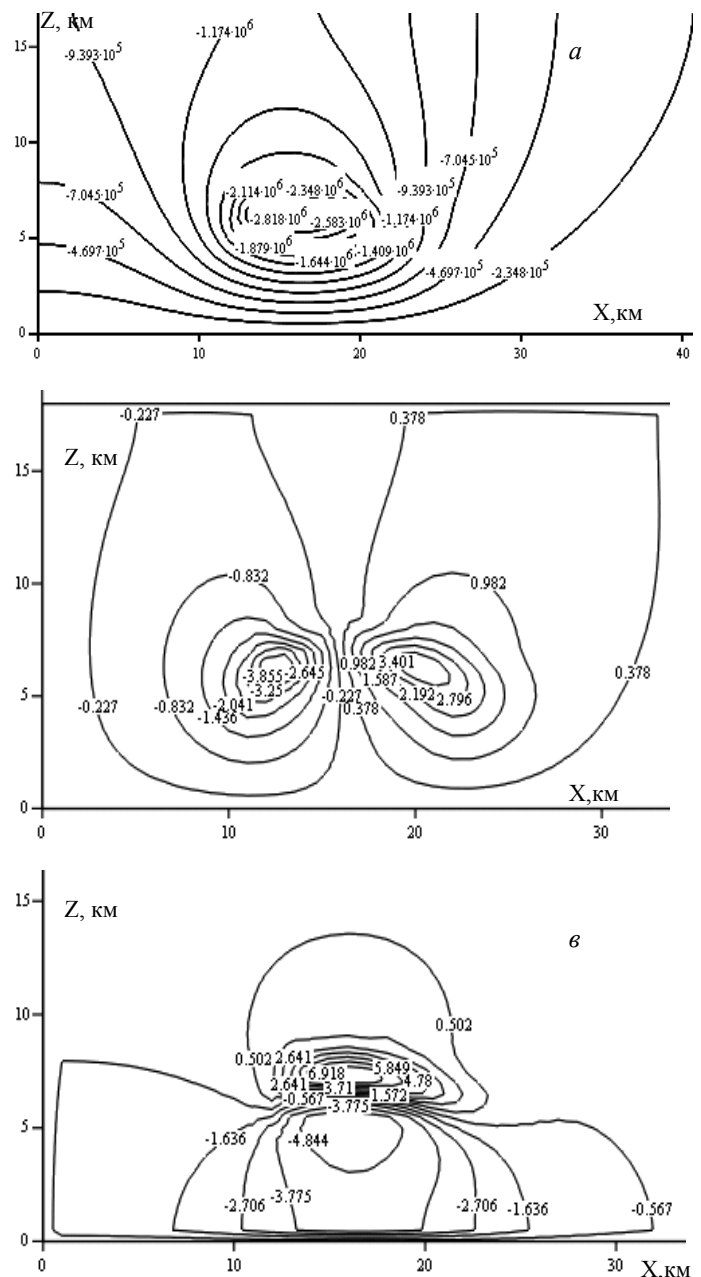


Рис. 3. Изолинии потенциала, В (а); горизонтальной (б) и вертикальной (в) составляющих электрического поля, В/см, на 20-й минуте эволюции облака

На 20-й мин развития облака (35 минута от начала расчета) потенциал электрического поля составляет величину  $3,1 \cdot 10^6$  В (рис. 3а). Компоненты вектора напряженности поля имеют значения  $E_x \approx 5$  В/см (рис. 3б), а  $E_z \approx 8$  В/см (рис. 3в). С течением времени заряд в облаке и соответственно потенциал поля увеличиваются. По результатам расчетов облака на 40-й мин развития потенциал достигал значений  $1,1 \cdot 10^8$  В, а напряженности  $-E_x \approx 100$  В/см,  $E_z \approx 240$  В/см.

Максимальные значения потенциала электрического поля, полученные в расчетах, имели значения 300–500 МВ. Сравнение результатов, полученных в данной работе, с приведенными в [11], показало, что порядок величины потенциала совпадает.

Вследствие взаимодействия облачных частиц радиусами до 20 мкм, которое становится возможным при наличии зарядов на частицах и значительных электрических полей в облаке ( $E > 50$  В/см), в выполненных численных экспериментах наблюдалось ускорение процесса роста частиц осадков и увеличение электрического поля облака. На рис. 4 приведены поля вертикальной составляющей электрического поля для двух моментов времени (20 и 40 мин). Составляющие вектора напряженности электрического поля  $E_x$  и  $E_z$  при учете электрической коагуляции растут быстрее (рис. 4), чем без ее учета (рис. 3): на 40-й мин развития облака  $E_z$  без учета электрической коагуляции составляла 240 В/см, а при учете – 650 В/см.

Сравнение времени образования осадков без учета и с учетом электрической коагуляции показало, что во втором случае осадки начинаются на 7–10 минут раньше.

Появляются изменения и в спектрах ледяных частиц – наблюдаются смещения максимумов в сторону крупных частиц.

Результаты расчетов напряженности электрического поля, полученные в данной работе, находятся в согласии с экспериментальными измерениями, представленными в [17], согласно которым в облаках имеются достаточно большие области со значениями  $E$  порядка 1000 В/см. В этой же работе указывается на наличие нескольких областей с различными направлениями поля.

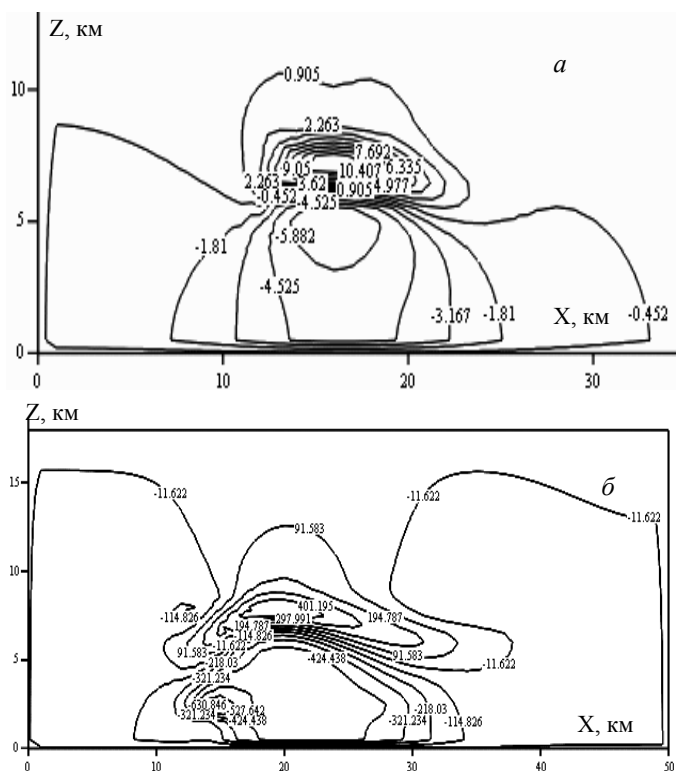


Рис. 4. Поле вертикальной составляющей напряженности электрического поля, В/см при учете процесса электрической коагуляции на 20-й (а) и 40-й (б) минутах эволюции облака

Было выполнено большое количество численных экспериментов, при различном термодинамическом состоянии атмосферы. Каждый эксперимент проводился без учета и с учетом электрической коагуляции.

В результате проведенных исследований подтверждена закономерность, что между микрофизическими, термодинамическими и электрическими процессами существует обратная связь (взаимодействие), т.е. взаимное влияние их друг на друга. В проведенных численных экспериментах получалось, что электрическое поле ускоряет рост частиц, с другой стороны при этом генерировалось большее количество электрического заряда, которое увеличивало само поле. Общая картина влияния электрического поля проявлялась в некотором ускорении прохождения облаком всех стадий развития, кроме начальной.

Применение двумерной модели, по мнению авторов, не нарушает общности полученных результатов, поскольку речь идет о взаимодействии микрофизики и электрического поля облака.

### Заключение

Основные результаты работы:

1. Уточнены вопросы формирования микроструктуры конвективных облаков с учетом электризации облака и электрической коагуляции частиц. На основе численных экспериментов получило теоретическое подтверждение предположение о возможности быстрого образования зародышей осадков вследствие взаимодействия капель радиусом до 20 мкм при наличии электрических полей в облаках.

2. С помощью математического моделирования впервые проанализирован один из важных аспектов микрофизики конвективных облаков – взаимодействие микрофизических и электрических процессов.

Результаты численных экспериментов подтверждают существование положительной обратной связи между ростом частиц осадков в облаке и увеличением напряженности электростатического поля, которая заключается во взаимном влиянии их друг на друга. Анализ результатов моделирования позволил установить, что электрическое поле ускоряет рост частиц, при этом генерируется большее количество электрического заряда, которое увеличивает само поле. Общая картина взаимного влияния проявляется в ускорении прохождения облаком всех стадий развития, кроме начальной.

3. Из полученных в ходе расчетов данных следует, что взаимодействие микрофизических и электрических процессов в мощных конвективных облаках играет существенную роль в процессе осадкообразования. В частности, в грозо-градовых облаках период образования осадков сокращается на одну треть и более.

Таким образом, результаты исследований показали, что влиянием электрического поля и электрической коагуляции в мощных конвективных облаках пренебрегать нельзя (при разработке их моделей и концепций активного воздействия на них).

Следует отметить, что заметное влияние электрические поля оказывают на формирование микроструктуры, когда их напряженность достигает значений свыше 50 В/см.

### Литература

1. *Имянитов И.М. и др.* Электричество облаков. Л., 1971.
2. *Мазин И.П., Шметер С.М.* Облака. Строение и физика образования. Л., 1983.
3. *Мейсон Б.Дж.* Физика облаков. Л., 1961.

4. Левин Л.М. // Тр. Эльбрусской высокогорной экспедиции. 1961. Т. 2. С. 5–42.
5. Красногорская Н.В. // Изв. АН СССР. ФАО. 1965. Т. 1. С. 339–345.
6. Ашабоков Б.А., Калажоков Х.Х. Численное моделирование градовых облаков. М., 1992.
7. Коган Е.Л. и др. Численное моделирование облаков. М., 1984.
8. Хворостьянов В.И. // Изв. РАН. ФАО. 1994. Т. 30. № 4. С. 543–557.
9. Chen J.P., Lamb D. // J. Atmos. Sci., 1994, Vol. 51. P. 2613–2630.
10. Rawlins F. // Quart.Jour. of the Royal Met. Society. 1982. Vol. 108. P. 779–801.
11. Helsdon J. H., Jr., Farley R. D. // J. Geoph. Res. 1987. Vol. 92. P. 5661–5676.
12. Корчагина Е.А. и др. // Информационные системы и технологии: Межвед. сб. Вып. 1. Нальчик, 2000. С. 10–17.
13. Шаповалов А.В. // Мат. моделирование. 2003. Т. 15. № 4. С. 65–76.
14. Аджиев А.Х., Тамазов С.Т. // Метеорология и гидрология. 1987. № 7. С. 57–62.
15. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. М., 1977.
16. Перишина Т.А. и др. // Тр. НИЦ ДЗА. Вып.1 (546). 1997. С. 62–67.
17. Маицков Х.М. и др. // Всерос. конф. по физике облаков и активным воздействиям на гидромет. процессы. Нальчик, 2001. С. 46–47.