

## Исследование пространственного распределения микроструктурных и электрических параметров в мощном конвективном облаке на основе трехмерной численной модели

*В.А. Шаповалов, Е.А. Ковалев, Д.Д. Кулиев, И.А. Муратов,*

*М.А. Шериева, А.В. Шаповалов*

*Высокогорный геофизический институт, Нальчик*

**Аннотация:** В работе рассмотрены характеристики облачной конвекции, полученные в ходе вычислительных экспериментов на основе трехмерной физико-математической модели конвективных облаков, в которой детально учитываются микрофизические процессы нуклеации, конденсации или сублимации водяного пара, коагуляции и аккреции частиц осадков, накопления объемных электрических зарядов, роста напряженности электрического поля облака вследствие процессов разделения зарядов, происходящего при быстром замерзании крупных переохлажденных капель, аккреционном росте крупы и градин. На основе данных численного моделирования с применением отмеченной модели исследовано расположение в объеме микроструктурных параметров грозоградовых облаков (водности и ледности), объемных зарядов, напряженности электрического поля, радиолокационной отражаемости в сантиметровом диапазоне, и других параметров в фиксированные моменты времени эволюции облака.

**Ключевые слова:** конвективное облако, микроструктура облаков, электричество облаков, численная трехмерная модель, радиолокационная отражаемость, электрическая коагуляция, взаимодействие физических процессов, эволюция облака, вычислительные эксперименты, характеристики облаков.

Характеристики физических процессов в облаках обусловлены тем, что все они взаимодействуют между собой и изменения в любом из них непосредственным образом влияют на другие процессы. В качестве примера можно отметить, что вариации поля температуры в облаке приводят к изменению интенсивности микрофизических процессов, к трансформации спектра капель и кристаллов в облаке и другим изменениям. Исследование роли каждого отдельного механизма взаимодействия процессов в формировании облаков основано на сравнении параметров, получающихся у модельного облака в результате вариации поля параметра, соответствующего исследуемому механизму взаимовлияния процессов в облаке.

В работе исследуются вопросы взаимовлияния электрических и микрофизических процессов в развитых конвективных облаках. Отметим, что исследовать взаимное влияние физических процессов для облаков можно только на основе математического моделирования. Из работ, посвященных данному вопросу, можно отметить статью [1], в которой исследовано влияние искажения полей гидро- и термодинамических параметров (следствие взаимовлияния физических процессов в облаке) на эволюцию их микроструктурных параметров.

Кратко остановимся на используемой в исследованиях трехмерной физико-математической модели с явным описанием, как термодинамических, так и микрофизических и электрических процессов. Для создания модели применялись уравнения, широко используемые при моделировании конвективных облаков, например, в статьях [1,2] и монографиях [3,4]. Физика процессов и математические проблемы, связанные с решением уравнений модели для реалистичного описания эволюции самих облаков и процессов накопления и стока электрических зарядов, протекающих в них, обсуждаются во многих работах. В частности, взаимодействие с подстилающей поверхностью в работе [5], параметризация процессов электризации частиц в работах [6,7], взаимодействие грозových ячеек при слиянии в работе [8], рост потенциала и зарядов частиц при развитии грозы в работе [9], роль ледяной фазы исследована в [10].

Гидротермодинамика модели основана на уравнениях движения, описывающего влажную конвекцию в приближении Буссинеска. Здесь учитываются адвекция и турбулентный перенос, силы трения, плавучести и барические градиенты [4]. Микрофизика описывает процессы нуклеации, конденсации, сублимации, осаждения облачных частиц в поле силы тяжести, коагуляции капель с каплями, замерзания капель, аккреции, перенос частиц воздушными потоками [10].

---

Результаты вычислительных экспериментов такой численной модели воспроизводят нелинейные эффекты физики облаков, недоступные для оценки и изучения с применением более простых моделей, использующих параметризацию.

Для изучения того, какую роль играет в облаках взаимовлияние процессов, особенно в эволюции их макро - и микроструктурных параметров проводились вычислительные эксперименты с «включенной» электрической коагуляцией, и без ее учета. Облако моделировалось в домене от 30 до 60 км по горизонтали, и 16 - 20 км по вертикали. Использовались как данные аэрологического зондирования атмосферы, так и объемное распределение термодинамических параметров по GFS модели, как показано в работе [11], которое может применяться для прогноза процессов облачной конвекции.

Остановимся на некоторых результатах экспериментов - особенностях расположения в объеме параметров микроструктуры конвективного облака (водности и ледности), радиолокационной отражаемости на длине волны 3 см, электрических объемных зарядов, напряженности электрического поля, и иных параметров в фиксированные моменты времени. Были выполнены по два расчета для всех моделируемых облаков: в первом варианте для частиц не учитывалась электрическая коагуляция, во втором учитывалась. Это позволило оценить вклад электрических процессов в формирование облачных частиц осадков.

На рис. 1 приведены изоповерхности ледности, водности и изолинии восходящих и нисходящих потоков в вертикальном сечении мощного конвективного облака на 40-й минуте развития. Вспомогательная сетка на рисунках имеет ячейки 2x2 км.

На рис. 2 приведены изолинии радиолокационной отражаемости облака, на рис. 3 - изолинии вертикальной составляющей напряженности электрического поля. Для анализа изолиний слева на рисунках приведена

---

цветовая палитра с соответствующими значениями параметра. Рисунки получены с использованием авторской программы трехмерной визуализации параметров [12].

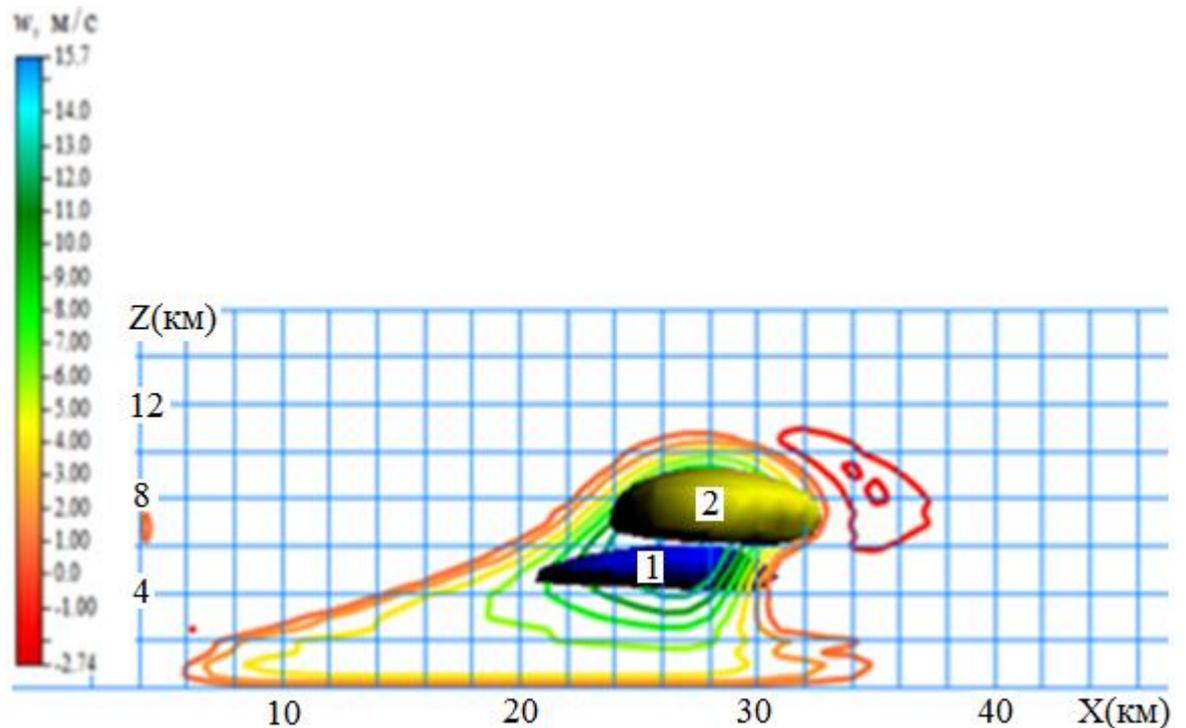


Рис. 1. – Изоповерхности водности  $3.00 \text{ г/м}^3$  (1) и ледности  $3.00 \text{ г/м}^3$  (2) на фоне изолиний вертикальной составляющей скорости воздушных потоков в вертикальной плоскости на 40 минуте

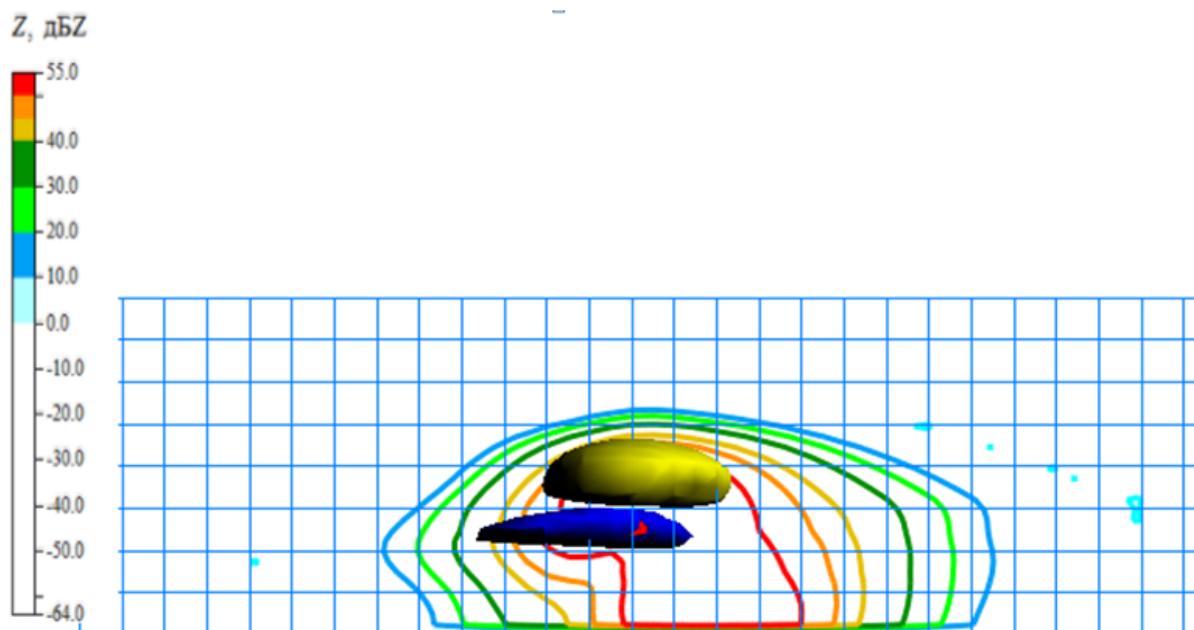


Рис. 2. – Изоповерхности водности  $3.00 \text{ г/м}^3$  и ледности  $3.00 \text{ г/м}^3$  на фоне изолиний отражаемости в вертикальной плоскости на 40 минуте

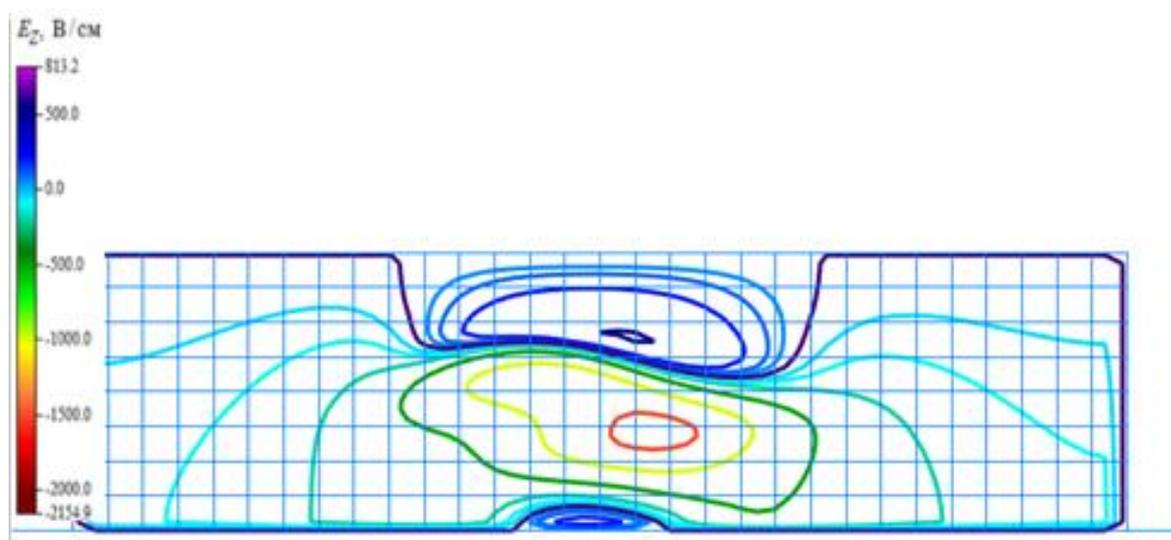


Рис. 3. – Изолиний вертикальной составляющей напряженности поля в вертикальной плоскости на 40 минуте

Максимальные значения некоторых параметров на 40-й минуте развития облака имели следующие значения:

- Водность:  $3.51 \text{ г/м}^3$ ,  $H = 5.0 \text{ км}$ .
- Лёдность:  $4.84 \text{ г/м}^3$ ,  $H = 8.0 \text{ км}$ .

- Суммарная водность и лёдность:  $5.77 \text{ г/м}^3$ ,  $H= 7.0 \text{ км}$ .
- Вертикальная скорость  $w$ :  $15.7 (-2.74, \text{нисходящие потоки}) \text{ м/с}$ ,  
 $H= 6.5 (9.5) \text{ км}$ .
- Коэффициент турбулентной диффузии:  $420 \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $H= 5.5 \text{ км}$ .
- Радиолокационная отражаемость (3 см):  $55 \text{ дБZ}$ ,  $H= 0.5 \text{ км}$ .

В ходе интерпретации результатов моделирования определено, что образование и аккумуляция электрических зарядов на частицах в облаке происходят вследствие таких процессов, как аккреция (столкновение и смерзание капель и ледяных частиц), замерзания крупных капель и при взаимном смерзании кристаллов. Разделение зарядов происходит из-за разной скорости падения частиц в воздухе. Мелкие осколки (в большинстве заряженные положительно) и крупные ледяные кристаллики, частицы крупы, градины (в большинстве имеющие отрицательные заряды) [13] фильтруются воздушными потоками в вертикальной плоскости. Происходит разделение электрических зарядов в пространстве: в верхней части облака в большей степени скапливается положительный объёмный заряд, ниже — отрицательный. Плотность отрицательного заряда достигала  $1,3 \cdot 10^{-9} \text{ Кл/м}^3$ , положительного —  $2,5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл/м}^3$ , электростатический потенциал равнялся  $1,3 \cdot 10^9 \text{ В}$ . Горизонтальные проекции напряжённости поля составляли около  $1400 \text{ В/см}$ , вертикальная достигала значений  $2000 \text{ В/см}$ . Вычисляемая в каждый фиксированный момент времени в узлах координатной вычислительной сетки напряжённость электростатического поля учитывалась в модели при расчете коэффициентов слияния (коагуляции) капель и частиц ледяной фазы [10].

По мере развития облака увеличиваются заряд и, соответственно, потенциал. Максимальное значение электростатического потенциала, полученное в ходе вычислительных экспериментов, достигало более  $2 \cdot 10^9 \text{ В}$ . Максимум потенциала находился в районе «наковальни» - верхней

---

фронтальной части облака. На 40-й минуте напряжённость электростатического поля составляла  $1600 \div 2000$  В/см. Полученные результаты согласуются с результатами наблюдений и моделирования взаимодействия воздушных потоков с облаками и теплыми туманами [14,15], а также наблюдениями и экспериментальными данными для электрической структуры грозового облака из работ [16,17]. Изучение вклада электрических процессов в формирование облачных частиц осадков показало, что время их роста за счёт коагуляции под действием электрических сил в развивающемся конвективном облаке значимо сокращается (на 10-14 минут, что составляет  $20 \div 30$  % такового).

### **Выводы**

Выполнены вычислительные эксперименты по изучению развития макро- и микроструктурных, а также электрических параметров в процессе эволюции конвективных облаков, при этом учитывалось взаимовлияние физических процессов. Моделирование проводилось для нескольких состояний атмосферы, при этом использованы данные GFS модели и результаты аэрологического зондирования атмосферы в пунктах. На основе данных численных экспериментов получены электрические, микроструктурные и гидротермодинамические характеристики облаков, их трехмерное распределение в объеме в облаке и вокруг него, на всех стадиях развития. Проведена количественная оценка вклада электрических процессов в формирование осадков. Для условий Северо-Кавказского региона получено, что в результате взаимовлияния друг на друга электрических и микрофизических процессов образование осадков в мощных грозовых облаках протекает приблизительно на одну треть быстрее.

## Литература

1. Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Шаповалов А.В., Шоранов Р.А. Численные исследования образования и роста града при естественном развитии облака и активном воздействии // Метеорология и гидрология. 1994. № 1. С. 41-48.
2. Kogan E .L. The simulation of convective cloud in 3-D model with explicit microphysics. Part I: Model description and sensitivity experiment // J. Atmos. Sci. 1991. V. 48. №. 9. pp. 1160-1189.
3. Khvorostyanov V.I., Curry J.A. Thermodynamics, Kinetics, and Microphysics of Clouds. Cambridge University Press. 2014. 777 p.
4. Коган Е.Л., Мазин И.П., Сергеев Б.Н., Хворостьянов В.И. Численное моделирование облаков // М.: Гидрометеиздат. 1984. 185 с.
5. Cotton W.R. et al. RAMS. Current status and future directions // Meteor. Atmos. Phys. 2001. V. 82. pp. 5–29.
6. Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Затевахин М.А., Игнатъев А.А., Морозов В.Н. Исследование эволюции электрической структуры конвективного облака по данным численной нестационарной трехмерной модели // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 11–12, С. 889–899.
7. Heldson J.H., Wojeik W.A., Farley R.D. An examination of thunderstorm charging mechanisms using a two-dimensional storm electrification model // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. № 1. pp. 1165–1192.
8. Karacostas T., Spiridonov V., Bampzelis D., Pytharoulis I., Tegoulis I., Tympanidis K. Analysis and numerical simulation of a real cell merger using a three-dimensional cloud resolving model // Atmospheric Research. 2016. № 169. pp. 547–555.



9. Gardiner B., Lamb D., Pitter R.L., Hallett J. Measurements of Initial Potential Gradient and Particles Charges in a Montana Summer Thunderstorm // J. Geophys. Res., 1985. V. 90. № D4. pp. 6079–6086.

10. Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Шаповалов А.В., Шаповалов В.А. Трехмерная численная модель конвективного облака с учетом электрических процессов: Некоторые результаты расчетов параметров грозоградовых облаков // Известия КБНЦ РАН. 2014. № 6 (62). С. 9–15.

11. Кагермазов А.Х. Цифровая атмосфера. Современные методы и методология исследования опасных метеорологических процессов и явлений // Печатный двор, Нальчик. 2015. 216 с.

12. Шаповалов В.А. Информационная технология трехмерного представления данных измерений и численного моделирования // Инженерный вестник Дона. 2018. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4994](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4994).

13. Аджиев, А.Х., Тамазов С.Т. Разделение электрических зарядов при кристаллизации капель воды // Метеорология и гидрология. 1987, № 7. С. 57-62.

14. Pao K. Wang Physics and Dynamics of Clouds and Precipitation. Cambridge University Press. 2013. 467 p.

15. Шаповалов А.В., Калов Х.М., Шаповалов В.А., Калов Р.Х. Рассеяние туманов и низких слоистых облаков тепловым и динамическим методами // Инженерный вестник Дона. 2019. №9. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N9y2019/6229](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N9y2019/6229).

16. Williams Earle R.. The Tripole Structure of Thunderstorms // J. Geophys. Res. 1989. V. 94. № D11. pp. 13151–13167.

17. Krehbiel, P.R. The electrical structure of thunderstorms // The Earth's Electrical Environment. National Academies Press. 1986. 263 p.

## References

1. Ashabokov B.A., Fedchenko L.M., Shapovalov A.V., Shoranov R.A. Meteorologiya i gidrologiya. 1994. № 1. pp. 41-48.
  2. Kogan E.L. Journal Atmos. Sci. 1991. V. 48. №. 9. pp. 1160-1189.
  3. Khvorostyanov V.I., Curry J.A. Thermodynamics, Kinetics, and Microphysics of Clouds. Cambridge University Press. 2014. 777 p.
  4. Kogan E.L., Mazin I.P., Sergeev B.N., Khvorost'yanov V.I. Chislennoe modelirovanie oblakov [Numerical modeling of clouds] Moskau. Gidrometeoizdat. 1984. 185 p.
  5. Cotton W.R. et al. Meteor. Atmos. Phys. 2001. V. 82. pp. 5–29.
  6. Veremey N.E., Dovgalyuk Yu.A., Zatevakhin M.A., Ignat'ev A.A., Morozov V.N. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Radiofizika. 2013. V. 56, № 11–12, pp. 889–899.
  7. Heldson J.H., Wojeik W.A., Farley R.D. Journal of Geophys. Res. 2001. V. 106. № 1. pp. 1165–1192.
  8. Karacostas T., Spiridonov V., Bampzelis D., Pytharoulis I., Tegoulis I., Tympanidis K. Atmospheric Research. 2016. № 169. pp. 547–555.
  9. Gardiner B., Lamb D., Pitter R.L., Hallett J. Journal of Geophys. Res., 1985. V. 90. № D4. pp. 6079–6086.
  10. Ashabokov B.A., Fedchenko L.M., Shapovalov A.V., Shapovalov V.A. Izvestiya KBNTs RAN. 2014. № 6 (62). pp. 9–15.
  11. Kagermazov A.Kh. Tsifrovaya atmosfera. Sovremennye metody i metodologiya issledovaniya opasnykh meteorologicheskikh protsessov i yavleniy [Digital atmosphere. Modern methods and methodology for studying hazardous meteorological processes and phenomena] Pechatnyy dvor, Nal'chik. 2015. 216 p.
  12. Shapovalov V.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4994](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4994).
-



13. Adzhiev, A.Kh., Tamazov S.T. Meteorologiya i gidrologiya. 1987, № 7. pp. 57-62.
14. Pao K. Wang Physics and Dynamics of Clouds and Precipitation. Cambridge University Press. 2013. 467 p.
15. Shapovalov A.V., Kalov Kh. M., Shapovalov V.A., Kalov R.Kh. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №9. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N9y2019/6229](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N9y2019/6229).
16. Williams Earle R.. Journal of Geophys. Res. 1989. V. 94. № D11. pp. 13151–13167.
17. Krehbiel, P.R. The electrical structure of thunderstorms. The Earth's Electrical Environment. National Academies Press. 1986. 263 p.