

УДК (551.576.1+551.515.4):[ 004.942: 519.876.5]

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ ПОЛЯ ВЕТРА В АТМОСФЕРЕ НА МАКРО- И МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКОВ

© 2022 г. Б. А. Ашабоков<sup>a, b</sup>, Л. М. Федченко<sup>a</sup>,  
В. А. Шаповалов<sup>a, \*, \*\*</sup>, В. Н. Лесев<sup>c</sup>, М. А. Шериева<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Высокогорный геофизический институт, просп. Ленина, 2, Нальчик, КБР, 360030 Россия

<sup>b</sup>Институт информатики и проблем регионального управления КБНЦ РАН,  
ул. И. Арманд, 37а, Нальчик, КБР, 360000 Россия

<sup>c</sup>Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х.М. Бербекова,  
ул. Чернышевского, 173, Нальчик, КБР, 360004 Россия

\*e-mail: vet555\_83@mail.ru

\*\*e-mail: ryer16@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.06.2022 г.

После доработки 04.08.2022 г.

Принята к публикации 11.08.2022 г.

Статья посвящена исследованию роли системных свойств конвективных облаков в формировании их макро- и микроструктурных характеристик. Отмечено, что одним из направлений развития физики облаков на следующем этапе ее развития является проведение исследований в данном направлении. Приводятся результаты численных экспериментов по исследованию влияния окружающей атмосферы на формирование макро- и микроструктурных характеристик конвективных облаков. Именно влияние атмосферы является одним из основных структурообразующих факторов для облаков. В качестве механизма влияния окружающей атмосферы на процессы облакообразования в работе рассматривается структура поля ветра в атмосфере. Исследования проводились на основе трехмерной нестационарной модели грозоградовых облаков.

**Ключевые слова:** конвективные облака, системные свойства, роль в формировании макро- и микроструктуры, взаимодействие облаков с окружающей атмосферой

**DOI:** 10.31857/S0002351522060037

### ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия развитие физики облаков и активных воздействий на них существенно замедлилось. Причина, как отмечено в работе [1], заключается в том, что настоящий период времени является переходным для данного научного направления: происходит переход от этапа исследования “элементарных” процессов в облаках к этапу исследования образования и развития облаков в целом с учетом их системных свойств. Исследования на наступающем этапе развития физики облаков должны быть направлены на изучение закономерностей формирования макро- и микроструктурных характеристик облаков в целом с учетом их системных свойств. Поэтому возникает необходимость формулировки основных задач физики облаков на данном этапе ее развития, разработки методов и методологий их решения. Отметим, что изучение роли системных

свойств облаков в формировании их макро- и микроструктурных характеристик, в частности, роли взаимодействия облаков с окружающей их атмосферой (свойство иерархичности систем), являющегося одним из важнейших структурообразующих факторов [1–3], представляется наиболее важной и сложной задачей в данном направлении исследований.

Механизмов взаимодействия облаков с атмосферой достаточно много, некоторые из них хорошо известны, но их роль в процессах облакообразования пока еще можно объяснить только на качественном уровне. Строгие исследования роли этих механизмов в формировании макро- и микроструктурных характеристик облаков, насколько нам известно, до сих пор отсутствуют. Исключением можно считать исследование роли структуры поля ветра в атмосфере, некоторые результаты которого приводятся в работах [1, 10]. В

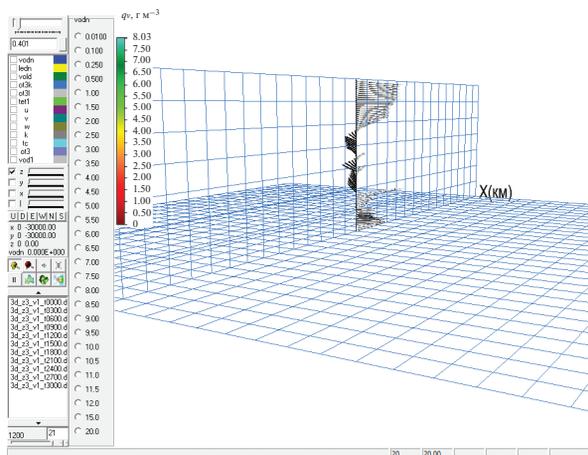


Рис. 1. Структура поля ветра в атмосфере в вертикальной плоскости.

этих работах изложены модель облака и результаты численных исследований влияния структуры поля ветра в атмосфере на образование и развитие грозоградовых облаков. Исследования заключались в моделировании эволюции облака для различных структур поля ветра, которые получались путем варьирования направления скорости ветра в атмосфере на всех высотах. В настоящей работе, являющейся продолжением этих работ, приводятся результаты исследований, когда варьировались значения скорости ветра на всех высотах при неизменном ее направлении. В работе [1] также приведены некоторые результаты исследований влияния взаимодействия процессов в облаках (эмерджентные свойства облаков) на формирование их макро- и микроструктурных характеристик.

На то, что влияние ветра в атмосфере на образование и развитие облаков может быть значительным, обратили внимание относительно давно. Можно, например, отметить работы [4, 5, 9], в которых были сделаны попытки исследовать его путем наблюдения за облаками в натуральных условиях. Но детальное исследование этого вопроса таким способом не представляется возможным, основным методом проведения исследований в данном направлении является численное моделирование. Работы [6–8, 11] являются первыми, в которых исследования в этом направлении проводились на основе математического моделирования.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Исследования влияния структуры поля ветра в атмосфере на формирование макро- и микроструктурных характеристик грозоградовых обла-

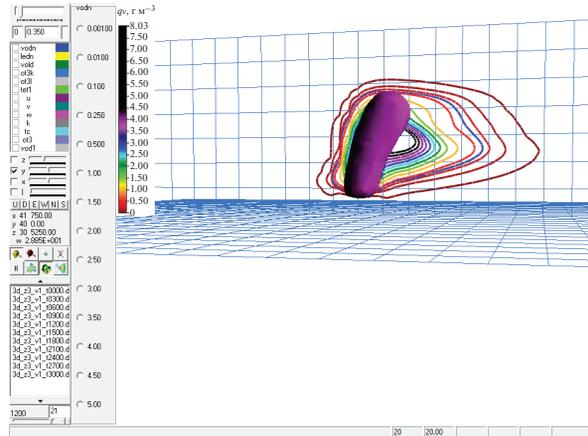
ков проводились на основе трехмерной нестационарной модели с детальным учетом процессов [1, 10]. Размеры пространственной области при расчетах задавались от 40 до 80 км по горизонтали и 16 км – по вертикали. Шаг сетки по координатам  $X$ ,  $Y$  составлял 500–1000 м, по  $Z$  – 250–500 м. Ось  $X$  была направлена на восток,  $Y$  – на север,  $Z$  – по вертикали. Облако инициировалось заданием теплового импульса у поверхности земли с перегревом  $\Delta T = 1\text{--}4^\circ\text{C}$ , форма и размеры импульса также варьировались.

Расчеты проводились для реального и модельных полей ветра в атмосфере. Реальное поле получено по данным аэрологического зондирования атмосферы в аэропорту Минеральные Воды (13.05.2021), а модельные поля, как было отмечено, путем варьирования скорости ветра при неизменном распределении ее направления по высоте.

На рис. 1 приведена структура поля ветра в атмосфере, полученная по данным зондирования атмосферы. Можно заметить, что направление и скорость ветра сложным образом меняются по высоте. Максимальное значение скорости ветра в атмосфере (верхняя часть пространственной области) равнялось 35 м/с, а в других частях области оно меньше.

Для исследования эволюции облака ниже используются изоповерхности параметров облака на фоне изолиний других его параметров в различные моменты времени, построенные в вертикальной плоскости, проходящей через середину облака. Для этой цели также используются максимальные значения параметров облака в те же моменты времени.

На 20-й минуте развития облака максимальные значения параметров облака и их положения над поверхностью земли оказались равными:



**Рис. 2.** Изоповерхность вертикальной составляющей скорости воздушных потоков 10.0 м/с на фоне изолиний водности, проходящих через максимум водности в вертикальной плоскости на 20 минуте.

- водность: 8.03 г/м<sup>3</sup>, Н = 6.65 км
- ледность: 7.67 г/м<sup>3</sup>, Н = 8.57 км
- суммарная водность и ледность: 9.45 г/м<sup>3</sup>, Н = 8.23 км
- вертикальная скорость воздуха: 28.8(–2.97) м/с, Н = 5.25 (9.80) км
- коэффициент турбулентности: 991.0 м<sup>2</sup>/с, Н = 7.53 км
- отражаемость (3.2 см): 61.3 дБZ, Н = 5.43 км
- объемный заряд:  $1.2 \times 10^{-9}(-6.7 \times 10^{-10})$  Кл/м<sup>3</sup>, Н = 9.45(6.65) км
- потенциал электрического поля:  $1.3 \times 10^8(-4.7 \times 10^7)$  В, Н = 9.63(5.78) км
- напряженность электрического поля: 327.1(–788.8) В/см, Н = 10.3(7.88) км

На рис. 2 приведена изоповерхность вертикальной составляющей скорости восходящих потоков 10.0 м/с на фоне изолиний водности в вертикальной плоскости. Можно заметить, что водность, следовательно, и интенсивность образования капель в облаке максимальны в зоне восходящих потоков воздуха.

Максимальное значение водности (8.03 г/м<sup>3</sup>) расположено на высоте Н = 6.65 км над поверхностью земли, максимальное значение ледности в рассматриваемый момент времени также значительно. Достаточно интенсивными являются и воздушные потоки в облаке: максимальная скорость восходящих потоков воздуха равна 28.8 м/с, а нисходящих –2.97 м/с.

Изоповерхности водности 0.350 г/м<sup>3</sup> и ледности 0.350 г/м<sup>3</sup> на фоне изолиний вертикальной скорости восходящих потоков на 20 минуте развития облака приведены на рис. 3а, эти же изопо-

верхности на фоне изолиний отражаемости приведены на рис. 3б. Формирование изоповерхности водности в облаке происходит в зоне восходящих воздушных потоков, а выше данной изоповерхности формируется изоповерхность ледности. Можно сказать, что рост ледяных частиц в облаке происходит преимущественно за счет капель, поступающих снизу в зону сосредоточения кристаллов. В рассматриваемый момент времени осадки из облака пока не выпадают.

На рис. 3б видно, что изоповерхности расположены в зоне повышенных значений отражаемости. Максимальная отражаемость (61.3 дБZ) наблюдается в зоне интенсивных восходящих потоков на высоте Н = 5.43 км в районе границы раздела изоповерхностей.

Максимальные значения параметров облака и высоты, на которых они расположены на 30-й минуте его развития, равны:

- водность: 7.58 г/м<sup>3</sup>, Н = 6.13 км
- ледность: 5.30 г/м<sup>3</sup>, Н = 7.88 км

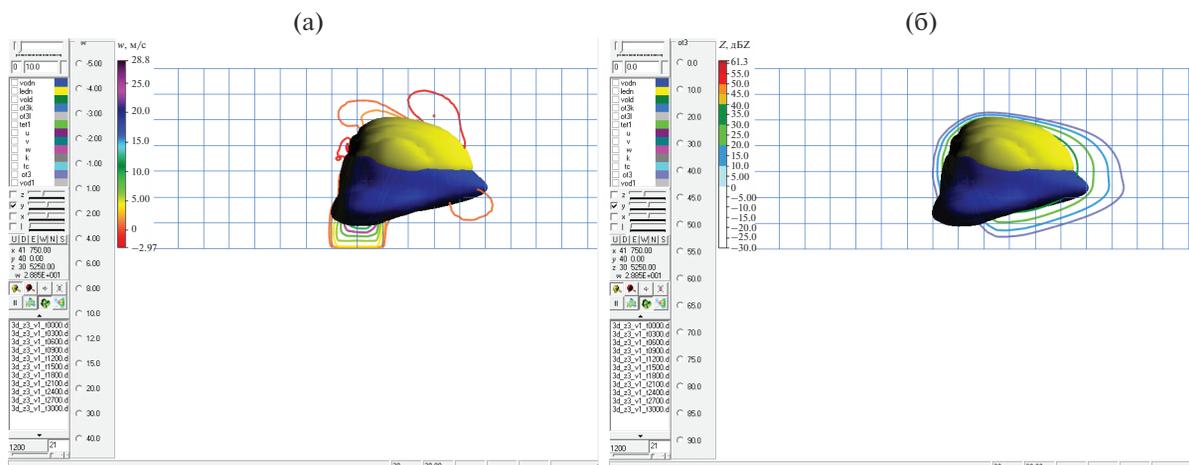


Рис. 3. Изоповерхности водности  $0.350 \text{ г/м}^3$  и ледности  $0.350 \text{ г/м}^3$  на фоне изолиний вертикальной скорости восходящих потоков (а) и отражаемости (б) в вертикальной плоскости проходящей через максимум водности на 20 минуте.

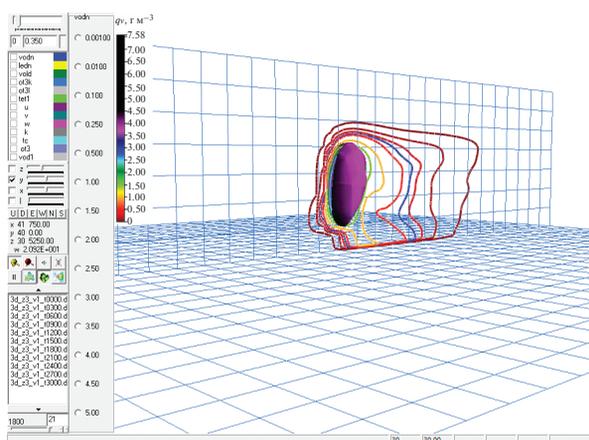


Рис. 4. Изоповерхность вертикальной составляющей скорости  $10.0 \text{ м/с}$  на фоне изолиний водности в вертикальной плоскости на 30 минуте.

- суммарная водность и ледность:  $7.86 \text{ г/м}^3$ ,  $H = 6.47 \text{ км}$
- вертикальная скорость воздуха:  $22.2(-4.59) \text{ м/с}$ ,  $H = 5.07(9.80) \text{ км}$
- коэффициент турбулентности:  $846.5 \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $H = 6.82 \text{ км}$
- отражаемость (3.2 см):  $61.4 \text{ дБЗ}$ ,  $H = 4.72 \text{ км}$
- объемный заряд:  $1.5 \times 10^{-9}(-4.5 \times 10^{-10}) \text{ Кл/м}^3$ ,  $H = 8.05(3.85) \text{ км}$
- потенциал электрического поля:  $7.1 \times 10^8(-1.3 \times 10^7) \text{ В}$ ,  $H = 8.40(0.875) \text{ км}$
- напряженность электрического поля:  $830.3(-1581.6) \text{ В/см}$ ,  $H = 9.63(6.13) \text{ км}$

Сравнение максимальных значений параметров облака, соответствующих 20-й и 30-й минутам его развития, показывает, что значения некоторых из них уменьшились, а значения других продолжают увеличиваться, т.е. можно сказать, что на 30 минуте имеет место некоторое замедление развития облака. Уменьшаются максимальные значения та-

ких важнейших параметров, как водность, ледность, суммарная водность и ледность, а также значения высот, на которых они расположены. В большей степени это касается максимального значения ледности, которое уменьшилось с  $7.67 \text{ г/м}^3$  до  $5.30 \text{ г/м}^3$ . Уменьшилось и положение данного параметра над поверхностью земли: с  $8.57 \text{ км}$  до

7.88 км. Такое изменение значений этих параметров, видимо, связано с тем, что начался процесс выпадения осадков (жидких и твердых) из облака. В то же время наблюдается рост максимальных значений параметров, характеризующих электрические процессы в облаке.

На рис. 4 приведена изоповерхность вертикальной составляющей скорости восходящих потоков 10.0 м/с на фоне изолиний водности в вертикальной плоскости на 30-й минуте. Сравнение рис. 2 и 4 показывает, что имеет место некоторое уменьшение объема зоны восходящих потоков воздуха в облаке и некоторое расширение области облака, охваченной изолиниями водности.

Кроме этого, по результатам расчетов, структура облака в данный момент времени суще-

ственно отличается от его структуры в предыдущий момент времени, объемы, заключенные внутри изоповерхностей водности  $0.350 \text{ г/м}^3$  и ледности  $0.350 \text{ г/м}^3$ , заметно увеличились, изменились их формы. Такие изменения в структуре облака будут влиять на микрофизические процессы в облаке, на взаимодействие капель и кристаллов. Можно еще заметить, что в рассматриваемый момент времени из облака выпадают как жидкие, так и твердые осадки. Образование капель происходит в зоне восходящих потоков воздуха, а выпадение жидких и твердых осадков наблюдается перед этой зоной.

Максимальные значения параметров облака на 40-й минуте развития облака равны:

---

– водность:	$5.78 \text{ г/м}^3$ , $H = 3.85 \text{ км}$
– ледность:	$2.15 \text{ г/м}^3$ , $H = 4.90 \text{ км}$
– суммарная водность и ледность:	$6.28 \text{ г/м}^3$ , $H = 3.67 \text{ км}$
– вертикальная скорость воздуха:	$13.7 (-2.36) \text{ м/с}$ , $H = 3.85 (8.57) \text{ км}$
– коэффициент турбулентности:	$606.8 \text{ м}^2/\text{с}$ , $H = 3.67 \text{ км}$
– отражаемость (3.2 см):	$65.8 \text{ дБЗ}$ , $H = 3.15 \text{ км}$
– объемный заряд:	$1.3 \times 10^{-9} (-3.2 \times 10^{-10}) \text{ Кл/м}^3$ , $H = 7.70 (2.80) \text{ км}$
– потенциал электрического поля	$8.9 \times 10^8 (0.0) \text{ В}$ , $H = 8.05 (0.0) \text{ км}$
– напряженность электрического поля:	$815.8 (-1505.4) \text{ В/см}$ , $H = 9.45 (4.90) \text{ км}$

---

Сравнение этих значений параметров с соответствующими их значениями на 30-й минуте развития облака показывает, что имеет место уменьшение максимальных значений практически всех параметров облака. Заметно уменьшились, например, максимальные значения водности, ледности и их суммы, а также высот, на которых они расположены. Максимальное значение ледности, например, уменьшилось более, чем в два раза: с  $5.30$  до  $2.15 \text{ г/м}^3$ . Заметно уменьшились и такие характеристики облака, как максимальная вертикальная скорость воздуха и максимальный коэффициент турбулентности. По сравнению с их значениями на 30-й минуте развития облака они уменьшились примерно в два раза. Максимальные значения некоторых параметров (отражаемости и потенциала электрического поля) увеличились.

Изоповерхность вертикальной составляющей скорости воздуха 10.0 м/с в данный момент времени приведена на рис. 5.

Сравнение рис. 4 и 5 показывает, что имеет место уменьшение во времени объема области, огра-

ниченной рассматриваемой изоповерхностью. В то же время наблюдается расширение области, охваченной изолиниями водности.

Остановимся на результатах расчетов облаков, соответствующих модельным полям ветра в атмосфере, которые, как было отмечено, были получены путем варьирования скорости ветра на всех высотах. При этом направления ветра и значения параметров атмосферы, которые были получены в результате ее зондирования, оставались неизменными.

Ниже приводятся результаты расчетов облаков, соответствующих двум модельным полям ветра в атмосфере. Они, можно сказать, занимают крайние положения: в первом случае на всех высотах скорость ветра равняется нулю, т.е. развитие облака происходит при отсутствии ветра в атмосфере, второе модельное поле отличается от реального тем, что скорость ветра на всех высотах увеличена примерно на 10 м/с (направление не изменилось).

На основе качественных рассуждений можно утверждать, что в первом случае влияние поля

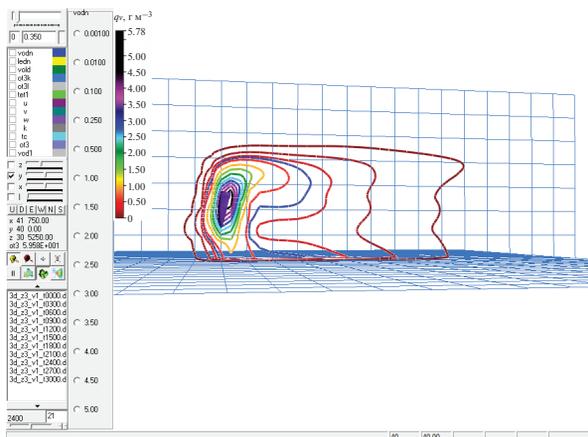


Рис. 5. Изоперхность вертикальной составляющей скорости 10.0 м/с на фоне изолиний водности в вертикальной плоскости на 40-й минуте.

ветра в атмосфере на развитие облака (посредством рассматриваемого механизма) минимально, поэтому облако, образующееся в этом случае, должно быть самым мощным. Во втором случае результатом отмеченных изменений поля ветра должно быть усиление взаимодействия облака с окружающей атмосферой и, как следствие, образующееся облако должно быть менее мощным. Что касается облака, соответствующего реальному по-

лю ветра, то по своим характеристикам оно должно занимать промежуточное положение.

Остановимся на результатах расчетов развития грозоградового облака, соответствующего первому модельному полю ветра в атмосфере. Максимальные значения параметров облака и их положения над поверхностью земли на 20-й минуте его развития получились равными:

---

– водность:	9.74 г/м <sup>3</sup> , Н = 7.53 км
– ледность:	12.2 г/м <sup>3</sup> , Н = 10.3 км
– суммарная водность и ледность:	12.3 г/м <sup>3</sup> , Н = 10.1 км
– вертикальная скорость воздуха:	41.7(–4.48) м/с, Н = 8.23(9.80) км
– коэффициент турбулентности:	1176.0 м <sup>2</sup> /с, Н = 11.4 км
– отражаемость (3.2 см):	57.7 дБZ, Н = 5.78 км
– объемный заряд:	1.4·10 <sup>–9</sup> (–6.5 × 10 <sup>–10</sup> ) Кл/м <sup>3</sup> , Н = 11.6(6.65) км
– потенциал электрического поля:	2.5 × 10 <sup>8</sup> (–2.1 × 10 <sup>7</sup> ) В, Н = 11.6(5.78) км
– напряженность электрического поля:	479.1(–775.8) В/см, Н = 12.3(8.57) км

---

Сравнение этих значений параметров с соответствующими их значениями в предыдущий момент времени показывает, что максимальные значения практически всех параметров облака, развивающегося при отсутствии ветра в атмосфере, заметно больше.

На рис. 6 приводятся изоперхности водности 0.350 г/м<sup>3</sup> и вертикальной составляющей скорости воздуха 10.0 м/с на фоне изолиний вертикальной составляющей скорости воздушных потоков на 20-й минуте развития облака. На рис. 6 видно, что при отсутствии ветра в атмосфере формируется симметричное облако: образование и рост капель происходят в зоне восходящих воз-

душных потоков. На рис. 6 видно, что верхняя часть изоперхности скорости воздуха находится выше верхней границы изоперхности водности.

Зона формирования ледяных частиц располагается выше области, ограниченной изоперхностью водности. Об этом свидетельствует рис. 7, на котором изображены изоперхности водности 0.350 г/м<sup>3</sup> и ледности 0.350 г/м<sup>3</sup> на фоне изолиний вертикальной составляющей скорости воздушных потоков в облаке.

Можно заметить, что изоперхность ледности 0.350 г/м<sup>3</sup> расположена выше изоперхности водности. В зону формирования кристалличе-

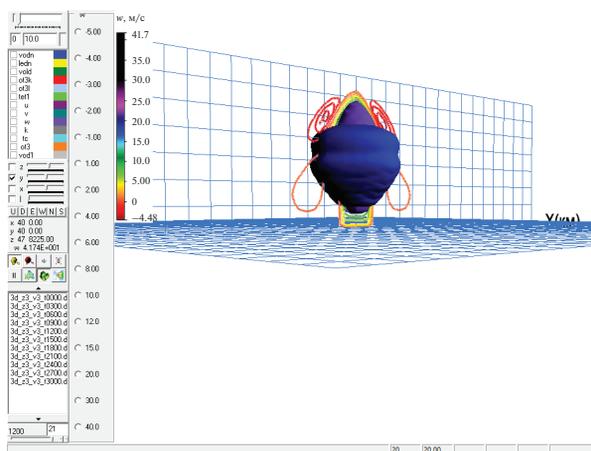


Рис. 6. Изоповерхности водности  $0.350 \text{ г/м}^3$  и вертикальной составляющей скорости воздуха  $10.0 \text{ м/с}$  на фоне изолиний вертикальной составляющей скорости воздуха в вертикальной плоскости на 20-й минуте.

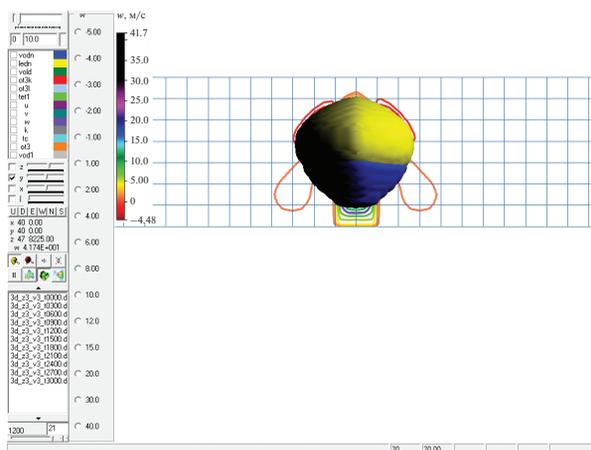


Рис. 7. Изоповерхности водности  $0.350 \text{ г/м}^3$  и ледности  $0.350 \text{ г/м}^3$  на фоне изолиний вертикальной составляющей скорости в вертикальной плоскости на 20-й минуте.

ской фазы входит и область, которая ограничена данной изоповерхностью.

Максимальные значения параметров облака на 30-й минуте его развития равны:

– водность:	$8.60 \text{ г/м}^3$ , $H = 6.65 \text{ км}$
– ледность:	$9.49 \text{ г/м}^3$ , $H = 9.80 \text{ км}$
– суммарная водность и ледность:	$10.2 \text{ г/м}^3$ , $H = 8.93 \text{ км}$
– вертикальная скорость $w$ :	$34.7(-6.26) \text{ м/с}$ , $H = 7.70(9.80) \text{ км}$
– коэффициент турбулентности:	$1225.2 \text{ м}^2/\text{с}$ , $H = 10.7 \text{ км}$
– отражаемость (3.2 см):	$64.1 \text{ дБZ}$ , $H = 5.78 \text{ км}$
– объемный заряд:	$2.0 \times 10^{-9}(-4.8 \times 10^{-10}) \text{ Кл/м}^3$ , $H = 11.2(4.20) \text{ км}$
– потенциал электрического поля:	$1.2 \times 10^9(-1.5 \times 10^6) \text{ В}$ , $H = 10.7(0.350) \text{ км}$
– напряженность электрического поля:	$1084.2(-2248.9) \text{ В/см}$ , $H = 11.7(7.00) \text{ км}$

Сравнение этих значений параметров с соответствующими их значениями на 20-й минуте развития облака показывает, что имеет место уменьшение максимальных значений водности,

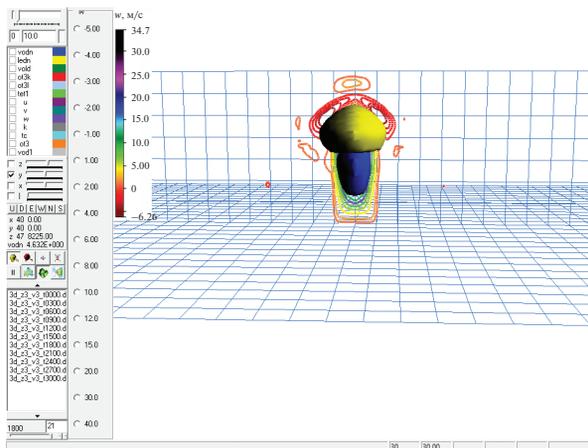


Рис. 8. Изоповерхности водности  $3.00 \text{ г/м}^3$  и ледности  $3.00 \text{ г/м}^3$  на фоне изолиний вертикальной составляющей скорости в вертикальной плоскости на 30-й минуте.

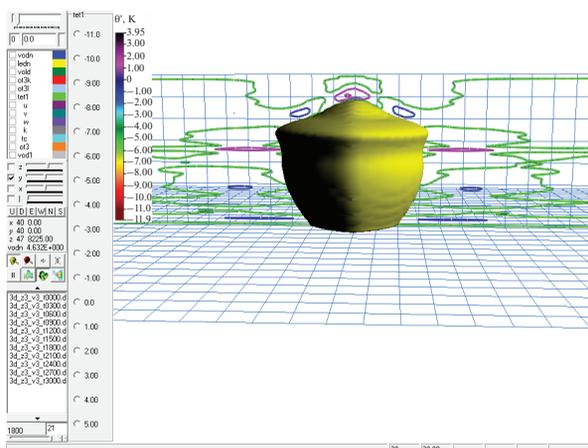


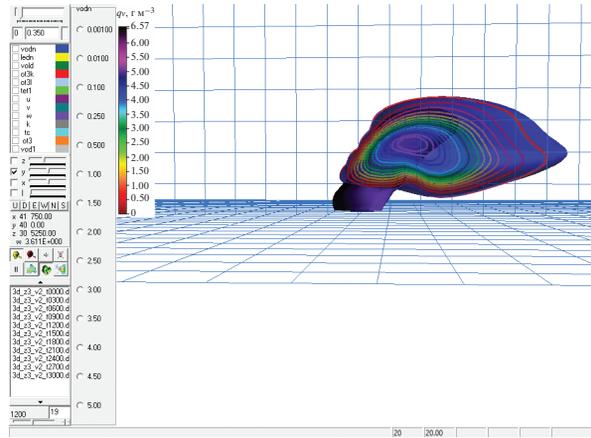
Рис. 9. Изоповерхности водности  $0.350 \text{ г/м}^3$  и ледности  $0.350 \text{ г/м}^3$  на фоне изолиний отклонений значений потенциальной температуры в окружающей атмосфере в вертикальной плоскости проходящей через центр облака на 30-й минуте.

ледности, скорости восходящих воздушных потоков. В то же время наблюдается некоторое увеличение максимальных значений других параметров, например, параметров, характеризующих электрическую структуру облака.

На рис. 8 на фоне изолиний вертикальной составляющей скорости воздушных потоков в вертикальной плоскости приводятся изоповерхности водности и ледности, соответствующие значению  $3.00 \text{ г/м}^3$ .

На рис. 8 видно, что происходит интенсивный перенос капель из нижних слоев облака в область, ограниченную изоповерхностью ледности, т.е. основным механизмом роста ледяных частиц в облаке является захват ими поступающих в дан-

ную область капель. Для сравнения на рис. 9 приведены изоповерхности водности  $0.350 \text{ г/м}^3$  и ледности  $0.350 \text{ г/м}^3$  на фоне изолиний отклонений потенциальной температуры в облаке от значений в окружающей атмосфере. Сравнение рис. 8 и 9 показывает, что объемы областей, ограниченных изоповерхностями ледности  $3.00 \text{ г/м}^3$  и  $0.350 \text{ г/м}^3$ , существенно различаются. Кроме этого, как можно заметить на рис. 9, на 30-й минуте развития облака изоповерхность ледности достигает поверхности земли (из облака выпадают осадки). Расширению области, охватываемой данной изоповерхностью, способствует перенос ледяных частиц растекающимися в верхней части облака воздушными потоками.



**Рис. 10.** Изоповерхность водности  $0.350 \text{ г/м}^3$  и вертикальной составляющей скорости  $5.00 \text{ м/с}$  на фоне изолиний водности в вертикальной плоскости на 20-й минуте.

Остановимся на результатах расчетов развития облака, соответствующего второму модельному полю ветра в атмосфере. Максимальные значе-

ния параметров облака и их распределения по высоте на 20-й минуте приведены ниже:

– водность:	$6.57 \text{ г/м}^3$ , $H = 4.72 \text{ км}$
– ледность:	$0.336 \text{ г/м}^3$ , $H = 6.47 \text{ км}$
– суммарная водность и ледность:	$6.57 \text{ г/м}^3$ , $H = 4.72 \text{ км}$
– вертикальная скорость воздуха:	$17.3(-2.13) \text{ м/с}$ , $H = 3.33(0.700) \text{ км}$
– коэффициент турбулентности:	$1264.1 \text{ м}^2/\text{с}$ , $H = 3.67 \text{ км}$
– отражаемость (3.2 см):	$62.3 \text{ дБZ}$ , $H = 4.20 \text{ км}$
– объемный заряд:	$3.5 \times 10^{-11}(-2.5 \times 10^{-11}) \text{ Кл/м}^3$ , $H = 7.00(6.13) \text{ км}$
– потенциал электрического поля:	$1.1 \times 10^6(-1.1 \times 10^6) \text{ В}$ , $H = 7.18(5.07) \text{ км}$
– напряженность электрического поля:	$4.44(-20.0) \text{ В/см}$ , $H = 7.70(6.47) \text{ км}$

Эти значения существенно меньше, чем максимальные значения параметров облаков, соответствующих первому модельному и реальному полю ветра в атмосфере.

На рис. 10 приведены изоповерхность водности  $0.350 \text{ г/м}^3$  и изолинии вертикальной составляющей скорости  $5.00 \text{ м/с}$  на фоне изолиний водности в вертикальной плоскости на 20-й минуте развития облака.

Можно заметить, что на рис. 10 отсутствует изоповерхность ледности  $0.350 \text{ г/м}^3$ . Причина заключается в том, что большие скорости ветра в атмосфере в верхней части области образования обла-

ка, уменьшая поступление капель в верхние слои облака, где температурные условия благоприятны для формирования ледяных частиц, стали препятствием для их образования. Об этом свидетельствуют результаты сравнения рис. 3 с рис. 10. На рис. 10 видно, что в случае модельного поля ветра в атмосфере верхняя граница облака расположена ниже. Можно еще заметить, что в данный момент времени осадки из облака не выпадают.

Остановимся на результатах расчетов параметров облака на 30-й минуте его развития. Максимальные значения параметров и их распределения по высоте получились следующие:

– водность:	$5.25 \text{ г/м}^3$ , $H = 3.85 \text{ км}$
– ледность:	$0.391 \text{ г/м}^3$ , $H = 2.80 \text{ км}$
– суммарная водность и ледность:	$5.25 \text{ г/м}^3$ , $H = 3.85 \text{ км}$
– вертикальная скорость воздуха:	$11.7(-2.18) \text{ м/с}$ , $H = 2.97(0.700) \text{ км}$
– коэффициент турбулентности:	$1247.5 \text{ м}^2/\text{с}$ , $H = 3.67 \text{ км}$

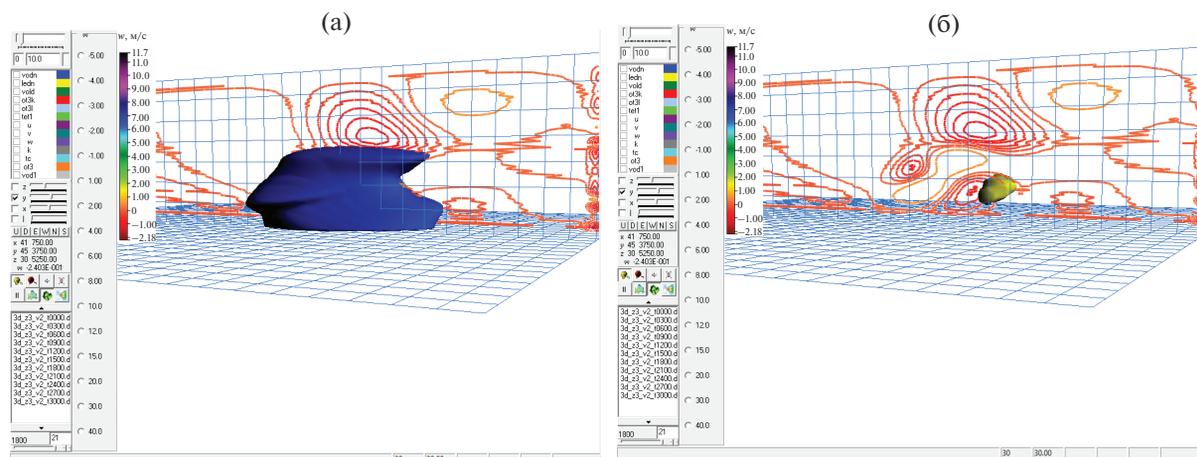


Рис. 11. Изоповерхности водности  $0.350 \text{ г/м}^3$  и ледности  $0.350 \text{ г/м}^3$  на фоне изолиний вертикальной составляющей скорости в вертикальной плоскости на 30-й минуте.

- отражаемость (3.2 см):
- объемный заряд:
- потенциал электрического поля:
- напряженность электрического поля:

- 61.4 дБЗ,  $H = 3.50 \text{ км}$
- $1.3 \times 10^{-10} (-7.0 \times 10^{-11}) \text{ Кл/м}^3$ ,  $H = 6.47(1.58) \text{ км}$
- $3.2 \times 10^7 (-4.6 \times 10^6) \text{ В}$ ,  $H = 6.65(1.58) \text{ км}$
- $56.2 (-115.7) \text{ В/см}$ ,  $H = 7.53(4.72) \text{ км}$

Сравнение этих значений с соответствующими значениями параметров в предыдущий момент времени, т.е. со значениями на 20-й минуте развития облака, показывает, что имеет место увеличение некоторых из параметров. Это относится и к максимальному значению ледности в облаке. Но максимальные значения основных параметров рассматриваемого облака оказались заметно ниже, чем максимальные значения параметров облаков, соответствующих рассмотренным выше полям ветра в атмосфере.

На рис. 11 приведены изоповерхности водности  $0.350 \text{ г/м}^3$  и ледности  $0.350 \text{ г/м}^3$  на фоне изолиний вертикальной составляющей скорости воздушных потоков в вертикальной плоскости.

На рис. 11 видно, что осадки, в основном жидкие, выпадают на значительной площади. По сравнению с предыдущим моментом времени выпадение осадков привело к уменьшению максимальной водности в облаке и высоты, на которой она расположена: с  $6.57 \text{ г/м}^3$ , ( $H = 4.72 \text{ км}$ ) на 20-й минуте до  $5.25 \text{ г/м}^3$  ( $H = 3.85 \text{ км}$ ) на 30-й минуте развития облака. Что касается максимального значения ледности, то, если на 20-й минуте развития облака оно равнялось  $0.336 \text{ г/м}^3$ , то на 30-й минуте его значение достигло  $0.391 \text{ г/м}^3$ . Максимальное значение ледности в модельном облаке заметно меньше, чем в исходном:  $0.391$  и  $5.30 \text{ г/м}^3$  соответственно, т.е. изменение структуры поля ветра в

атмосфере оказывает влияние на формирование всех параметров облака.

Сравнение результатов расчетов в случаях реального и модельных полей ветра в атмосфере показывает, что взаимодействие облаков с окружающей их атмосферой, обусловленное структурой поля ветра в атмосфере, является фактором, существенным образом влияющим на структуру и параметры облака.

В табл. 1 приводятся расположенные по возрастанию максимальные значения параметров облаков, соответствующие различным полям ветра в атмосфере. Сравнение этих данных показывает, что максимальные значения практически всех параметров облака заметно выше в случае, когда оно формируется при отсутствии ветра в атмосфере. Максимальные значения параметров облака, соответствующего реальному полю ветра в атмосфере, занимают промежуточное положение. Что касается максимальных значений параметров облака, соответствующего второму модельному полю ветра, то они заметно меньше, чем у других облаков. В качестве примера можно отметить, что максимальная вертикальная скорость воздушных потоков в облаке, соответствующем первому модельному полю ветра в атмосфере (I – вариант), оказалась больше, чем в облаке, соответствующем реальному полю ветра (более чем на  $10 \text{ м/с}$ ). Такое соотношение значений этих параметров связано с тем, что усиление

**Таблица 1.** Максимальные значения параметров облаков, соответствующих реальному (I вариант) и модельным полям ветра в атмосфере (I и II варианты)

Параметры облака и их положение над поверхностью земли	II – модельное поле ветра в атмосфере	Реальное поле ветра в атмосфере	I – модельное поле ветра в атмосфере
Максимальная водность	6.57 г/м <sup>3</sup> , H = 4.72 км	8.03 г/м <sup>3</sup> , H = 6.65 км	9.74 г/м <sup>3</sup> , H = 7.53 км
Максимальная ледность	0.336 г/м <sup>3</sup> , H = 6.47 км	7.67 г/м <sup>3</sup> , H = 8.57 км	12.2 г/м <sup>3</sup> , H = 10.3 км
Максимальная суммарная водность и ледность	6.57 г/м <sup>3</sup> , H = 4.72 км	9.45 г/м <sup>3</sup> , H = 8.23 км	12.3 г/м <sup>3</sup> , H = 10.1 км
Максимальная вертикальная скорость воздуха	17.3(–2.13) м/с, H = 3.33(0.700) км	28.8(–2.97) м/с, H = 5.25 (9.80) км	41.7(–4.48) м/с, H = 8.23(9.80) км
Максимальный коэффициент турбулентности	1264.1 м <sup>2</sup> /с, H = 3.67 км	991.0 м <sup>2</sup> /с, H = 7.53 км	1176.0 м <sup>2</sup> /с, H = 11.4 км

взаимодействия облака с атмосферой в результате увеличения скорости ветра в атмосфере препятствует развитию облака.

Из табл. 1 видно, что максимальное значение коэффициента турбулентности в случае второго модельного поля ветра оказалось больше, чем в остальных случаях. Это также может быть связано с тем, что в данном случае скорость ветра в атмосфере на всех высотах была увеличена по сравнению с ее значением в реальном случае.

### ВЫВОДЫ

Результаты моделирования образования и развития конвективных облаков для различных распределений скорости ветра в атмосфере по высоте при неизменном ее направлении показали, что структура поля ветра в атмосфере является одним из важнейших факторов, посредством которого осуществляется влияние окружающей атмосферы на процессы облакообразования, на формирование макро- и микроструктурных характеристик облаков.

По результатам расчетов, при отсутствии ветра в атмосфере (т.е., когда влияние атмосферы на процессы облакообразования, обусловленное полем ветра в атмосфере, равно нулю) происходит формирование мощных грозоградовых облаков.

Следствием усиления влияния окружающей атмосферы на процессы облакообразования, которое происходит при увеличении скорости ветра в атмосфере, является ухудшение условий формирования конвективных облаков и, как следствие, уменьшение мощности образующихся облаков. В зависимости от значений скорости ветра

в атмосфере может наблюдаться заметное ухудшение условий формирования ледяной фазы в облаках, уменьшение области локализации кристаллов и снижение возможности формирования градовых осадков.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Шаповалов А.В., Шаповалов В.А. Физика облаков и активных воздействий на них. Нальчик: Печатный двор, 2017. 240 с.
2. Ашабоков Б.А., Шаповалов В.А., Езаова А.Г., Шаповалов М.А. Исследование образования ледяной фазы в мощных конвективных облаках на основе трехмерной численной модели // Естественные и технические науки. 2014. № 5 (73). С. 78–83.
3. Месарович М., Такахара Я. Общая теория систем: математические основы. М.: Мир, 1978. 381 с.
4. Ковальчук А.Н. О влиянии ветрового сдвига на выпадение града // Труды ВГИ. 1969. Вып. 14. С. 39–48.
5. Мальбахова Н.М. Взаимосвязь структуры градовых облаков с вертикальной структурой ветра в атмосфере // Труды ВГИ. 1990. Вып. 80. С. 99–106.
6. Ньютон Ч.У. Гидродинамическое взаимодействие с окружающим полем ветра как один из факторов развития кучевых облаков / Динамика кучевых облаков. М.: Мир, 1964. С 187–201.
7. Пастушков Р.С. Численное моделирование взаимодействия конвективных облаков с окружающей их атмосферой // Труды ЦАО. 1972. Вып. 108. С. 93–97.
8. Пастушков Р.С. О развитии кучевых облаков в атмосфере с вертикальным сдвигом ветра // Метеорология и гидрология. 1969. № 4. С. 26–41.
9. Федченко Л.М., Гораль Г.Г., Беленцова В.А., Мальбахова Н.М. Опасные конвективные явления и их

- прогноз в условиях сложного рельефа. М.: Гидрометеоиздат, 1991. 425 с.
10. *Ashabokov B.A., Fedchenko L.M., Shapovalov A.V., Kalov H.M., Kalov R.H., Sherieva M.A., Shapovalov V.A.* Mathematical Modeling of the Influence of the Wind Field Structure in the Atmosphere on the Cloud // ACS. 2018. V. 8. № 1. P. 84–96.
11. *Tompkins A.M.* Organization of tropical convection in low vertical wind shears: The role of cold pools // Journal of the atmospheric sciences. 2001. V. 58. №. 13. P. 1650–1672.

## Investigation of the Role of Thunderstorm Clouds with Their Surrounding Atmosphere Interaction in the Formation of Their Macro- and Microstructural Characteristics

**B. A. Ashabokov<sup>1, 2</sup>, L. M. Fedchenko<sup>1</sup>, V. A. Shapovalov<sup>1, \*, \*\*</sup>,  
V. N. Lesev<sup>3</sup>, and M. A. Sherieva<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*High-Mountain Geophysical Institute, ave. Lenin, 2, Nalchik, KBR, 360030 Russia*

<sup>2</sup>*Institute of Informatics and Problems of Regional Management, KBSC RAS,  
I. Armand str., 37a, Nalchik, KBR, 360000 Russia*

<sup>3</sup>*Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov,  
Chernyshevsky str., 173, Nalchik, KBR, 360004 Russia*

\**e-mail: vet555\_83@mail.ru*

\*\**e-mail: ryer16@yandex.ru*

The article is devoted to the study of the role of the system properties of convective clouds in the formation of their macro- and microstructural characteristics. It is noted that the system approach is one of the directions of the development of cloud physics at a new stage of its development, the transition to which this scientific direction is currently taking place. Some results of numerical experiments on the role of interaction of clouds with the atmosphere surrounding them, that is, the properties of the hierarchy of systems, in the formation of their macro- and microstructural characteristics are presented. From the mechanisms of interaction of clouds with the atmosphere, the mechanism due to the structure of the wind field in the atmosphere is considered in the work. A three-dimensional unsteady model of thunderstorm clouds was used for the calculations.

**Keywords:** thunderstorm clouds, system properties, role in the formation of macro- and microstructure, interaction of clouds with the surrounding atmosphere