

Результаты исследования влияния структуры температурного поля в атмосфере на формирование конвективных облаков

Б. А. Ашабоков ✉, В. Н. Лесев

Высокогорный геофизический институт, Российская Федерация
(360030, г. Нальчик, пр. Ленина, 2)

Аннотация: Цель работы состоит в исследовании методами математического моделирования влияния структуры поля температуры в атмосфере назначения структурных параметров конвективных облаков.

Материалы и методы. Одним из ключевых направлений развития теории физики облаков является исследование их системных свойств. Эти свойства представляют собой важнейшие факторы, влияющие на формирование структуры облака. Методология проведения исследований заключается в сравнительном анализе параметров и структуры исходного и модельных облаков. Входные данные для расчета модельных облаков были сформированы путем варьирования значений температуры на всех высотах, полученных в результате аэрологического зондирования тропосферы в аэропорту Минеральные Воды.

Результаты и обсуждение. Сравнительный анализ параметров исходного и модельных облаков показал, что на структуру и параметры облаков существенное влияние оказывает структура поля температуры в атмосфере. При этом вариации температуры в сторону увеличения или уменьшения в пределах 2 % не приводят к значительным изменениям параметров облаков, а вариации порядка 10% могут привести к формированию облаков, которые существенным образом отличаются от исходного облака. При этом повышение температуры в атмосфере (остальные параметры остаются без изменений) приводит к формированию более мощных облаков и, наоборот, результатом ее уменьшения становится ослабление процессов облакообразования в атмосфере.

Выводы. Результаты исследований свидетельствуют о существенной роли взаимодействия облаков с окружающей их атмосферой, обусловленного структурой поля температуры в атмосфере в процессах облакообразования.

Ключевые слова: физика облаков, конвективные облака, системные свойства, математическая модель, поле температуры, структура.

Для цитирования: Ашабоков Б. А., Лесев В. Н. Результаты исследования влияния структуры температурного поля в атмосфере на формирование конвективных облаков // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 2023, № 3, с. 79-89. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2023/3/79-89>

ВВЕДЕНИЕ

Анализ развития теории физики облаков и целенаправленного антропогенного воздействия на них с точки зрения этапов и методов изучения систем демонстрирует переходный характер исследований. Происходит качественная трансформация изучения отдельных процессов внутри облаков (преимущественно микрофизических) в исследования закономерностей их пространственно-временной эволюции в целом, с учетом системных свойств конвективных облаков [6]. Такое состояние данной теории делает актуальным

изучение роли структурообразующих факторов в формировании и развитии облачных структур, определении их макро- и микроструктурных характеристик. К таким факторам необходимо отнести эмерджентные свойства систем и свойство иерархичности.

Исследование роли этих факторов в процессах облако- и осадкообразования требует анализа механизмов взаимодействия как процессов внутри облаков, так и облаков с атмосферой, разработки методологий и методов их проведения. Отметим, что особенности взаимодействия облаков с окру-

© Ашабоков Б. А., Лесев В. Н., 2023

✉ Ашабоков Борис Азреталиевич, e-mail: ashabokov.boris@mail.ru



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

жающей их атмосферой могут быть обусловлены структурой поля ветра в атмосфере, аэрозольным составом атмосферы, термодинамическим состоянием атмосферы и т.д. [7, 9, 11].

Нельзя не отметить, что на влияние состояния окружающей атмосферы на процессы облакообразования обратили внимание относительно давно. В работах [1, 2] были предприняты попытки исследования в натуральных условиях влияния структуры поля ветра на образование градовых облаков. В работах [3-5] проводилось численное исследование влияния характеристик поля ветра в атмосфере на эволюционные процессы конвективных облаков. Исследованиям роли аэрозольного состава атмосферы в процессах облакообразования посвящены работы [8, 10]. Важно отметить, что авторы этих работ свои исследования не относили к проблеме изучения системных свойств облаков.

В настоящей работе приводятся результаты исследований роли термодинамического состояния атмосферы в процессах облакообразования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения численных экспериментов были взяты за основу данные аэрологического зондирования атмосферы в аэропорте города Минеральные Воды. Используя эти данные в качестве входных, на основе трехмерной модели грозовых облаков проводились расчеты эволюции «исходного» облака. С параметрами и структурой данного облака сравнивались параметры и структура модельных облаков. Формирование входных данных для расчета модельных облаков осуществлялось путем варьирования значений температуры на всех высотах, полученных в результате зон-

дирования атмосферы: в значения температуры, полученные в результате зондирования атмосферы, вносились изменения (в сторону увеличения и в сторону уменьшения), равные 1, 3 и 10 %.

Таким образом, рассматривались модельные облака, соответствующие значениям температуры:

$$t(z) = t_0(z) + \Delta t_0(z) \text{ и } t(z) = t_0(z) - \Delta t_0(z)$$

где $t_0(z)$ – значение температуры на высоте z , полученное в результате зондирования атмосферы; $\Delta t_0(z) = 0,01t_0(z); 0,03t_0(z); 0,1t_0(z)$.

При проведении расчетов значения остальных параметров атмосферы оставались неизменными.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Остановимся на результатах расчетов процессов образования и развития грозового облака (исходного облака), с параметрами которого сравнивались параметры модельных облаков. Максимальные значения основных параметров данного облака и их положения над поверхностью земли на 30-ой минуте развития облака получились равными: водность: 5,10 г/м³, H=2,25 км; ледность: 4,95 г/м³, H=3,75 км; вертикальная скорость восходящих и нисходящих воздушных потоков: 20,7 (-1,85) м/с, H=4,25 (4,00) км; коэффициент турбулентности: 413,4 м²/с, H=4,25 км; отражаемость (3,2 см): 66,8 dBZ, H=2,50 км; значение потенциала электрического поля: 6,5 · 10⁷ В, H=5,50 км; напряжённость электрического поля: 214,3 (-352,0) В/см, H=7,25 (4,00) км.

На рисунках 1-3 изображены параметры облака на 30-ой минуте его развития. В частности, на рисунке 1 приводится изоповерхность ледности 0,350 г/м³ на фоне изолиний водности (левый

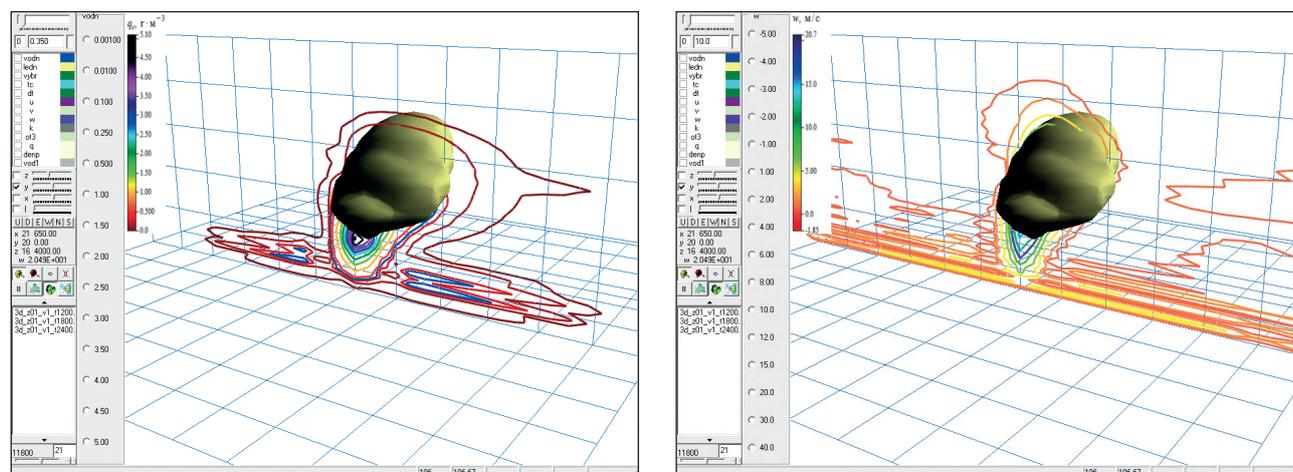


Рис. 1. Изоповерхность ледности 0,350 г/м³ на фоне изолиний водности (слева) и вертикальной составляющей скорости воздушных потоков (справа)

[Fig. 1. Isosurface of ice content 0,350 g/m³ against the background of the water content contour (left) and the vertical component of the air flow velocity (right)]

рисунок) и вертикальной составляющей скорости воздушных потоков (правый рисунок). На высоте $H=3,75$ км располагается максимальное значение ледности $4,95 \text{ г/м}^3$. Изолинии водности достигают поверхности земли, что говорит о выпадении жидких осадков из облака. В свою очередь, расположение изоповерхности ледности над изоповерхностью водности указывает на то, что основным механизмом роста ледяных частиц в облаке является захват переохлажденных капель, которые переносятся восходящими воздушными потоками снизу в область локализации кристаллов.

Изолинии водности, охватывают достаточно большую площадь. Под влиянием горизонталь-

ной составляющей воздушных потоков области локализации капель и ледяных частиц, а также зона восходящих воздушных потоков наклонены к горизонтали. Максимальная вертикальная скорость восходящих движений воздуха в данной зоне равна $28,0 \text{ м/с}$, а располагается она на высоте $H=4,75$ км. В центральной части зоны восходящих воздушных потоков, где скорости подъема воздуха относительно большие, процессы образования капель и кристаллов, а также их взаимодействие между собой носят более интенсивный характер. С течением времени наблюдается увеличение объема области, ограниченной изоповерхностью ледности и других параметров облака.

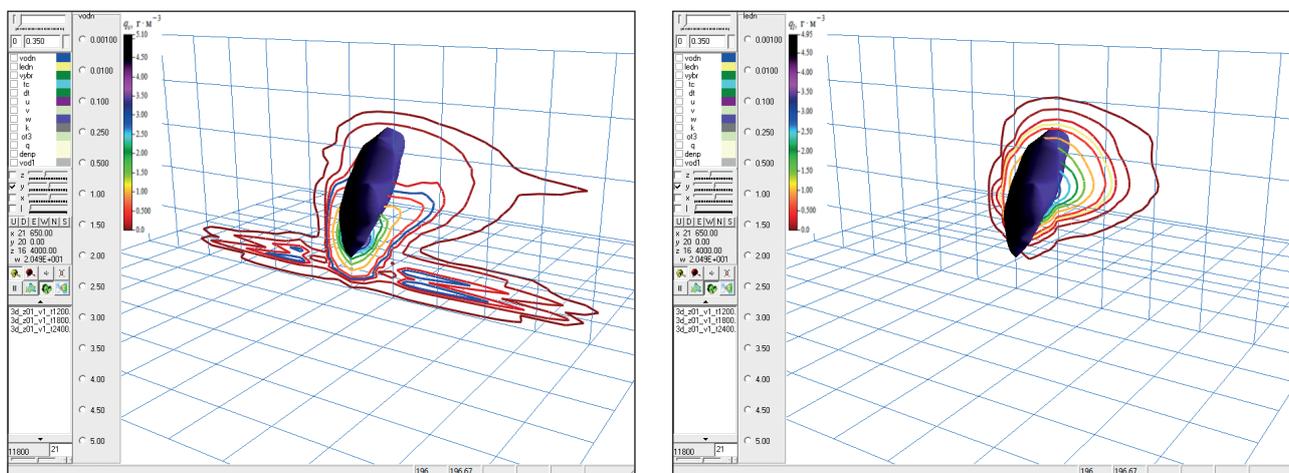


Рис.2. Изоповерхность вертикальной составляющей скорости воздушных потоков 10 м/с на фоне изолиний водности (слева) и ледности (справа)

[Fig. 2. Isosurface of the vertical component of the velocity of 10 м/с against the background of the isoline of water content (left) and pallor (right)]

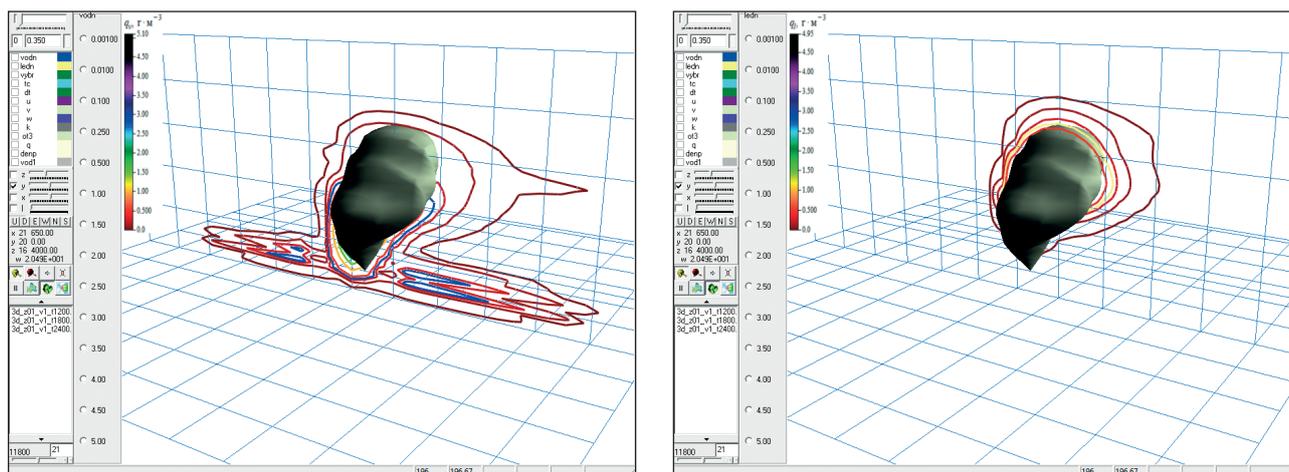


Рис. 3. Изоповерхность отражаемости $45,0 \text{ dBZ}$ на фоне изолиний водности (слева) и ледности (справа)

[Fig. 3. Isosurface reflectivity of $45,0 \text{ dBZ}$ against the background of the isolines of water content (left) and ice content (right)]

На рисунке 2 изолинии повышенных значений водности расположены в нижней части, а

изолинии этих же значений ледности в средней части области, ограниченной изоповерхностью

$w = 10$ м/с. О наличии жидких осадков свидетельствует достижение изолиний водности поверхности земли, твердых же осадков не наблюдается.

На рисунке 3 приводится изоповерхность отражаемости 45,0 dBZ в вертикальной плоскости. Максимальное значение данного параметра равно 66,8 dBZ и расположено оно на высоте $H = 2,5$ км над поверхностью земли.

Объем облака, ограниченный изоповерхностью отражаемости 45,0 dBZ, полностью охвачен изолиниями водности. Практически весь этот объем охвачен и изолиниями ледности за исключением небольшой нижней части. Следовательно, отражаемость от объема облака, ограниченно изоповерхностью 45,0 dBZ, формируется как каплями, так и ледяными частицами.

Остановимся теперь на результатах вычислительных экспериментов для аналогичных параметров облака на 40-ой минуте его развития. Соответствующие максимальные значения параметров облака в указанный момент времени получились равными: водность: $2,95 \text{ г/м}^3$, $H = 1,75$ км; ледность: $1,86 \text{ г/м}^3$, $H = 3,75$ км; вертикальная скорость

восходящих и нисходящих воздушных потоков: $19,1 (-1,31)$ м/с, $H = 4,25 (1,50)$ км; коэффициент турбулентности: $410,2 \text{ м}^2/\text{с}$, $H = 4,75$ км; отражаемость (3,2 см): $74,1 \text{ dBZ}$, $H = 1,50$ км; значение потенциала электрического поля: $1,2 \cdot 10^8 \text{ В}$, $H = 6,25$ км; напряженность электрического поля: $313,9 (-444,4) \text{ В/см}$, $H = 7,50 (4,50)$ км.

Сравнительный анализ полученных данных с аналогичными на предыдущем временном участке свидетельствует, что имеет место уменьшение максимального значения отдельных параметров. Например, уменьшаются максимальные значения водности, ледности, вертикальной скорости воздуха, коэффициента турбулентности. Более существенно уменьшились максимальные значения водности и ледности: примерно на 2 и 3 г/м^3 . Остальные параметры, хотя и незначительно, но продемонстрировали некоторое увеличение своих максимальных значений.

Изоповерхность ледности ($0,350 \text{ г/м}^3$) на фоне изолиний изображена на рисунке 4. Здесь, максимальное значение ледности равно $1,86 \text{ г/м}^3$, т.е. по сравнению с его значением в предыдущий момент времени, стало меньше примерно в два раза.

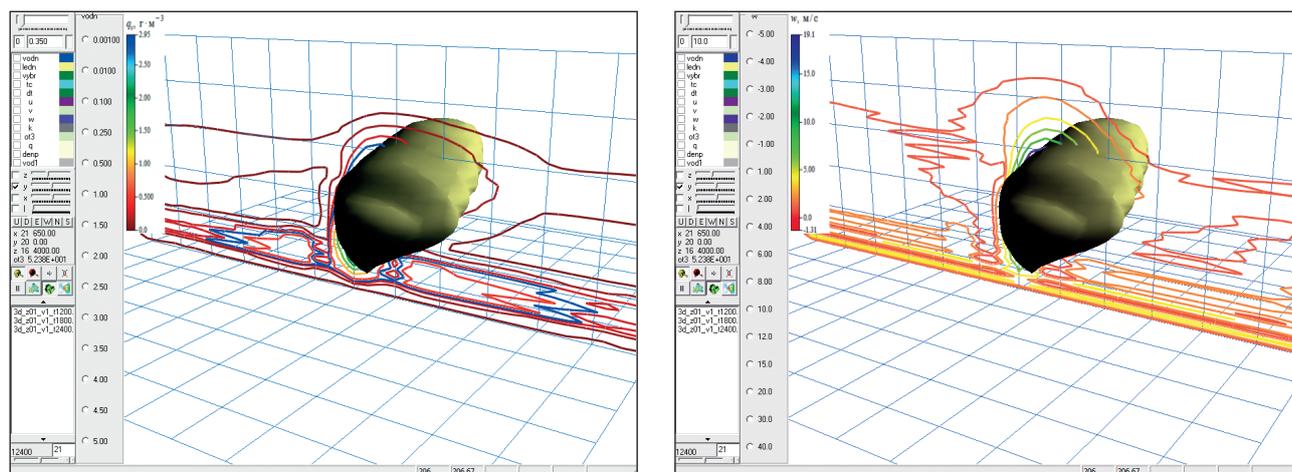


Рис. 4. Изоповерхность ледности $0,350 \text{ г/м}^3$ на фоне изолиний водности (слева) и вертикальной составляющей скорости воздушных потоков (справа)

[Fig. 4. Isosurface of ice content $0,350 \text{ г/м}^3$ against the background of the isoline of water content (left) and the vertical component of the air flow velocity(right)]

Сравнение данного изображения с рисунком 2, показывает, что, имеет место увеличение объема области, ограниченной данной изоповерхностью. На рисунке видно, что изоповерхность практически касается земли и, как и в предыдущие моменты времени, располагается в зоне восходящих воздушных потоков над областью локализации капель. Изоповерхность ледности области локализации капель в облаке находятся в зоне восходящих воздушных потоков, что способствует росту ледяных частиц за счет захвата переохлажденных

капель, которые переносятся восходящими воздушными потоками в область, ограниченную изоповерхностью ледности.

На рисунке 5 приводится изоповерхность вертикальной составляющей скорости воздушных потоков на 40-ой минуте развития облака.

По сравнению с предыдущим моментом времени объем облака, ограниченный данной изоповерхностью, хотя и незначительно, но уменьшился. Кроме того, данный объем облака расположен в зоне формирования капель.

На рисунке 6 приводится изоповерхность отражаемости 45,0 dBZ на фоне изолиний водности (левый рисунок) и ледности (правый рисунок) в

вертикальной плоскости. Максимальное значение данного параметра равно 74,1 dBZ, а высота, на которой оно располагается, равна $H=1,5$ км.

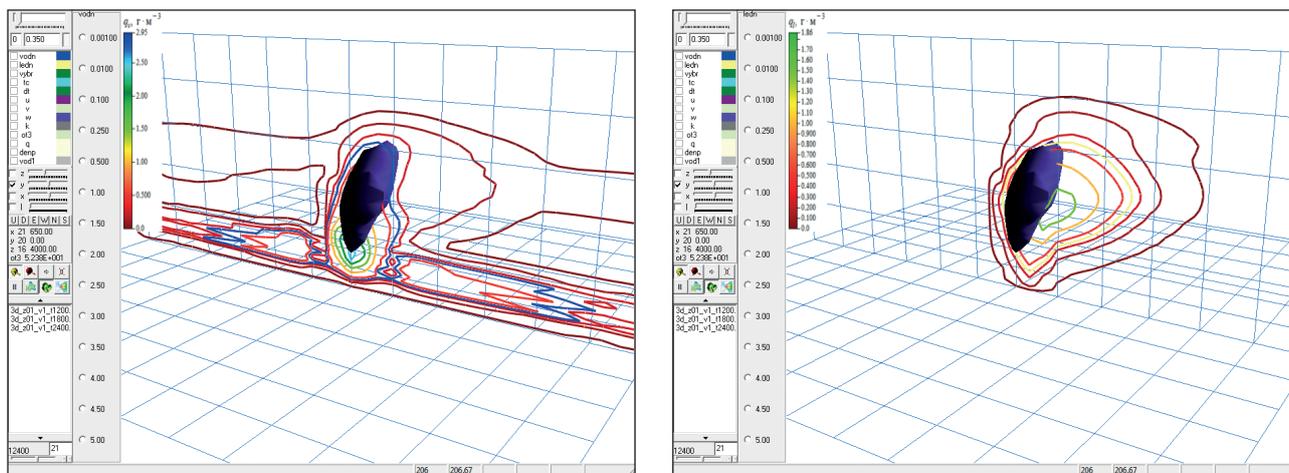


Рис.5. Изоповерхность вертикальной составляющей скорости воздушных потоков 10 м/с на фоне изолиний водности (слева) и ледности (справа) в вертикальной плоскости
 [Fig. 5. Isosurface of the vertical component of the air flow velocity of 10 m/s against the background of the isoline of water content (left) and ice content (right) in the vertical plane]

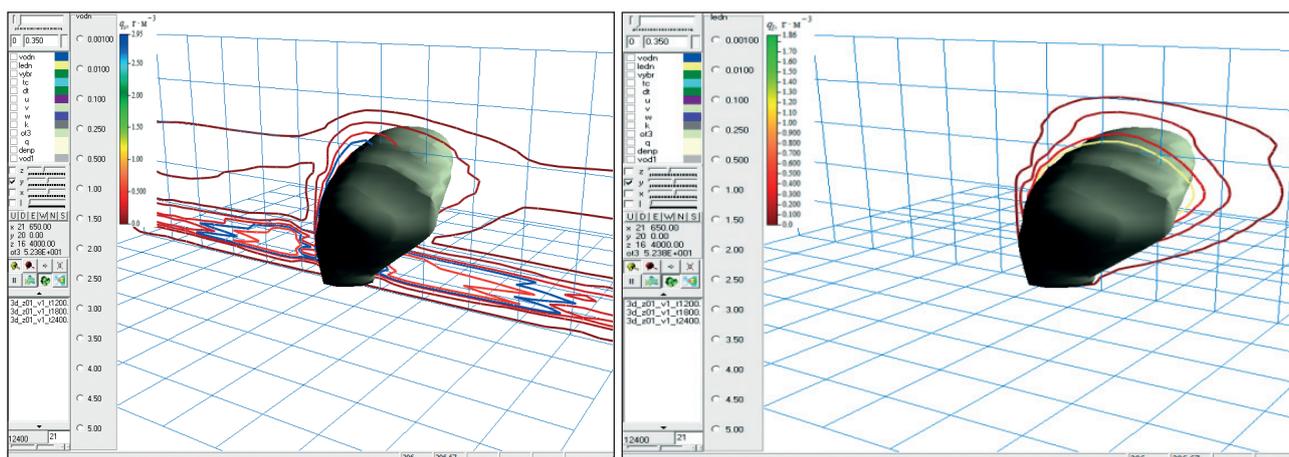


Рис. 6. Изоповерхность отражаемости 45,0dBZ на фоне изолиний водности (слева) и ледности (справа)
 [Fig. 6. Isosurface reflectivity of 45,0dBZ against the background of the isoline of water content (left) and ice content (right)]

Сравнение рисунков 3 и 6 показывает, что радиолокационная структура облака с течением времени заметно поменялась. Изменился объем облака, охваченный изоповерхностью отражаемости, но при этом максимальное значение отражаемости изменилось незначительно. Высота, на которой расположен данный параметр, уменьшилась примерно на 1 км. Эти изменения свидетельствуют о заметном увеличении содержания воды (в виде капель и кристаллов) в облаке по сравнению с 30-ой минутой. Изоповерхность отражаемости 45,0 dBZ почти совпадает с изоповерхностью ледности 0,350 г/м³. Основание изоповерхности отражаемости находится на поверх-

ности земли, что говорит о выпадении жидких и твердых осадков.

Таким образом, получена эволюция(исходного) облака, которое соответствует данным аэрологического зондирования атмосферы. После проведения расчетов исходного и модельных облаков была сформирована таблица 1, в которой для одинаковых моментов времени представлены максимальные значения параметров исходного и модельных облаков, соответствующие модельным состояниям поля температуры воздуха в атмосфере. В верхней половине таблицы приведены параметры модельных облаков в случае, когда приращение температуры воздуха положительное

($\Delta t_0(z) = 1; 3; 10\%$), в нижней части – когда оно отрицательное ($\Delta t_0(z) = -1; -3; -10\%$).

Сравнение максимальных значений параметров исходного и модельных облаков показывает, что чем больше приращение температуры воздуха в атмосфере (независимо от знака), тем значительнее отличие параметров модельных облаков от параметров исходного облака. В первом случае, т.е. в случае, когда $\Delta t_0 = 0,01t_0$, параметры исходного и модельного облаков достаточно близки, в случае, когда $\Delta t_0 = 0,03t_0$, различия между ними более заметны, но структуры исходного и модельного облаков различаются не очень существенно.

Ниже приводятся результаты сравнительного анализа параметров и структуры исходного и

модельного облаков на 40-ой минуте их развития. В качестве модельных использовались облака, соответствующие случаям, когда температура в атмосфере на всех высотах на 10% была выше и ниже температуры, полученной в результате аэрологического зондирования атмосферы (определяется по формуле $\Delta t_0(z) = 0,1t_0(z)$).

Остановимся на результатах расчетов первого из этих облаков. Максимальные значения параметров облака получились равными: водность: 3,23 г/м³, Н=3,00 км; лёдность: 2,53 г/м³, Н=5,00 км; вертикальная скорость восходящих и нисходящих воздушных потоков: 34,0 (–6,49) м/с, Н= 6,25 (8,00) км; коэффициент турбулентности: 926,2 м²/с, Н=8,25 км; отражаемость (3,2 см):

Таблица 1

Параметры облаков при различных случаях варьирования температуры
[Table 1. Cloud parameters for various temperature variations]

Параметры облака / Cloud parameters	Максимальные значения / Maximum values							
	$t(z) = t_0(z) + \Delta t_0(z)$							
	t=30 мин / t=30 min				t=40 мин / t=40 min			
	Исх. вар./ Initial ver.	1-вар. / 1 ver.	2-вар. / 2 ver.	3-вар. / 3 ver.	Исх. вар./ Initial ver.	1-вар. / 1 ver.	2-вар. / 2 ver.	3-вар. / 3 ver.
Водность	5,10 г/м ³	5,06 г/м ³	4,97 г/м ³	4,79 г/м ³	2,95 г/м ³	2,90 г/м ³	2,76 г/м ³	3,23 г/м ³
Лёдность	4,95 г/м ³	4,77 г/м ³	4,43 г/м ³	3,76 г/м ³	1,86 г/м ³	1,93 г/м ³	2,06 г/м ³	2,53 г/м ³
Вертикальная скорость	20,7 м/с	21,9 м/с	24,5 м/с	33,8 м/с	19,1 м/с	20,5 м/с	23,4 м/с	34,0 м/с
Коэффициент турбулентности	413,4 м ² /с	414,8 м ² /с	516,1 м ² /с	938,2 м ² /с	410,2 м ² /с	409,5 м ² /с	408,1 м ² /с	926,2 м ² /с
Отражаемость (3,2 см)	66,8 dBZ	66,9 dBZ	67,0 dBZ	67,9 dBZ	74,1 dBZ	73,6 dBZ	74,4 dBZ	72,5 dBZ
Потенциал электрического поля	6,5·10 ⁷ В	6,6·10 ⁷ В	7,1·10 ⁷ В	8,8·10 ⁷ В	1,2·10 ⁸ В	1,3·10 ⁸ В	1,4·10 ⁸ В	2,0·10 ⁸ В
Напряженность электрического поля	214,3 В/см	211,1 В/см	211,8 В/см	177,9 В/см	313,9 В/см	312,5 В/см	311,8 В/см	209,0 В/см
	$t(z) = t_0(z) - \Delta t_0(z)$							
Водность	5,10 г/м ³	5,14 г/м ³	5,19 г/м ³	5,54 г/м ³	2,95 г/м ³	2,97 г/м ³	2,94 г/м ³	2,04 г/м ³
Лёдность	4,95 г/м ³	5,14 г/м ³	5,43 г/м ³	5,01 г/м ³	1,86 г/м ³	1,80 г/м ³	1,87 г/м ³	2,01 г/м ³
Вертикальная скорость	20,7 м/с	19,5 м/с	17,1 м/с	9,73 м/с	19,1 м/с	17,7 м/с	15,0 м/с	7,96 м/с
Коэффициент турбулентности	413,4 м ² /с	413,2 м ² /с	409,3 м ² /с	351,7 м ² /с	410,2 м ² /с	405,4 м ² /с	376,2 м ² /с	361,1 м ² /с
Отражаемость (3,2 см)	66,8 dBZ	66,8 dBZ	67,3 dBZ	70,0 dBZ	74,1 dBZ	74,6 dBZ	75,3 dBZ	73,4 dBZ
Потенциал электрического поля	6,5·10 ⁷ В	6,3·10 ⁷ В	6,1·10 ⁷ В	5,3·10 ⁷ В	1,2·10 ⁸ В	1,2·10 ⁸ В	1,1·10 ⁸ В	8,6·10 ⁷ В
Напряженность электрического поля	214,3 В/см	214,2 В/см	215,9 В/см	274,4 В/см	313,9 В/см	315,1 В/см	319,4 В/см	209,0 В/см

72,5 dBZ, $H=2,25$ км; значение потенциала электрического поля: $2,0 \cdot 10^8$ В, $H=8,50$ км; напряженность электрического поля: 209,0 (–428,7) В/см, $H=9,00$ (5,75) км.

Сравнение этих значений с соответствующими значениями параметров исходного облака показывает, что максимальные значения практически всех параметров модельного облака (за исключением отражаемости и напряженности электрического поля) оказались выше, чем у исходного. На 30 минуте таких параметров было меньше, то есть влияние повышения температуры атмосферы становится более заметным по мере развития облака. В то же время сравнительный анализ параметров облака на 30-ой и 40-ой минуте показал,

что максимальные значения влажности, ледности и коэффициента турбулентности стали меньше. Что касается максимальных значений остальных параметров, то на 40-ой минуте они стали больше. Таким образом, можно утверждать, что развитие облака прекращается.

На рисунке 7 приводится изоповерхность ледности ($0,350 \text{ г/м}^3$) на 40-ой минуте развития облака. Как показывает сравнение рисунков 4 и 7, структура модельного облака, а также значения его параметров, существенно отличаются от структуры и значений параметров исходного облака: результатом увеличения температуры в окружающей атмосфере стало формирование более мощного по сравнению с исходным облака.

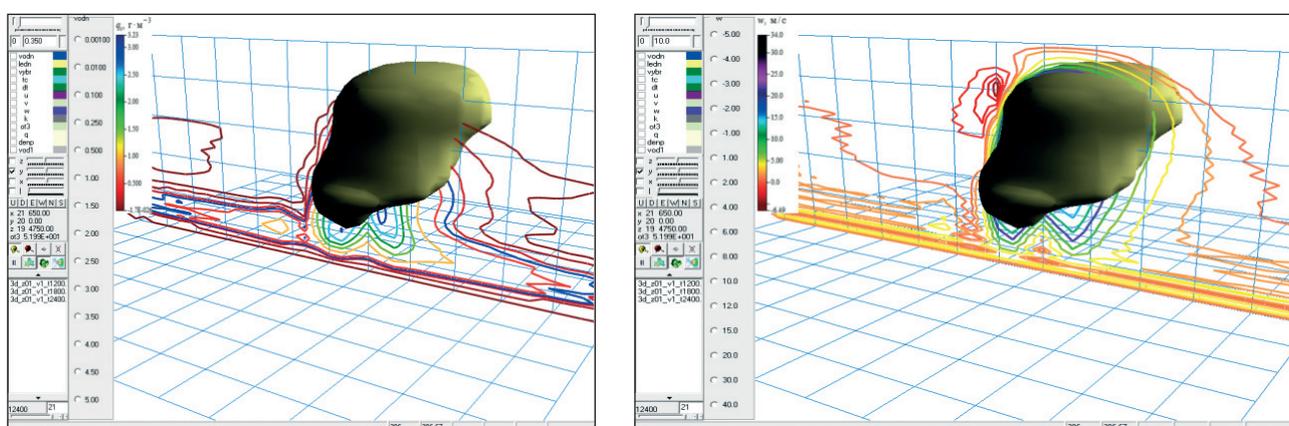


Рис. 7. Изоповерхность ледности $0,350 \text{ г/м}^3$ на фоне изолиний влажности (слева) и вертикальной составляющей скорости воздушных потоков (справа)

[Fig. 7. Isosurface of ice $0,350 \text{ g/m}^3$ against the background of the isoline of water content (left) and the vertical component of the velocity of air sweat (right)]

На рисунке 8 представлена изоповерхность вертикальной составляющей скорости 10 м/с на фоне изолиний ледности и влажности в вертикальной плоскости на 40-ой минуте. Следует заме-

тить, что по сравнению с данными на 30-ой минуте, имеет место заметная деформация формы и объема области, ограниченной данной изоповерхностью в облаке.

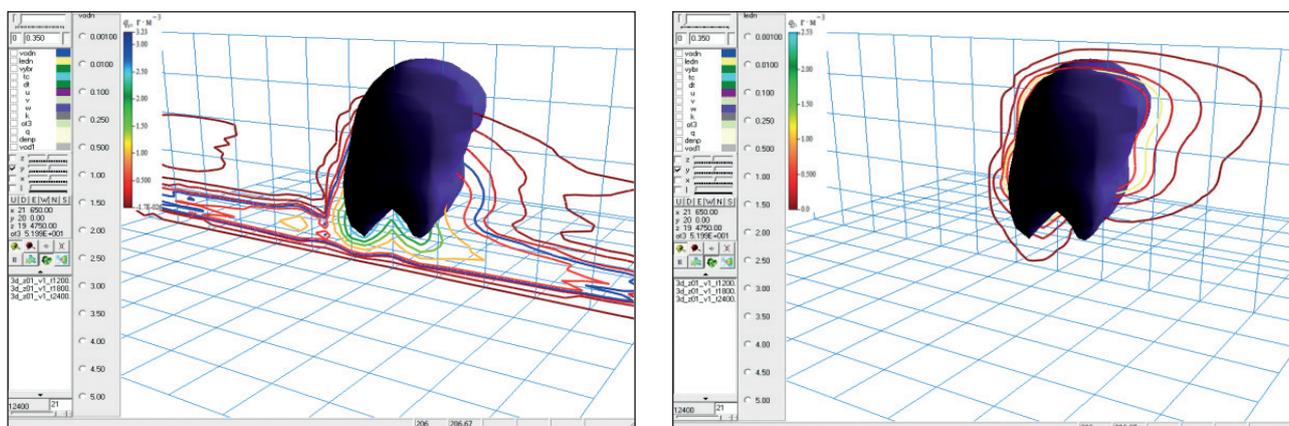


Рис. 8. Изоповерхность вертикальной составляющей скорости 10 м/с на фоне изолиний влажности (слева) и ледности (справа)

[Fig. 8. Isosurface of the vertical component of the velocity of 10 m/s against the background of the isoline of water content (left) and ice content (right)]

Таким же образом сравнение рисунков 5 и 8 показывает, что имеет место существенное увеличение объема области, ограниченной данной изоповерхностью в случае модельного облака. Если в исходном облаке она полностью находилась в зоне локализации капель, то в модельном в данной зоне находится часть изоповерхности: верхняя часть оказалась в зоне локализации кристаллов (см. рис. 8). На рисунке видно, что изолинии водности и ледности касаются поверхности земли, что указывает на выпадение осадков в виде капель и ледяных частиц.

Далее рассмотрим влияние понижения температуры воздуха в атмосфере на 10 % на структуру и параметры модельного облака.

Максимальные значения параметров облачной системы и высоты над поверхностью земли, на которых они расположены, получились равными: водность: $2,04 \text{ г/м}^3$, $H=1,50 \text{ км}$; ледность: $2,01 \text{ г/м}^3$, $H=2,75 \text{ км}$; скорость восходящих и нисходящих воздушных потоков: $7,96 (-1,09) \text{ м/с}$, $H=2,25 (5,50) \text{ км}$; коэффициент турбулентности: $361,1 \text{ м}^2/\text{с}$, $H=4,75 \text{ км}$; отражаемость ($3,2 \text{ см}$): $73,4 \text{ dBZ}$, $H=0,750 \text{ км}$; значение потенциала электрического поля: $8,6 \cdot 10^7 (-2,9 \cdot 106) \text{ В}$, $H=4,50$

($1,00$) км; напряженность электрического поля: $359,7 (-474,2) \text{ В/см}$, $H=5,25(3,50) \text{ км}$.

Сравнительный анализ значений параметров модельного облака с соответствующими значениями параметров исходного облака показывает, что максимальные значения основных параметров у первого облака оказались ниже, чем второго. Это обусловлено тем, что понижение температуры воздуха в атмосфере привело к замедлению процессов облакообразования. Об этом свидетельствует, например, уменьшение максимальных значений таких параметров, как водность, скорость восходящих потоков воздуха, отражаемость и т.д.

На рисунке 9 представлена изоповерхность ледности $0,350 \text{ г/м}^3$ вместе с изолиниями водности и вертикальной составляющей скорости воздушных потоков. Результаты сравнения данного рисунка с рисунками 4 и 7 подтверждают выводы о существенном замедлении развития облака в рассматриваемом случае, то есть при понижении температуры воздуха в атмосфере. Результатом понижения температуры воздуха в атмосфере является не только уменьшение максимальных значений параметров облака, но и изменения его структуры.

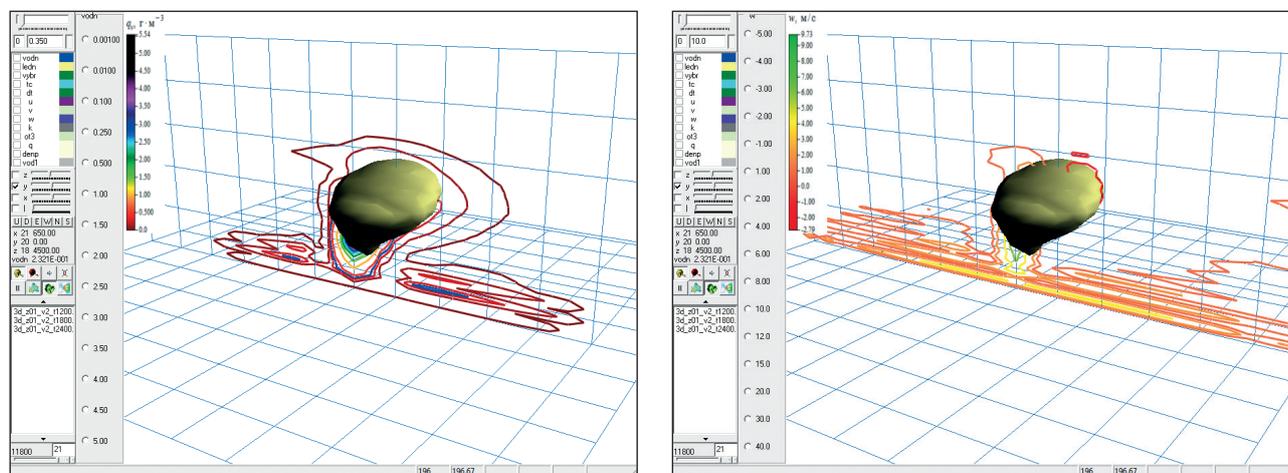


Рис. 9. Изоповерхность ледности $0,350 \text{ г/м}^3$ на фоне изолиний водности и вертикальной составляющей скорости воздушных потоков

[Fig. 9. Isosurface of ice $0,350 \text{ g/m}^3$ against the background of the isoline of water content and the vertical component of the air flow velocity]

На рисунке 10 приведены изолинии водности и ледности. Можно заметить, что на рисунке отсутствует изоповерхность вертикальной составляющей скорости $10,0 \text{ м/с}$. Это связано с тем, что максимальная скорость воздушных потоков в облаке была равна $7,96 \text{ м/с}$.

Сравнение рисунков 5, 8 и 10 показывает, что поле температуры воздуха в атмосфере в существен-

ной степени может повлиять на процессы облакообразования, на структуру образующихся облаков.

На рисунке 11 приведена изоповерхность отражаемости $45,0 \text{ dBZ}$ на фоне изолиний водности и ледности.

На рисунке видно, что изоповерхности, можно сказать, достигли поверхности земли, то есть осадки из облака пока еще не выпадают. Можно еще за-

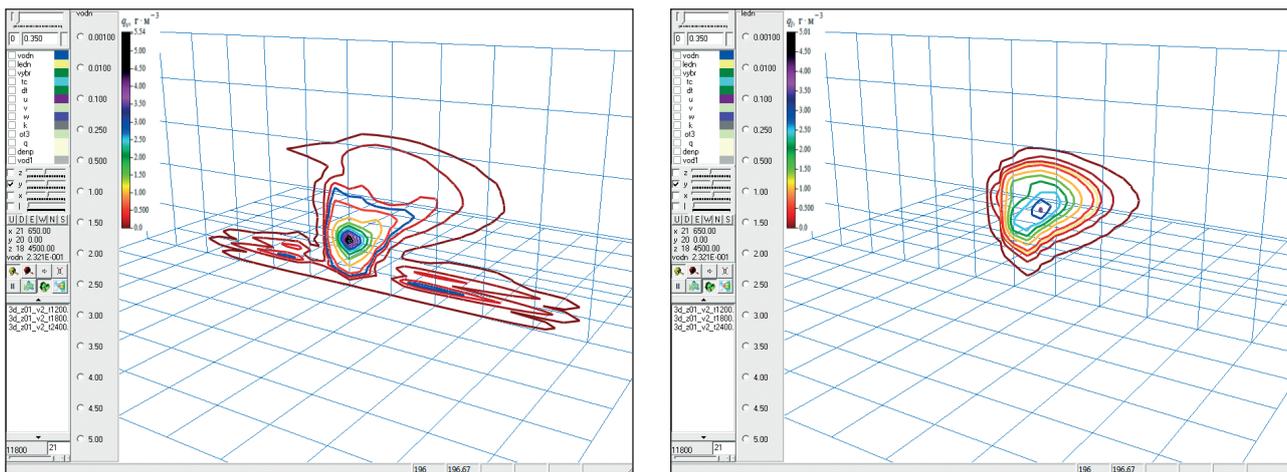


Рис. 10. Изоповерхность вертикальной составляющей скорости воздушных потоков в облаке 10,0 м/с на фоне изолиний водности и ледности

[Fig. 10. Isosurface of the vertical component of the air flow velocity in a cloud of 10,0 m/s against the background of the isoline of water and ice]

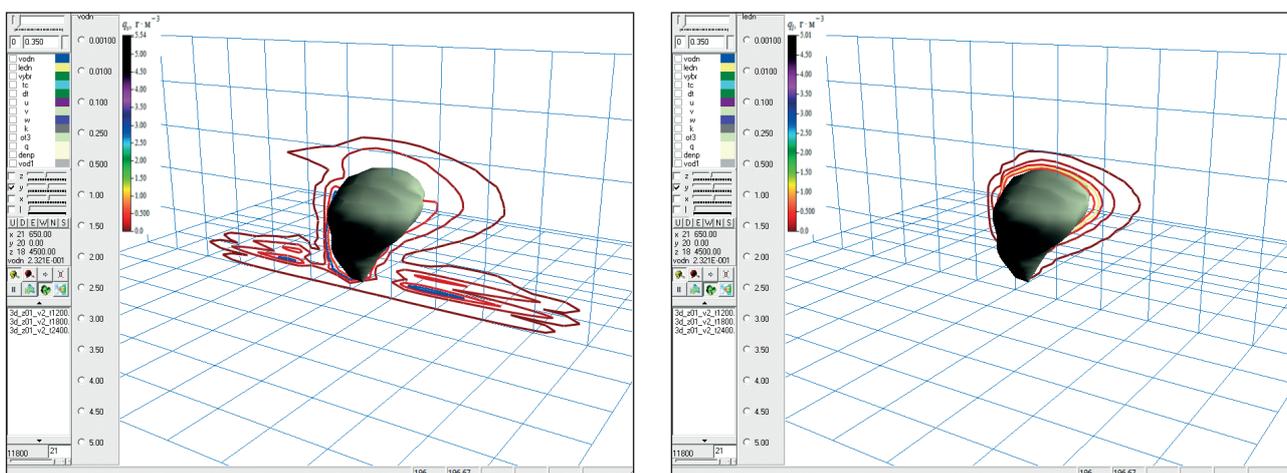


Рис. 11. Изоповерхность отражаемости 45,0 dBZ на фоне изолиний водности и ледности

[Fig. 11. Isosurface reflectivity of 45,0 dBZ against the background of water and ice isolines]

метить, что изоповерхности отражаемости повторяют форму изоповерхности ледности 0,350 г/м³ (рис. 9). Это может свидетельствовать о том, что отражаемость преимущественно формируется ледяными частицами, а в нижней части области, ограниченной данной изоповерхностью, она, видимо, формируется каплями и ледяными частицами.

Таким образом, можно сделать вывод, что поле температуры атмосферы является одним из ключевых факторов, определяющих процессы облакообразования в атмосфере. Оно влияет как на параметры облаков, так и на их структуру.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты математического моделирования процесса эволюции конвективных облаков для различных (реальных и модельных) вариантов температурных полей в

атмосфере. Показано, что данная характеристика является одним из механизмов, посредством которого осуществляется взаимодействие облаков с окружающей их атмосферой.

Результаты расчетов позволяют делать вывод, что незначительные вариации температуры в атмосфере (в пределах 1-2% как в сторону повышения, так и в сторону понижения) не приводят к существенным изменениям параметров облака. При изменении данного параметра примерно на 10% параметры и структура образующихся облаков заметно отличаются от параметров и структуры исходного облака.

Таким образом, взаимодействие конвективных облаков с атмосферой, посредством поля температуры воздуха в последней, является одним из важнейших структурообразующих факторов для облаков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковальчук А. Н. О влиянии ветрового сдвига на выпадение града // *Труды ВГИ*, 1969, вып. 14, с. 39-48.
2. Мальбахова Н. М. Взаимосвязь структуры градовых облаков с вертикальной структурой ветра в атмосфере // *Труды ВГИ*, 1990, вып. 80, с. 99-106.
3. Ньютон Ч. У. Гидродинамическое взаимодействие с окружающим полем ветра как один из факторов развития кучевых облаков // *Динамика кучевых облаков*, 1964, с. 187-201.
4. Пастушков Р. С. О развитии кучевых облаков в атмосфере с вертикальным сдвигом ветра // *Метеорология и гидрология*, 1969, № 4, с. 26-41.
5. Пастушков Р. С. Численное моделирование взаимодействия конвективных облаков с окружающей их атмосферой // *Труды ЦАО*, 1972, вып. 108, с. 93-97.
6. Численное моделирование влияния структуры поля ветра в атмосфере на макро- и микроструктурные характеристики конвективных облаков / Б. А. Ашабоков, Л. М. Федченко, В. А. Шаповалов и др. // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*, 2022, т. 58, № 6, с. 669-680.
7. 3D model of a convective cloud: the interaction of microphysical and electrical processes / V. A. Shapovalov, B. A. Ashabokov, A. V. Shapovalov, V. N. Lesev // *JP Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, v. 23, no. 1, pp. 1-18.
8. Aerosol effects on deep convection: The propagation of aerosol perturbations through convective cloud microphysics / M. Heikenfeld, B. White, L. Labbouz, P. Stier // *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022, 19, pp. 2601-2627.
9. Basu B. A model of the downdraft from convective clouds // *MAUSAM*, 2022, 37, pp. 265-268
10. Importance of aerosols and shape of the cloud droplet size distribution for convective clouds and precipitation / C. Barthlott, A. Zarbo, T. Matsunobu, C. Keil // *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, 22, pp. 2153-2172.
11. Yang J., Wang Z., Heymsfield A. On the freezing time of supercooled drops in developing convective clouds over tropical ocean // *Atmospheric Research*, 2018, 211, pp. 30-37.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию 14.02.2023

Принята к публикации 04.09.2023

UDC 551.515.4; 551.501.5; 551.501.776

ISSN 1609-0683

DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2023/3/79-89>

The Results of the Study of the Influence of the Structure of the Temperature Field in the Atmosphere on the Formation of Convective Clouds

B. A. Ashabokov✉, V. N. Lesev

*High-Mountain Geophysical Institute, Russian Federation
(2, Lenin Ave., Nalchik, 360030)*

Abstract. The purpose of the work is to study the influence of the structure of the temperature field in the atmosphere on the values of the structural parameters of convective clouds by mathematical modeling methods.

Materials and methods. One of the key directions in the development of the theory of cloud physics is the study of their system properties. These properties are the most important factors influencing the formation of the cloud structure. The methodology of the research consists in a comparative analysis of the parameters and structure of the initial and model clouds. The input data for the calculation of model clouds are obtained by varying the temperature values at all altitudes obtained as a result of aerological sounding of the troposphere at the Mineralnye Vody airport.

Results and discussion. A comparative analysis of the parameters of the initial and model clouds showed that the structure and parameters of clouds are significantly influenced by the structure of the temperature field in the atmosphere. At the same time, temperature variations in the direction of increasing or decreasing within 1-2% do not lead to significant changes in cloud parameters, and variations of the order of 10% can lead to the formation of clouds that differ significantly from the original cloud. At the same time, an increase in temperature in the at-

© Ashabokov B.A., Lesev V.N., 2023

✉ Boris A. Ashabokov, e-mail: ashabokov.boris@mail.ru



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

mosphere (other parameters remain unchanged) leads to the formation of more powerful clouds and, conversely, the result of its decrease is a weakening of cloud formation processes in the atmosphere.

Conclusions. The research results indicate the significant role of the interaction of clouds with the surrounding atmosphere, due to the structure of the temperature field in the atmosphere in the processes of cloud formation.

Key words: cloud physics, convective clouds, system properties, mathematical model, temperature field, structure.

For citation: Ashabokov B.A., Lesev V.N. The Results of the Study of the Influence of the Structure of the Temperature Field in the Atmosphere on the Formation of Convective Clouds. *Vestnik Voronezskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografiya. Geoekologiya*, 2023, no. 3, pp. 79-89. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2023/3/79-89>

REFERENCES

1. Koval'chuk A.N. O vliyanií vetrovogo sdviga na vypadenie grada [On the effect of wind shear on hail precipitation]. *Trudy VGI*, 1969, v. 14, pp. 39-48. (In Russ.)
2. Mal'bakhova N.M. Vzaimosvyaz' struktury gradovykh oblakov s vertikal'noy strukturoy vetra v atmosfere [The relationship of the structure of hail clouds with the vertical structure of wind in the atmosphere]. *Trudy VGI*, 1990, v. 80, pp. 99-106. (In Russ.)
3. N'yuton Ch. U. Gidrodinamicheskoe vzaimodeystvie s okruzhayushchim polem vetra kak odin iz faktorov razvitiya kuchevykh oblakov [Hydrodynamic interaction with the surrounding wind field as one of the factors of cumulus cloud development]. *Dinamika kuchevykh oblakov*, 1964, pp. 187-201. (In Russ.)
4. Pastushkov R.S. O razvitií kuchevykh oblakov v atmosfere s vertikal'nym sdvigom vetra [On the development of cumulus clouds in the atmosphere with vertical wind shear]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 1969, no. 4, pp. 26-41. (In Russ.)
5. Pastushkov R.S. Chislennoe modelirovanie vzaimodeystviya konvektivnykh oblakov s okruzhayushchey ikh atmosferoy [Numerical simulation of the interaction of convective clouds with their surrounding atmosphere]. *Trudy TsAO*, 1972, v. 108, pp. 93-97. (In Russ.)
6. Chislennoe modelirovanie vliyaniya struktury polya vetra v atmosfere na makro- i mikrostrukturnye kharakteristiki konvektivnykh oblakov [Numerical modeling of the influence of the wind field structure in the atmosphere on the macro- and microstructural characteristics of convective clouds] / B.A. Ashabokov, L.M. Fedchenko, V.A. Shapovalovi dr. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, 2022, vol. 58, no. 6, pp. 669-680. (In Russ.)
7. 3D model of a convective cloud: the interaction of microphysical and electrical processes / V.A. Shapovalov, B.A. Ashabokov, A.V. Shapovalov, V.N. Lesev // *JP Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, v. 23, no. 1, pp. 1-18.
8. Aerosol effects on deep convection: The propagation of aerosol perturbations through convective cloud microphysics / M. Heikenfeld, B. White, L. Labbouz, P. Stier // *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022, 19, pp. 2601-2627.
9. Basu B. A model of the downdraft from convective clouds // *MAUSAM*, 2022, 37, pp. 265-268
10. Importance of aerosols and shape of the cloud droplet size distribution for convective clouds and precipitation / C. Barthlott, A. Zarbo, T. Matsunobu, C. Keil // *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, 22, pp. 2153-2172.
11. Yang J., Wang Z., Heymsfield A. On the freezing time of supercooled drops in developing convective clouds over tropical ocean // *Atmospheric Research*, 2018, 211, pp. 30-37.

Conflict of interests: The authors declare no information of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Received: 14.02.2023

Accepted: 04.09.2023

Ашабоков Борис Азреталиевич
заведующий отделом физики облаков Высокогорного геофизического института, г. Нальчик, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-2889-0864, e-mail: ashabokov.boris@mail.ru

Лесев Вадим Николаевич
первый проректор – проректор по учебной работе Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х.М. Бербекова, г. Нальчик, Российская Федерация, ORCID:0000-0003-3768-6192, e-mail: lvn-tf@mail.ru

Boris A. Ashabokov
Head of the Department of Cloud Physics, High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-2889-0864, e-mail: ashabokov.boris@mail.ru

Vadim N. Lesev
First Vice-Rector – Vice-Rector for Academic Affairs of the Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-3768-6192, e-mail: lvn-tf@mail.ru