

УДК 551.576.11

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ, МИКРОСТРУКТУРНЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКОВ НА СТАДИИ РОСТА И МАКСИМАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ

*Б. А. Ашабоков, А. В. Шаповалов, Д. Д. Кулиев, К. А. Продан, В. А. Шаповалов*

Высокогорный геофизический институт Росгидромета, г. Нальчик, Россия

На основе разработанной авторами трёхмерной нестационарной модели с детальным учётом гидродинамических, термодинамических, микрофизических и электрических процессов проведены численные расчёты формирования конвективных облаков при неустойчивой стратификации атмосферы и фоновом ветре. Исследовано формирование положительного и отрицательного объёмных электрических зарядов и рассчитано электростатическое поле на разных стадиях развития облака. Найденная напряжённость электростатического поля использована для корректировки коэффициента коагуляции облачных частиц, который увеличивается при наличии поля и зарядов. Установлено, что за счёт электрической коагуляции время роста частиц осадков в мощном конвективном облаке сокращается на 20÷30 %.

Несмотря на несомненные успехи физики облаков, многие процессы, определяющие их макро- и микроструктуру, изучены недостаточно. Это, в первую очередь, относится к электризации облачных частиц, к влиянию электрического поля на микрофизические параметры, к обратному влиянию микроструктуры облака на заряд и поле. Исследование этих процессов требует комплексного подхода и эффективных методов, важнейшее место среди которых занимает математическое моделирование.

На основе разработанной авторами трёхмерной нестационарной модели с детальным учётом гидродинамических, термодинамических, микрофизических и электрических процессов проведены численные расчёты формирования конвективных облаков при неустойчивой стратификации атмосферы и фоновом ветре.

В отличие от моделей с параметризованной микрофизикой [1], модели с детальным учётом микрофизических процессов позволяют исследовать формирование микроструктурных характеристик облаков, образование облачных частиц и другие явления. В большинстве таких моделей для описания микрофизических процессов используются кинетические уравнения для функций распределения частиц по размерам или массам [2, 3].

Использование детальных микрофизических уравнений в модели облака предпочтительно, т. к. в этом случае изменение его микроструктурных характеристик со временем описывается строгими физическими формулами. При использовании малого количества классов частиц в моделях с параметризованной микрофизикой (например пяти) теряются индивидуальные физические свойства капель и ледяных кристаллов различных размеров в облаке. Следует отметить, что коэффициент гравитационной коагуляции является сложной функцией, зависящей от размеров взаимодействующих частиц, и замена его одним числом представляет собой грубое приближение.

Модели с параметризованной микрофизикой появились десятки лет назад как вынужденный этап в численном моделировании облаков для преодоления проблем с вычислительными ресурсами. Современные возможности вычислительной техники вполне позволяют переходить к полным уравнениям, детально описывающим физические процессы в облаке, что и демонстрируется в настоящей статье.

Полученные в рамках детальной микрофизической модели результаты отражают нелинейные эффекты физики облаков, которые невозможно оценить в более простых моделях. Ниже представлено краткое описание трёхмерной нестационарной модели конвективного облака с детальным учётом гидродинамических, термодинамических, микрофизических и электрических процессов. Гидродинамический и термодинамический блок модели состоит из уравнений, описывающих конвекцию влажного воздуха в приближении Буссинеска, в которых учитывается адвективный и турбулентный переносы, силы плавучести, трения и барических градиентов [2]. Микрофизический блок модели описывает нуклеацию, конденсацию, коагуляцию капель с каплями, сублимацию, аккрецию, замерзание капель, осаждение облачных частиц в поле силы тяжести, их перенос воздушными потоками, а также взаимодействие облачных частиц под влиянием электрического поля облака.

Под термином «аккреция» в статье подразумеваются столкновения капель с ледяными кристаллами, а в отношении взаимодействия капельных фракций использован термин «коагуляция».

Система уравнений записана для функций распределения капель  $f_1(\mathbf{r}, m, t)$ , ледяных частиц  $f_2(\mathbf{r}, m, t)$  и мелких ледяных частиц, образующихся при быстром замерзании и растрескивании переохлажденных облачных капель  $f_3(\mathbf{r}, m, t)$  по их массам [3]. В модели учитывается электризация ледяных частиц на стадии формирования осадков: замерзшие капли приобретают отрица-

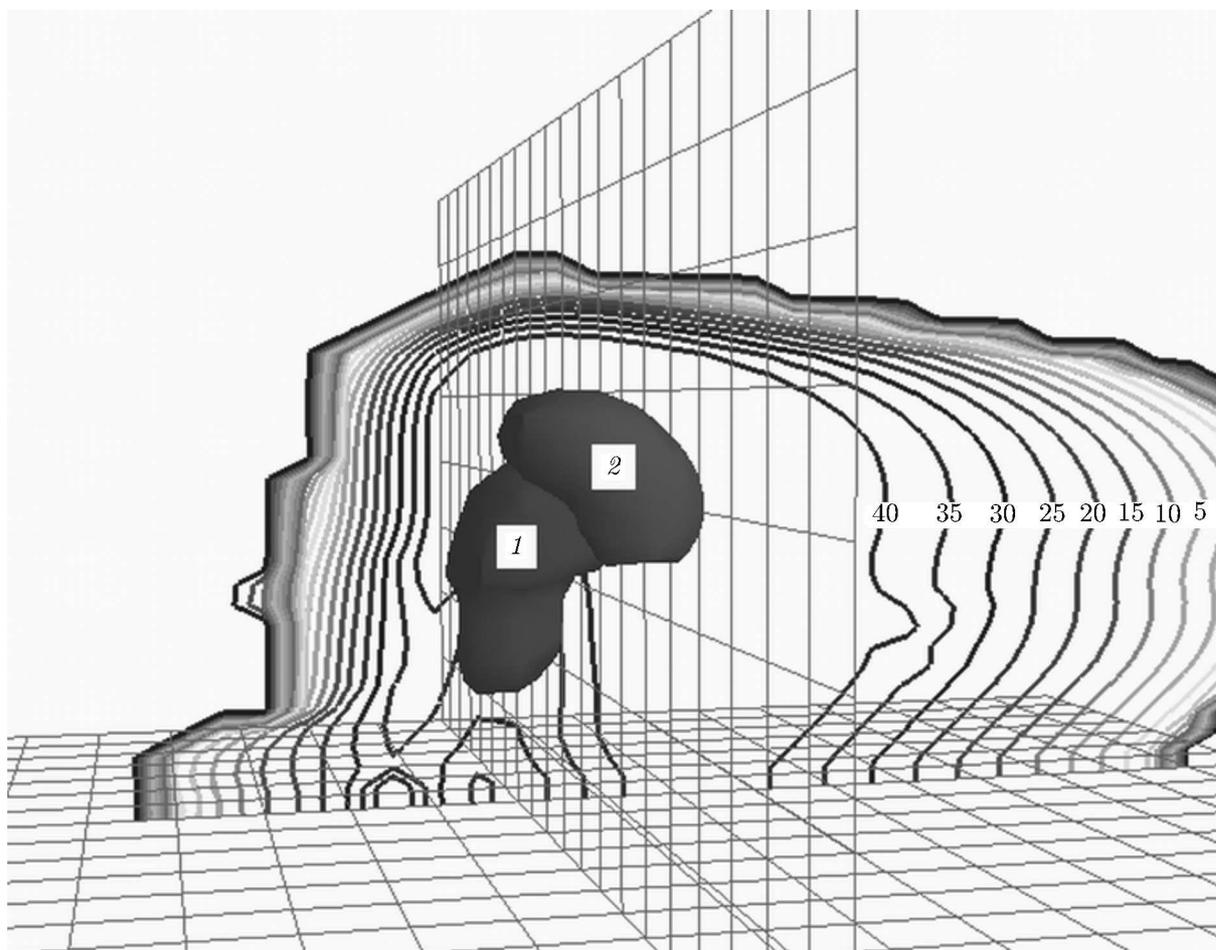


Рис. 1. Область 1 сосредоточения капельной фракции и область 2 формирования крупных ледяных частиц на 20-й минуте развития облака. Приведены также контуры интенсивности отражённого радиолокационного сигнала. Высота облака 12 км, максимальное сечение рассеяния 56 дБZ

тельный заряд, микрочастицы, образующиеся при замерзании капель (микровыбросы), получают положительный заряд.

Для расчёта электрических зарядов и поля в облаке были аппроксимированы экспериментальные зависимости характеристик выбросов микрочастиц от размера замерзающей капли и коэффициентов разделения зарядов, связанных с замерзанием капель воды и взаимодействием кристаллов с переохлаждёнными каплями. В модели на каждом временном шаге рассчитываются объёмные заряды в облаке, электростатический потенциал, создаваемый этими зарядами, а также горизонтальные и вертикальная составляющие напряжённости поля облака [3]. Для сопоставления с данными радиолокационных наблюдений облаков в модели рассчитывается также интенсивность отражённого радиолокационного сигнала модельного облака на длинах волн 3,2 и 10 см.

Размеры пространственной области при расчётах варьировались в диапазонах 40÷80 км по горизонтали и 16÷18 км по вертикали. Шаг сетки по горизонтальным координатам  $x$  и  $y$  составлял 500÷1000 м, по вертикали  $z$  — 250÷500 м. Облако инициировалось заданием области у поверхности Земли с перегревом  $\Delta T = 1,5^\circ\text{C}$ . Область выбиралась в виде цилиндра с радиусом в горизонтальной плоскости  $R = 2,5$  км и с высотой  $H = 2,0$  км. Такой шаг сетки приемлем для описания динамических процессов в мощных облаках, что проверялось авторами специально проведёнными тестовыми расчётами с различной дискретностью по пространственным координатам. Вместе с тем следует отметить, что при использовании крупной пространственной сетки мелкомасштабная турбулентность остаётся неучтённой. Для анализа результатов расчётов авторами разработано программное обеспечение трёхмерной визуализации данных моделирования, адаптированное для изучения строения облаков.

Остановимся на результатах исследований гидродинамических, термодинамических, микро-

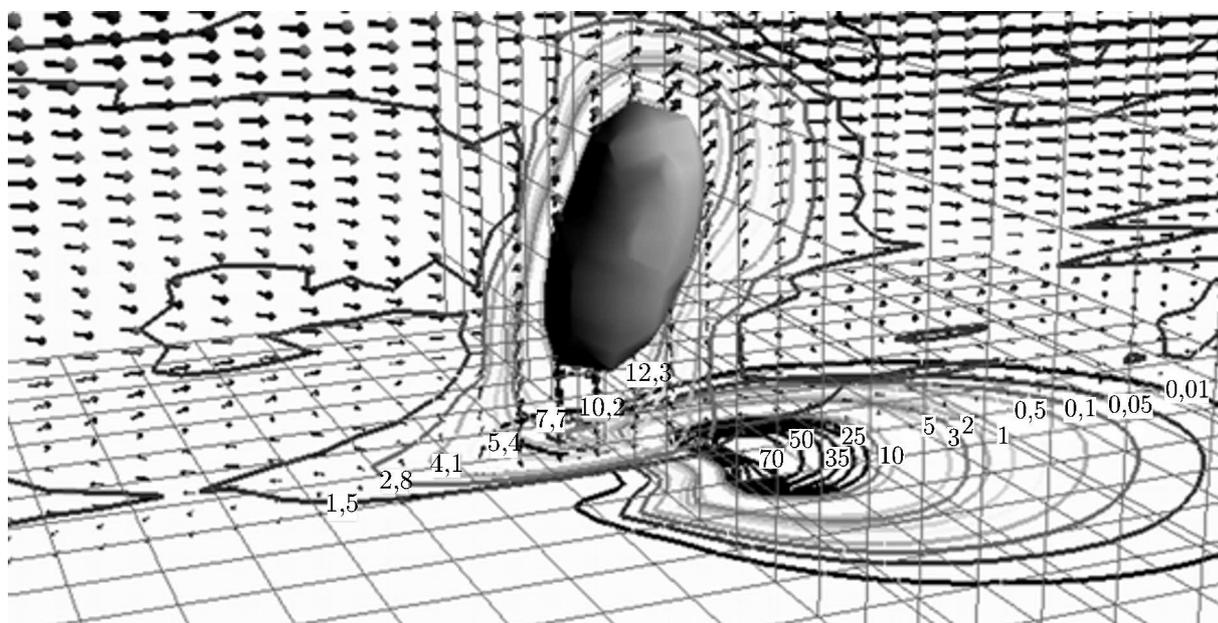


Рис. 2. Строение мощного конвективного облака в момент времени  $t = 40$  мин. На рисунке приведены: потоки воздуха в вертикальной плоскости, пересекающей облако (векторное поле); изоповерхность мощного восходящего потока, отвечающая скорости  $w = 15,6$  м/с (трёхмерная поверхность в центре рисунка); изолинии вертикальной скорости в метрах в секунду; изолинии интенсивности осадков у поверхности земли (в горизонтальной плоскости, на уровне 1 км) в миллиметрах в час. Ячейки горизонтальной и вертикальной сеток на всех рисунках имеют размер  $2 \times 2$  км

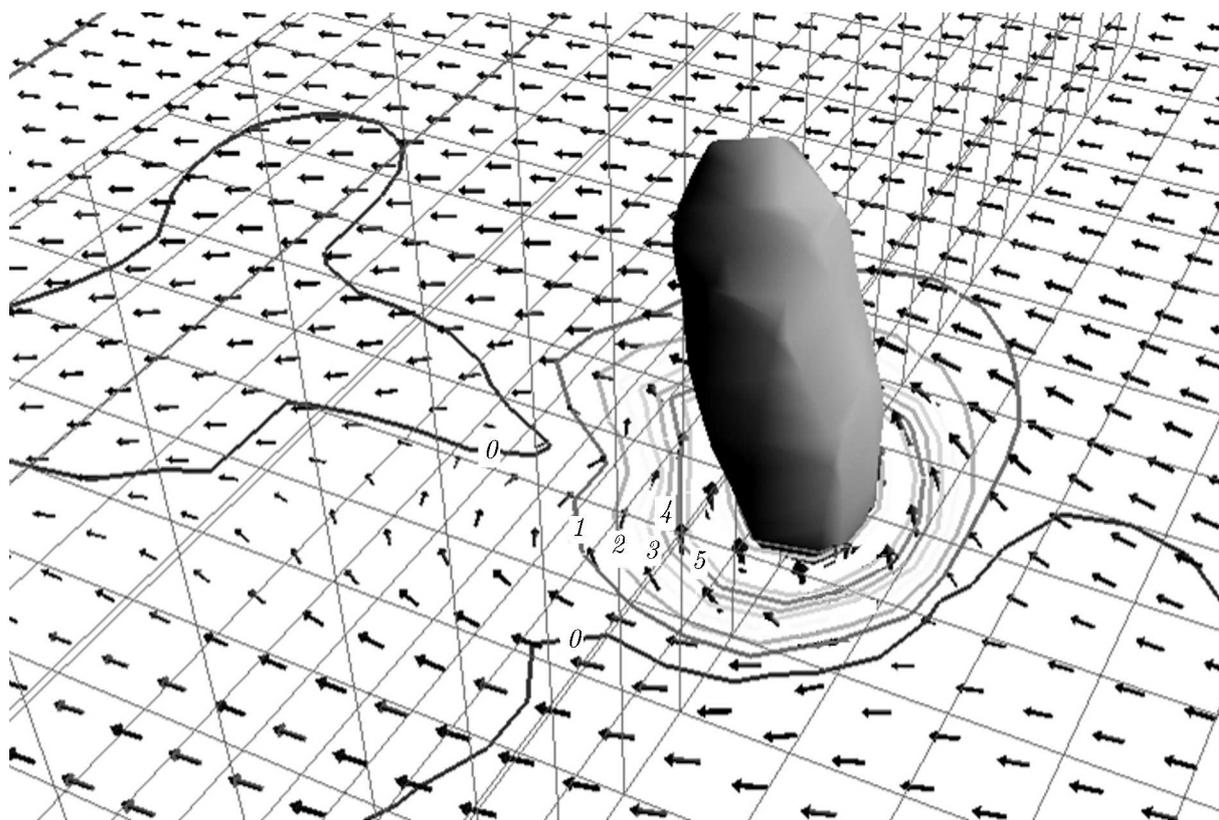


Рис. 3. Горизонтальные потоки на высоте  $z = 4$  км в момент времени  $t = 40$  мин. Направление стрелок показывает, что потоки воздуха обтекают облако и за ним образуется гидродинамическая тень (область пониженной скорости). Сплошная поверхность на рисунке — изоповерхность скорости восходящего потока  $w = 15,6$  м/с. В горизонтальной плоскости приведены изолинии вертикальной компоненты скорости воздушных потоков: изолиния 0 соответствует нисходящим потокам со скоростью  $w = -1,2$  м/с; изолиния 1 — восходящим потокам со скоростью  $w = 2,8$  м/с; 2 —  $w = 4,1$  м/с; 3 —  $w = 5,4$  м/с; 4 —  $w = 6,7$  м/с; 5 —  $w = 8,0$  м/с

структурных и электрических параметров конвективных облаков при неустойчивом состоянии атмосферы, для моделирования которого были использованы данные аэрологического зондирования в аэропорту Минеральные Воды 7 июня 2012 года. В радиусе действия зонда в этот день наблюдались ливни, грозы и град. Имеется также архив данных метеорологических радиолокационных наблюдений с радиолокаторов МРЛ-5, расположенных в районе г. Нальчик.

На рис. 1 показаны область сосредоточения капельной фракции 1 и область формирования крупных ледяных частиц 2 на 20-й минуте развития облака. Также изображена интенсивность отражённого радиолокационного сигнала (изолинии через 5 дБZ). По результатам расчётов ледяная фаза в облаке образуется за счёт замерзания капель, а дальнейший рост крупных ледяных частиц, крупы и градин происходит за счёт аккреции.

При расчёте электрических параметров облака считалось, что формирование и накопление электрических зарядов в нём происходит в результате замерзания капель и аккреции, т. е. взаимодействия капель и кристаллов. Вследствие разных скоростей падения в воздухе микроосколков (заряжающихся преимущественно положительно) и более крупных частиц, крупы и града (заряжающихся преимущественно отрицательно) происходит пространственное разделение зарядов: в предвершинной части облака преобладает положительный объёмный заряд, ниже — отрицательный. Плотность положительного заряда на 20-й минуте достигает  $2,8 \cdot 10^{-9}$  Кл/м<sup>3</sup>, отри-

цательного —  $1,5 \cdot 10^{-9}$  Кл/м<sup>3</sup>. По результатам моделирования исследовано пространственное распределение суммарного объёмного заряда в облаке в различные моменты времени.

На 20-й минуте развития облака электрический потенциал составлял величину порядка  $1,4 \cdot 10^9$  В. Компоненты  $E_x$ ,  $E_y$  напряжённости поля составляли около 1300 В/см, а  $E_z \approx \approx 2000$  В/см. Рассчитанная в каждый момент времени в узлах пространственной сетки напряжённость электростатического поля учитывалась при вычислении коэффициентов коагуляции капель и кристаллов.

Примерно к 40-й минуте облако достигает стадии максимального развития и уже даёт жидкие и твёрдые осадки. На рис. 2 и 3 представлены вертикальные и горизонтальные потоки в зоне облака в момент времени  $t = 40$  мин. Максимальная скорость восходящего потока  $w = 29,1$  м/с отмечается на уровне  $z = 6000$  м, скорость нисходящего потока равна  $-3,15$  м/с. Столб восходящего потока имеет небольшой наклон по направлению горизонтального потока воздуха.

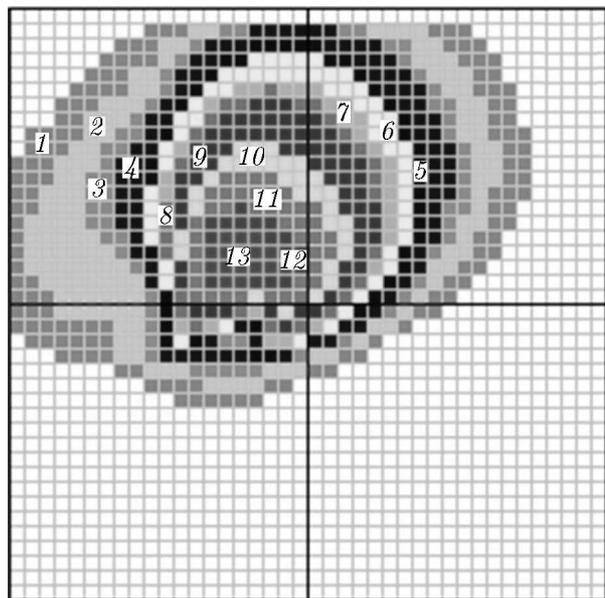


Рис. 4. Интенсивность осадков на уровне  $z = 1$  км в момент времени  $t = 40$  мин в миллиметрах в час. Изоконтур 1 соответствует интенсивности 0,05 мм/ч; 2 — 0,2 мм/ч; 3 — 0,5 мм/ч; 4 — 1,0 мм/ч; 5 — 2,0 мм/ч; 6 — 3,0 мм/ч; 7 — 5,0 мм/ч; 8 — 7,0 мм/ч; 9 — 10,0 мм/ч; 10 — 20,0 мм/ч; 11 — 30,0 мм/ч; 12 — 50,0 мм/ч; 13 — 70,0 мм/ч

С течением времени заряд в облаке и, соответственно, электростатический потенциал увеличиваются. Максимальный электрический потенциал, полученный в расчётах, составлял более 2000 МВ. Максимум находится в верхней фронтальной части облака в районе «наковальни». Область максимума потенциала находится на  $5 \div 10$  км впереди зоны осадков. Напряжённость электростатического поля на 40-й минуте составляет  $2000 \div 3000$  В/см.

Радиолокационная структура облака на длине волны 10 см в момент времени  $t = 45$  мин приведена на рис. 7. На нём в зоне восходящего потока наблюдается область слабого радиоэха в вертикальном разрезе по направлению перемещения облака, известная в литературе как BWER (Bounded Weak Echo Region). Таким образом, структура радиоэха модельного облака согласуется

Интенсивность осадков в момент времени 40 мин представлена на рис. 4. Её максимальное значение составляет 99 мм/ч. На рисунке отображена область  $40 \times 40$  км и интенсивность осадков в виде залитых цветовых контуров с определённой интенсивностью, палитра приведена на рис. 4а. Размер клеток сетки для этого рисунка составляет  $1 \times 1$  км.

На рис. 5 приведены изоповерхность скорости восходящего потока  $w = 15$  м/с и изоповерхность лёдности  $2$  г/м<sup>3</sup> в момент времени  $t = 40$  мин. Осадки образуются в верхней части восходящего потока, затем происходит их дальнейший рост и выпадение в стороне (впереди и левее) от восходящего потока.

На рис. 6 приведены изоповерхность скорости восходящего потока  $w = 15$  м/с в момент времени  $t = 40$  мин, изоповерхность лёдности  $2$  г/м<sup>3</sup> и область положительного заряда, который сосредоточен на осколках замерзания капель. Область положительного заряда находится в верхней части облака и имеет вид вытянутого по ветру относительно тонкого слоя — «наковальни». Максимальная плотность положительного объёмного заряда в «наковальне» составляет  $2,4 \cdot 10^{-9}$  Кл/м<sup>3</sup>.

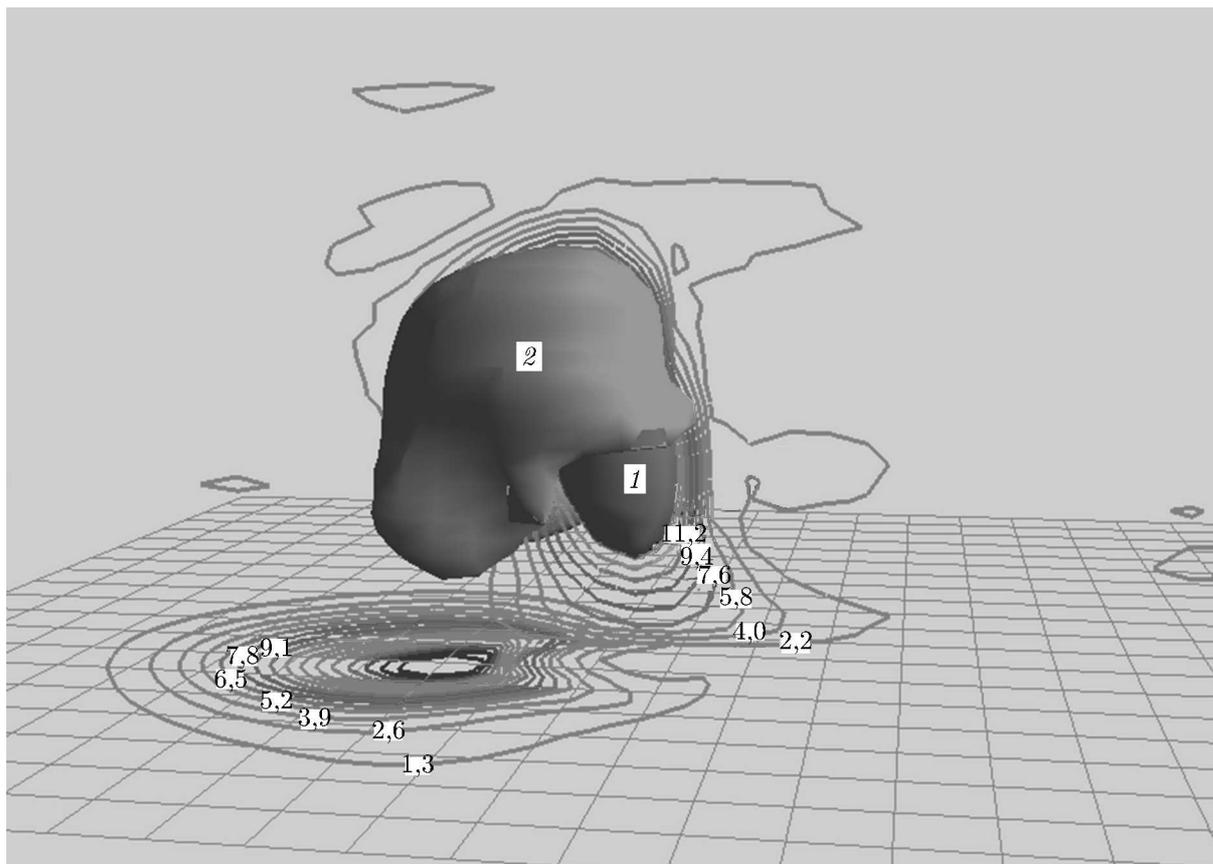


Рис. 5. Структура облака в момент времени  $t = 40$  мин. В вертикальном сечении приведены изолинии скорости вертикальных потоков (минимум скорости нисходящих потоков равен  $-3,15$  м/с, восходящих потоков равен  $29,1$  м/с); изоповерхность 1 соответствует скорости восходящего потока  $15$  м/с; изоповерхность 2 — лёдности  $2$  г/м<sup>3</sup>. На горизонтальной плоскости показаны изолинии интенсивности осадков в миллиметрах в час

с данными наблюдений грозоградовых облаков на стадии максимального развития.

Следует отметить, что пока при моделировании не учитываются неоднородности термодинамических параметров, имеющие место в реальной атмосфере, поэтому поля термодинамических и микроструктурных параметров модельного облака в определённой мере сглажены.

Нами проведены численные эксперименты с учётом электрической коагуляции облачных частиц и без её учёта. Сравнение времени образования осадков в этих двух случаях показало, что за счёт электрической коагуляции время роста частиц осадков в мощном конвективном облаке существенно (приблизительно на  $20 \div 30$  %) сокращается.

Результаты расчётов на основе трёхмерной модели с детальным учётом гидродинамических, термодинамических, микрофизических и электрических процессов показывают, что эти процессы в конвективных облаках взаимно влияют друг на друга, т. е. взаимодействуют. Это нелинейное взаимодействие имеет весьма сложный характер и играет важную роль в формировании микроструктуры облаков. Динамические процессы значительно влияют на поля термодинамических параметров в облаке, которые, в свою очередь, определяют микрофизические процессы и рост частиц осадков. Необходимость изучения взаимодействия процессов в конвективных облаках связана с их важной ролью в облако- и осадкообразовании.

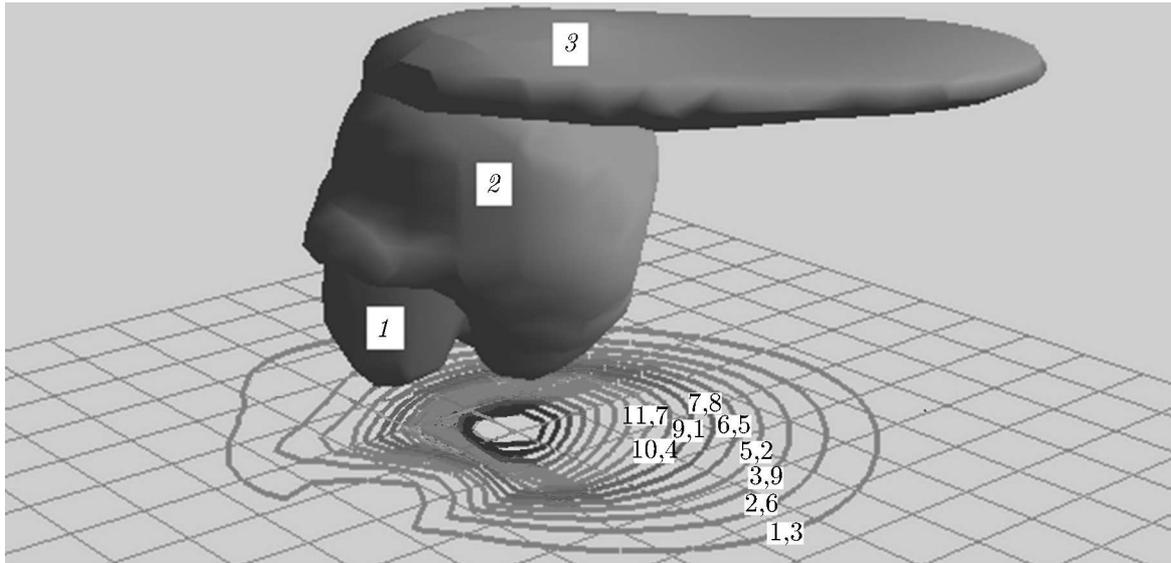


Рис. 6. Исоповерхность 3 соответствует плотности положительного объёмного заряда  $1,6 \cdot 10^{-9}$  Кл/м<sup>3</sup> в момент времени  $t = 40$  мин, область его распределения вытянута в виде «наковальни». Исоповерхность 1 соответствует скорости восходящего потока  $w = 15$  м/с, изоповерхность 2 — лёдности  $2$  г/м<sup>3</sup>. В горизонтальной плоскости приведены изолинии интенсивности осадков в миллиметрах в час

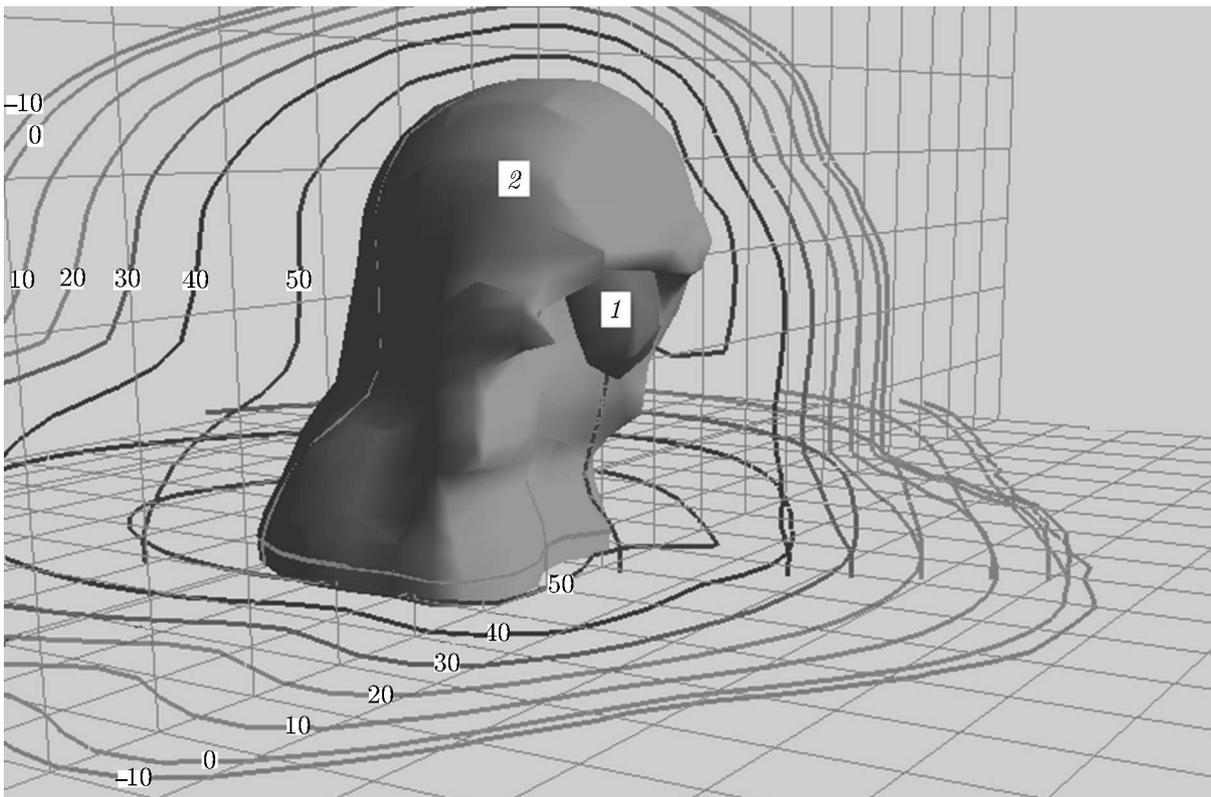


Рис. 7. Горизонтальные и вертикальные изолинии интенсивности отражённого радиолокационно-го сигнала в момент времени  $t = 45$  мин; изоповерхность 2 отвечает интенсивности отражённого сигнала 55 дБZ, изоповерхность 1 — вертикальной скорости  $w = 15$  м/с

Таким образом, нами проведены численные расчёты формирования мощных конвективных облаков при заданной стратификации атмосферы и фоновом ветре. Определены гидродинамические, термодинамические и микроструктурные параметры в зоне конвективного облака в различные моменты времени и исследован характер циркуляции воздуха. Рассмотрено формирование положительного и отрицательного объёмных электрических зарядов, рассчитаны характеристики электростатического поля на разных стадиях развития. Учтены процессы электрической коагуляции. Установлено, что за счёт электрической коагуляции время роста частиц осадков в мощном конвективном облаке сокращается на 20÷30 %.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение 8323 от 16.08.2012).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Довгалоук Ю. А., Веремей Н. Е., Владимиров С. А. и др. // Труды Главной геофизической обсерватории. 2010. Вып. 562. С. 7.
2. Коган Е. Л., Мазин И. П., Сергеев Б. Н., Хворостьянов В. И. Численное моделирование облаков. М., 1984. 186 с.
3. Куповых Г. В., Ашабоков Б. А., Бейтуганов М. Н. и др. // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. 2012. № 6. С. 65.

Поступила в редакцию 23 апреля 2013 г.; принята в печать 27 декабря 2013 г.

### NUMERICAL SIMULATION OF THERMODYNAMIC, MICROSTRUCTURAL, AND ELECTRIC CHARACTERISTICS OF CONVECTIVE CLOUDS AT THE GROWTH AND MAXIMUM-DEVELOPMENT STAGES

*B. A. Ashabokov, A. V. Shapovalov, D. D. Kuliev, K. A. Prodan, and V. A. Shapovalov*

Numerical calculations of convective-cloud formation during unstable atmospheric stratification and background wind are performed using the author's three-dimensional nonstationary model with detailed allowance for hydrodynamic, thermodynamic, microphysical, and electric processes. Formation of the positive and negative volume electric charges is studied and electric field is calculated at various cloud-development stages. The obtained electrostatic-field intensity is used for correction of the cloud-particle coagulation coefficient which increases in the presence of the field and the charges. It is found that the precipitation-particle growth time in a high-power convective cloud is decreased by 20–30% due to electric coagulation.