

Ашабоков Б.А., Шаповалов В.А.  
 ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Нальчик

УДК 533.539

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МАКРО- И МИКРОСТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКОВ С УЧЕТОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОЦЕССОВ**

Развитие физики конвективных облаков и активных воздействий на них на современном этапе требует решения ряда крупных и взаимосвязанных между собой задач фундаментального и прикладного характера, которые отличаются от задач предыдущих этапов сложностью проведения исследований. Из этих задач на передний план в настоящее время выходит исследование образования и развития облаков с учетом их эмерджентных свойств, т.е. исследование их в целом с учетом взаимодействия процессов различных видов между собой и взаимодействия облака с окружающей атмосферой. Связано это с тем, что конвективные облака представляют собой чрезвычайно сложную термогидродинамическую и микрофизическую систему, важными особенностями которой являются нестационарность, трехмерность и нелинейность. Поэтому решение задач физики конвективных облаков требует комплексного подхода и использования более эффективных методов, важнейшее место среди которых занимает математическое моделирование.

К этому следует добавить, что, несмотря на несомненные успехи в изучении процессов в облаках, многие из них до настоящего времени изучены на недостаточном уровне. Это относится, например, к гидротермодинамике облаков, к процессам электризации облачных частиц, к влиянию электрического поля на микрофизические процессы, к обратному влиянию микрофизических процессов на формирование электрической структуры облака и к другим процессам.

Математическое моделирование позволяет детально изучать как отдельные физические процессы, так и их взаимодействие между собой. Несомненным преимуществом моделирования является еще и то, что оно позволяет изучать недоступные или малодоступные для экспериментального исследования процессы.

Цель данной работы заключалась в разработке трехмерной нестационарной модели конвективных облаков и исследовании на ее основе влияния взаимодействия процессов в облаках и состояния окружающей атмосферы на формирование их макро- и микроструктурных характеристик.

Гидротермодинамический блок модели состоит из уравнений движения, описывающих влажную конвекцию в приближении Буссинеска, в которых учитывается адвективный и турбулентный перенос, силы плавучести, трения и барических градиентов:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) u &= -\nabla \pi' + \Delta' u + l v, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) v &= -\nabla \pi' + \Delta' v - l u, \\ \frac{\partial w}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) w &= -\nabla \pi' + \Delta' w + g (\theta' / \theta_0 + 0,61 s' - Q_s) \end{aligned} \quad (1)$$

уравнения неразрывности

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

уравнения термодинамики

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \theta = \frac{L_k}{C_p T} \frac{\partial \delta M_k}{\partial t} + \frac{L_c}{C_p T} \frac{\partial \delta M_c}{\partial t} + \frac{L_3}{C_p T} \frac{\partial \delta M_3}{\partial t} + \Delta' \theta \quad (3)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) s = -\frac{\delta M_k}{\delta t} - \frac{\delta M_c}{\delta t} + \Delta' s,$$

$$\text{где } (\vec{V} \cdot \nabla) \equiv u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z}, \quad \Delta' = \frac{\partial}{\partial x} K \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial}{\partial z},$$

$\vec{V} = \{u, v, w\}$  - вектор скорости,  $u(\vec{F})$ ,  $v(\vec{F})$ ,  $w(\vec{F})$  - компоненты вектора скорости воздушных потоков в облаке;  $\pi(\vec{F})$  - потенциальная температура;  $\pi(\vec{F}) = c_p \bar{\theta} (p(\vec{F})/1000)R/c_p$  - безразмерное давление;  $\bar{\theta}$  - средняя потенциальная температура;  $R$  - газовая постоянная;  $s(\vec{F})$  - удельная влажность воздуха;  $QS(\vec{F})$  - суммарное отношение смеси жидкой и твердой фаз в облаке;  $\pi(z)$  - параметр, учитывающий изменение плотности воздуха с высотой;  $P(\vec{F})$  и  $T(\vec{F})$  - соответственно давление и температура;  $C_p$  - теплоемкость воздуха при постоянном давлении;  $L_k$ ,  $L_c$ ,  $L_3$  - соответственно удельная теплота конденсации, сублимации и замерзания;  $\pi'(\vec{F})$ ,  $\pi'(\vec{F})$ ,  $s'(\vec{F})$  - отклонения безразмерного давления, потенциальной температуры и удельной влажности от их фоновых значений в окружающей атмосфере  $\pi_\phi(\vec{F})$ ,  $\pi_\phi(\vec{F})$  и  $s\phi(\vec{F})$ ;  $\frac{\delta M_k}{\delta t}$ ,  $\frac{\delta M_c}{\delta t}$  - изменения удельной влажности за счет диффузии пара на капли и кристаллы;  $\frac{\delta M_3}{\delta t}$  - масса капельной

воды, замерзающей в единицу времени в единице объема воздуха;  $K(\vec{r})$  - коэффициент турбулентной диффузии. Вектор  $\vec{r}$  соответствует координатам (x,y,z). Для границ пространственной области используются обозначения 0,  $L_x$ , 0,  $L_y$  и 0,  $L_z$ .

Начальные и граничные условия для уравнений (1)-(3) имеют следующий вид:

$$u(\vec{r},0)=u_0(\vec{r},0),$$

$$v(\vec{r},0)=v_0(\vec{r},0), \quad (4)$$

$$w(\vec{r},0)=w_0(\vec{r},0), \quad \pi(\vec{r},0)=\pi_0(\vec{r},0),$$

$$u=u_0(z), \quad \pi=\pi_0(z), \quad p=p_0(z), \quad q=q_0(z) \text{ при } x=0, L_x, \quad v=v_0(z), \quad \pi=\pi_0(z), \quad p=p_0(z), \quad q=q_0(z) \text{ при } y=0, L_y,$$

$$u=v=w=0, \quad \pi=\pi_0(0), \quad p=p_0(0), \quad q=q_0(0) \text{ при } z=0, \quad (5)$$

$$u=u(L_z), \quad v=v(L_z), \quad w=w(L_z), \quad \pi=\pi_0(L_z), \quad p=p_0(L_z), \quad q=q_0(L_z) \text{ при } z=L_z.$$

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. Используется механизм разделения зарядов, заключающийся в электризации 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:

$$\frac{\partial f_1}{\partial t} + u \frac{\partial f_1}{\partial x} + v \frac{\partial f_1}{\partial y} + (w - V_1) \frac{\partial f_1}{\partial z} = \left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{\text{EА}} + \left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{\text{КА}} + \left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{\text{АЕ}} + \left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{\text{AD}} + \left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{\text{C}} + \Delta' f_1 + I_1, \quad (6)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial t} + u \frac{\partial f_2}{\partial x} + v \frac{\partial f_2}{\partial y} + (w - V_2) \frac{\partial f_2}{\partial z} = \left( \frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_{\text{C}} + \left( \frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_{\text{АЕ}} + \left( \frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_{\text{C}} + \Delta' f_2 + I_2 + I_{\text{AA}},$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial t} + u \frac{\partial f_3}{\partial x} + v \frac{\partial f_3}{\partial y} + (w - V_2) \frac{\partial f_3}{\partial z} = \left( \frac{\partial f_3}{\partial t} \right)_{\text{C}} + \left( \frac{\partial f_3}{\partial t} \right)_{\text{АЕ}} + \Delta' f_3$$

$$0 \leq x \leq L_x, \quad 0 \leq y \leq L_y, \quad 0 \leq z \leq L_z, \quad 0 \leq m < \infty, \quad t > 0,$$

где  $V_1(m)$ ,  $V_2(m)$  - установившиеся скорости падения жидких и твердых частиц;  $\left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{\text{KA}}$ ,  $\left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{\text{CT}}$ ,  $\left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{\text{AK}}$ ,  $\left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{\text{DP}}$ ,

$\left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_3$  - изменения функции распределения капель за счет микрофизических процессов конденсации, коагуляции капель, аккреции капель и кристаллов, дробления и замерзания соответственно;

$\left( \frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_{\text{C}}$ ,  $\left( \frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_{\text{AK}}$ ,  $\left( \frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_3$  - изменения функции распределения кристаллов за счет сублимации, аккреции и замерзания капель;

$\left( \frac{\partial f_3}{\partial t} \right)_3$ ,  $\left( \frac{\partial f_3}{\partial t} \right)_{\text{AK}}$  - 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;  $I_{\text{AB}}$  - источник искусственных кристаллов при активном воздействии льдообразующими реагентами.

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

$$f_1(\vec{r}, m, 0) = f_2(\vec{r}, m, 0) = f_3(\vec{r}, m, 0) = 0 \quad (7)$$

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

$$f_1(\vec{r}, m, t) = f_2(\vec{r}, m, t) = f_3(\vec{r}, m, t) = 0 \text{ при } y = 0, L_y, \quad (8)$$

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

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

Для расчета электрических процессов использованы результаты экспериментальных исследований 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 работе [1].

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

расчета коэффициентов электрической коагуляции облачных частиц. Для сопоставления с данными наблюдений в модели рассчитывается радиолокационная отражаемость облака на длинах волн 3.2 и 10 см.

Размеры пространственной области при расчетах задавались от 40 до 80км по горизонтали и 16-18 км - по вертикали. Шаг сетки по координатам X, Y составлял 500м, по Z - 250м. Ось X направлена на восток, Y – на север. Облако инициировалось заданием импульса у поверхности земли с перегревом  $\pi T=1-5$  оС. Форма и размеры импульса варьировались.

Для анализа результатов расчетов разработано программное обеспечение трехмерной визуализации данных, которое позволяет видеть объект моделирования, поворачивать его в вертикальной и горизонтальной плоскости, менять форму представления: изоповерхности, изоконтуры, векторное поле и т.д. Также можно быстро изменять отображаемое значение параметра с помощью перемещения ползунка в меню программы.

Результаты моделирования показывают, что динамические, термодинамические и микрофизические параметры в конвективных облаках оказывают взаимное влияние друг на друга. На рис. 1 приведены в векторной форме потоки в вертикальной плоскости, проходящей через облако. Также изображена радиолокационная отражаемость (уровень 10 dBZ), ее изображение сделано полупрозрачным для анализа потоков внутри облака. Отмечается наличие вихря с наветренной стороны облака (слева на рисунке 1) и с подветренной стороны.

Численные эксперименты, выполненные по различным данным зондирования, показали, что характеристики получающегося облака чувствительны к профилям температуры и влажности в атмосфере.

При неустойчивой стратификации получались достаточно мощные облака, вершина которых состояла из кристалликов. Выполнено сравнение характеристик модельного облака с данными наблюдений и в результате получено достаточно хорошее качественное и количественное согласие расчетных данных с экспериментальными.

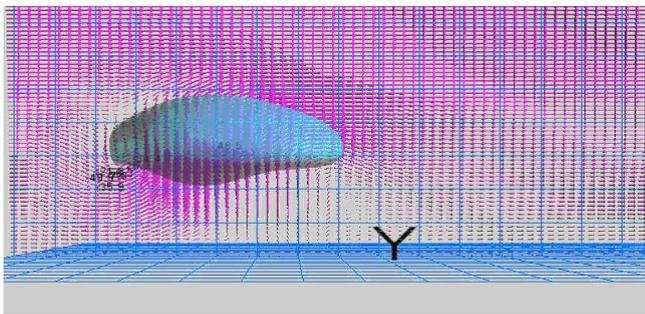


Рис. 1 – Поле скоростей воздушных потоков в вертикальной плоскости, проходящей через облако. Значения представлены векторами. Полупрозрачной выведена радиолокационная отражаемость 10 dBZ. Для ориентировки приведены горизонтальная и вертикальная сетки с ячейками 2x2 км.

Проанализированы различные параметры облака, которые получены в результате расчетов: изолинии вертикальной и горизонтальной составляющих скорости воздушных потоков, коэффициента турбулентной диффузии, водности, ледности и других в рассматриваемой пространственной области в различные моменты развития облака. Исследовано формирование микрофизических и электрических характеристик конвективных облаков без учета электрической коагуляции частиц и с ее учетом.

При расчете электрических параметров облака принято условие, что формирование и накопление электрических зарядов в облаке происходит в результате замерзания капель и процесса аккреции. 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 предвершинной части облака преобладает положительный объемный заряд, ниже – отрицательный. В работе получено электрическое строение конвективного облака в различные моменты времени. По результатам расчетов положительный заряд в единице объема на 20-й минуте достигает значений  $-1.9 \cdot 10^{-9}$  Кл/м<sup>3</sup>, отрицательный  $-1.4 \cdot 10^{-9}$  Кл/м<sup>3</sup> (рис. 2).

С течением времени заряд в облаке, и, соответственно потенциал поля увеличиваются. Максимальные значения потенциала электрического поля, полученные в расчетах, имели значения около 800 МВ. Они согласуются с результатами расчетов других авторов.

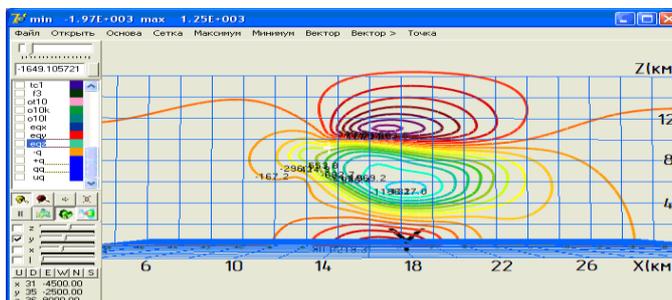


Рис. 2 – Напряженность электростатического поля на

20-й минуте, В/см.

Рассчитанные в каждый момент времени в узлах пространственной сетки значения напряженности электростатического поля учитывались при расчете коэффициентов коагуляции капель и кристаллов. Для этой цели использовались аппроксимационные выражения, построенные по экспериментальным и теоретическим данным [2,3].

При значительной концентрации жидкой воды и при наличии в облаке некоторого количества крупных капель или кристаллов, рост осадков происходит достаточно быстро. Но, известно, что 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 достаточно маленький. По различным данным, он составляет от 0,001 до 0,01. Как было отмечено выше, при наличии электрического поля и зарядов на частицах этот коэффициент значительно возрастает и при соответствующих условиях может превышать 1.

#### ლიტერატურა—REFERENCES—ЛИТЕРАТУРА

1. Аджиев А.Х., Тамазов С.Т. Разделение электрических зарядов при кристаллизации капель воды// Метеорология и гидрология, 1987. N7.- С.57-62.
2. Левин Л.М. Электрическая коагуляция облачных капель// Тр.Эльбрусской высокогорной экспедиции, 1961, Т.2. – С. 5-42.
3. Красногорская Н.В., Неизвестный А.И. О скорости коагуляционного роста заряженных облачных капель// Тр. I Всесоюз. симп. по атмосферн. электричеству.- Л.:Гидрометеоиздат, 1976.

შპპ 533.539

**კონვექციურ ღრუბელთა მაკრო- და მიკროსტრუქტურული მახასიათებლების ფორმირების რიცხვითი მოდელირება პროცესების ურთიერთქმედების გათვალისწინებით** /აშაბოკოვი ბ., შაპოვალოვი ვ. /საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტის შრომათა კრებული -2011.-ტ.117.-გვ. 150-153.-რუს.; რეზ. ქართ., ინგლ., რუს

განხილულია კონვექციური ღრუბლების მატემატიკური მოდელირების ზოგიერთი პრობლემები. მოყვანილია სამგანზომილებიანი არასტაციონარული მოდელი თერმოჰიდროდინამიკის, მიკროფიზიკის და ელექტრობის პროცესების დეტალური გათვალისწინებით და მის რიცხვითი რეალიზაციის ალგორითმი. მოყვანილია კონვექციური ღრუბლების ჩამოყალიბების და განვითარების გაანგარიშების შედეგები სხვადასხვა პირობებში

UDC: 533.539

**Results of mathematical modeling of the formation of macro- and microstructure features of convective clouds considering the interaction of processes.**/Ashabokov B.A., Shapovalov V.A./Transactions of the Institute of Hydrometeorology, Georgian Technical University.-2011.-т.117.– pp. 150-153. -Russ.;Summ.Georg.;Eng.; Russ.

Some problems of mathematical modeling of convective clouds are discussed. The three-dimensional non-stationary models with a detailed account of processes thermohydrodynamics, microphysical and electrical processes, as well as an algorithm for its numerical implementation are presented. We discuss the results of calculations of the formation and development of convective clouds under various conditions

УДК 533.539

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МАКРО- И МИКРОСТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКОВ С УЧЕТОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОЦЕССОВ.**/Ашабоков Б.А., Шаповалов В.А/Сб. Трудов Института Гидрометеорологии Грузинского Технического Университета Грузии. – 2011. – т.117. – с. 150-153. – Рус.; Рез. Груз., Анг.,Рус

Обсуждаются некоторые проблемы математического моделирования конвективных облаков. Приводятся трехмерная нестационарная модель с детальным учетом процессов термогидродинамики, микрофизических и электрических процессов, а также алгоритм ее численной реализации. Обсуждаются результаты расчетов образования и развития конвективных облаков при различных условиях.