

Б.А. Ашабоков, В.Н. Лесев, Г.В. Куповых, В.А. Шаповалов, М.А. Шериева

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АЭРОЗОЛЬНОГО
СОСТАВА АТМОСФЕРЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ МАКРО- И
МИКРОСТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКОВ**

В настоящее время физика облаков и активных воздействий на них постепенно переходит от этапа изучения "элементарных" облачных процессов к этапу изучения облаков в целом с учетом их системных свойств. Одним из направлений исследований на этом этапе становится изучение роли системных свойств облаков в формировании их макро- и микро-структурных характеристик. Именно эти свойства являются основными факторами, влияющими на формирование структуры облаков. В статье представлены некоторые результаты исследований роли одного из таких свойств облаков, а именно взаимодействия облаков с окружающей их атмосферой (свойство иерархичности систем). В качестве способа их взаимодействия рассмотрен механизм, обусловленный аэрозольным составом атмосферы. Методика исследований основана на предположении, что на интенсивность образования кристаллов в облаках влияет содержание в атмосфере аэрозольных частиц достаточной концентрации, обладающих льдообразующими свойствами (ядер сублимации). Для расчетов использовалась трехмерная нестационарная модель конвективных облаков. Интенсивность образования кристаллов в облаке менялась путем варьирования значения параметра в выражении для источника кристаллов в модельных уравнениях для облачной среды. В работе также обсуждается современное состояние проблемы активных воздействий на конвективные облака с целью управления процессами осадкообразования. Для осуществления успешного активного воздействия необходимо определение локальной области в облаке, в которой условия благоприятны для воздействия и концентрации частиц реагента, которую следует обеспечить в данной области в каждый момент времени. Модельные расчеты показали, что незначительное увеличение содержания аэрозольных частиц в атмосфере привело к увеличению значений максимальной ледности и суммарной водности, а также ледности при одновременном уменьшении максимальной водности в облаке. При этом его макроструктурные характеристики практически не изменились. Дальнейшее решение задач требует разработки эффективных методологий моделирования активного воздействия на конвективные облака.

Конвективные облака; системные свойства; свойство иерархичности; механизм взаимодействия; аэрозольный состав атмосферы; моделирование; водность; ледность.

B.A. Ashabokov, V.N. Lesev, G.V. Kupovyh, V.A. Shapovalov, M.A. Sherieva

**NUMERICAL MODELING OF THE INFLUENCE OF THE AEROSOL
COMPOSITION OF THE ATMOSPHERE ON THE FORMATION
OF MACRO- AND MICROSTRUCTURAL CHARACTERISTICS
OF CONVECTIVE CLOUDS**

Currently, the physics of clouds and active impacts on them is gradually moving from the stage of studying "elementary" cloud processes to the stage of studying clouds as a whole, taking into account their systemic properties. One of the directions of research at this stage is the study of the role of the system properties of clouds in the formation of their macro- and microstructural characteristics. These properties are the main factors influencing the formation of the cloud structure. The article presents some results of research on the role of one of these properties of clouds, namely the interaction of clouds with their surrounding atmosphere (the property of the hierarchy of systems). The mechanism caused by the aerosol composition of the atmosphere is considered as a method of their interaction. The research methodology is based on the assumption that the intensity of crystal formation in clouds is influenced by the content of aerosol particles of sufficient concentration in the atmosphere with ice-forming properties (sublimation nuclei). A three-

dimensional unsteady model of convective clouds was used for calculations. The intensity of crystal formation in the cloud was changed by varying the value of the parameter in the expression for the crystal source in the model equations for the cloud environment. The paper also discusses the current state of the problem of active impacts on convective clouds in order to control precipitation processes. In order to carry out successful active exposure, it is necessary to determine the local area in the cloud in which conditions are favorable for exposure and the concentration of reagent particles that should be provided in this area at any given time. Model calculations showed that a slight increase in the content of aerosol particles in the atmosphere led to an increase in the values of maximum ice content and total water content, as well as ice content, while simultaneously reducing the maximum water content in the cloud. At the same time, its macro-structural characteristics have practically not changed. Further solving the problems requires the development of effective methodologies for modeling active exposure to convective clouds.

Convective clouds; system properties; hierarchy property; interaction mechanism; aerosol composition of the atmosphere; modeling; water content; ice content.

Состояние вопроса. В работе [1] было отмечено, что развитие физики облаков заметно замедлилось с начала 90-х годов прошлого столетия. Причина, по нашему мнению, заключается в том, что настоящий период времени является переходным для данного научного направления: происходит переход физики облаков от этапа исследования "элементарных" процессов в облаках к этапу изучения формирования их макро- и микроструктурных характеристик с учетом их системных свойств [1, 2].

В связи с этим одним из направлений исследований на наступающем этапе развития данного научного направления становится изучение роли взаимодействия облаков с окружающей их атмосферой, являющейся для них вышестоящей системой (свойство иерархичности систем), а также роли взаимодействия процессов в облаках (эмерджентные свойства систем) в формировании их макро- и микроструктурных характеристик. Именно эти свойства являются основными структурообразующими факторами для облаков [3].

Механизмов взаимодействия облаков с окружающей их атмосферой достаточно много. Поэтому возникает необходимость выделения основных из этих механизмов, а также необходимость разработки экономичных методологий, методов и моделей для их изучения. Отметим еще, что эти исследования связаны с анализом чрезвычайно большого объема информации, получающейся в результате численных экспериментов.

Сложнее обстоит дело с проведением исследований роли эмерджентных свойств облаков. Это можно объяснить тем, что выделение конкретных механизмов взаимодействия процессов в облаках встречает достаточно сложные трудности. Более перспективным в данном случае, по нашему мнению, является использование для этой цели проявлений взаимодействия процессов.

Говоря об исследовании роли системных свойств облаков нельзя еще не отметить, что агрегирование "элементарных" процессов в облаках возможно только в рамках численных моделей, что в значительной степени повышает роль математического моделирования в физике облаков – на следующих этапах оно становится основным методом исследования в физике облаков. Заметно повышаются требования и к моделям облаков. Отметим, что разработке многомерных численных моделей конвективных облаков в последние годы уделяется большое внимание. В качестве примера отметим, что в [1] приводится трехмерная нестационарная модель облаков с детальным учетом процессов, в [4] модель этих же облаков, но с параметризованной микрофизикой.

Количество публикаций по исследованию роли системных свойств облаков пока еще ограничено. Можно отметить работы [1, 2], в которых изложены некоторые результаты исследований роли структуры поля ветра в атмосфере на процессы

образования и развития грозоградовых облаков. Отметим еще, что в работе [1] приведены некоторые результаты исследований роли взаимодействия процессов в градовых облаках на формирование их макро- и микроструктурных характеристик.

Но тот факт, что от состояния атмосферы в существенной степени могут зависеть процессы облакообразования, был замечен относительно давно. В качестве примера можно отметить работы [5–11], в которых приводятся некоторые результаты исследований в этом направлении. При этом авторы этих работ не считали, что эти исследования относятся к новому этапу развития физики облаков. Исследования в работах [5,6,10] проводились путем натуральных наблюдений за процессами облакообразования при различных структурах поля ветра в атмосфере. Но важно заметить, что детальное исследование данного вопроса возможно только на основе численного моделирования. В работах [7–9, 11, 12] исследования были проведены на основе численного моделирования.

Как известно, переход научного направления от одного этапа развития к другому не может быть скачкообразным, иногда он может занимать достаточно много времени. Это относится и к физике облаков. До настоящего времени не все "элементарные" процессы в облаках изучены на достаточном уровне. Это касается, например, процессов образования первичных капель и кристаллов, процессов роста кристаллов, электризации облачных частиц и других. Недостаточно изучены и плохо формализуются процессы взаимодействия частиц реагентов с облачной средой. Такое состояние исследований этих и других процессов становится источником неопределенностей при моделировании облаков. Поэтому важнейшим направлением исследований в физике облаков и далее остается изучение тех процессов, которые остались недостаточно изученными.

Сложным и неоднозначным является состояние активных воздействий на конвективные облака с целью управления процессами осадкообразования. Используемые для этой цели технологии до настоящего времени, можно сказать, опираются не на методы, полученные в результате строгих исследований, а на концепции, предложенные в прошлом столетии. Но важно иметь в виду, что недостаточная изученность облачных процессов и связанная с ней ограниченность наших знаний о закономерностях формирования макро- и микроструктурных характеристик облаков исключают возможности предложения научно обоснованной и эффективной концепции активного воздействия на такие сложные и нелинейные системы, как конвективные облака.

Поэтому с учетом повышения потребности в эффективных методах управления процессами осадкообразования в облаках переход к технологиям, основанным на научно обоснованных методах активного воздействия, становится чрезвычайно актуальной проблемой. Задачи, возникающие на пути разработки таких методов, условно можно сформулировать следующим образом:

- ◆ нахождение локальной области в облаке, в которой условия благоприятны для воздействия с целью достижения поставленной цели;
- ◆ определение концентрации частиц реагента, которую следует обеспечить в данной области в каждый момент времени.

Решение этих задач путем перебора различных вариантов внесения реагента в облако на основе математического моделирования будет встречать серьезные трудности. Особенно это касается второй задачи. Тем не менее, использование моделей облаков для решения данной проблемы пока еще сводится именно к такому способу. При этом для этой цели используются самые различные модели облаков [1, 12–14]. Поэтому серьезное внимание должно быть уделено развитию методологий для проведения исследований в этом направлении. Они должны быть основаны на широком использовании математического моделирования.

Исследования процессов системы «аэрозоль-облако», являющихся важнейшими из механизмов взаимодействия облаков с атмосферой и влияющих в том числе на формирование глобального климата, отражены в работах [15–20]. В настоящей работе приводятся некоторые результаты моделирования влияния на процессы облакообразования аэрозольного состава атмосферы.

Метод и результаты исследований. Исследование влияния аэрозольного состава атмосферы на формирование макро- и микроструктурных характеристик облаков, как и в работах [1, 2], проводилось на основе трехмерной нестационарной модели с детальным учетом процессов термогидродинамики и микрофизики. 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 $\Delta T=1-4^\circ\text{C}$. В качестве входных данных модели облака использовались результаты аэрологического зондирования атмосферы (аэропорт Минеральные Воды (08.15.2021)). Исследования проводились путем сравнения параметров исходного облака с параметрами модельных облаков, соответствующих различным вариантам содержания аэрозольных частиц в атмосфере, обладающих льдообразующими свойствами. Расчеты проводились для различных интенсивностей образования ледяных частиц в облаке, полученных путем варьирования скорости образования кристаллов в модели облака [1]:

$$I_2(\vec{r}, m, t) = \frac{\alpha(q_e(\vec{r}) - q_n(\vec{r})) \cdot \psi_1(\vec{r}, m)}{q_w(\psi_1)},$$

где $q_e(\vec{r})$ – влажность воздуха и $q_n(\vec{r})$ – влажность насыщенного водяного пара в точке (\vec{r}) ; α – параметр; $\psi_1(\vec{r}, m)$ – распределение по массам кристаллов в той же точке; $q_w(\psi_1)$ – суммарная лёдность заданного распределения ледяных частиц, \vec{r} соответствует координатам (x, y, z) .

Таким образом, методика проведения исследований основана на допущении, что интенсивность образования первичных кристаллов в облаках определяется содержанием аэрозольных частиц в атмосфере, которые могут сработать как ядра сублимации. В дальнейшем они могут сыграть роль ядер замерзания при взаимодействии с каплями. Интенсивность образования кристаллов менялась путем варьирования параметра α в предыдущем выражении.

Остановимся на результатах расчетов развития облака, соответствующего данным зондирования атмосферы (исходного облака). Максимальные значения параметров облака и высоты над поверхностью земли, на которых они расположены, получились равными: водность $3,10 \text{ г/м}^3$, $H=7,35 \text{ км}$; лёдность $3,48 \text{ г/м}^3$, $H=9,63 \text{ км}$; суммарная водность и лёдность $3,48 \text{ г/м}^3$, $H=9,63 \text{ км}$; вертикальная скорость $16,9 (-14,3) \text{ м/с}$, $H=5,78 (10,5) \text{ км}$; коэффициент турбулентности $1262,5 \text{ м}^2/\text{с}$, $H=0,350 \text{ км}$; отражаемость (3,2 см) $20,7 \text{ дБZ}$, $H=9,63 \text{ км}$.

На рис. 1 приведена изоповерхность вертикальной составляющей скорости восходящих воздушных потоков в облаке (10,0 м/с) на фоне изолиний различных ее значений на 20-й минуте развития облака.

Значения таких параметров облака, как максимальные скорости восходящих и нисходящих потоков воздуха, а также высоты, на которых они расположены, были приведены выше. На рисунке можно заметить, что структура поля воздушных потоков в облаке носит достаточно сложный характер. Что касается положения максимальной скорости восходящих потоков воздуха над поверхностью земли, то наблюдалось незначительное уменьшение высоты, на которой она располо-

жена, в случае нисходящих потоков наблюдалась обратная тенденция: увеличение высоты над поверхностью земли, на которой расположена максимальное значение скорости нисходящих воздушных потоков.

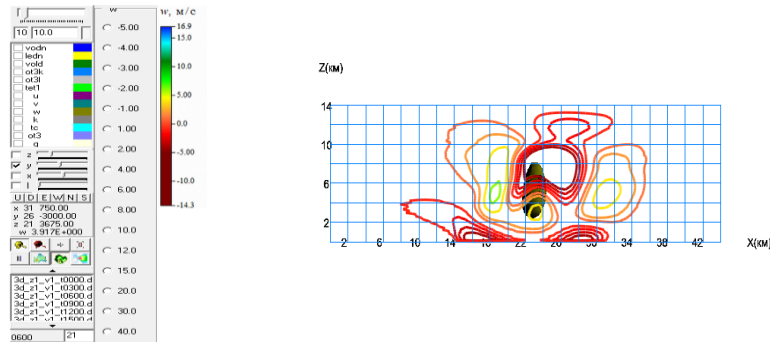
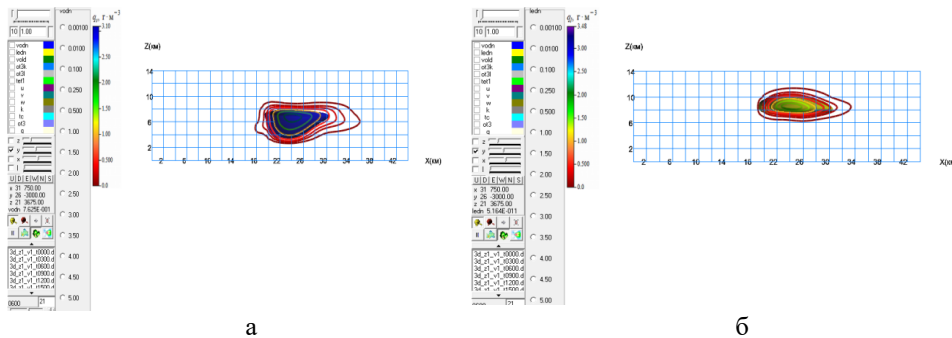


Рис. 1. Изоповерхность вертикальной составляющей скорости 10,0 м/с на фоне изолиний различных ее значений в вертикальной плоскости на 20-й минуте

На рис. 2,а,б приводятся изоповерхности водности ($1,0 \text{ г/м}^3$) и лёдности ($1,0 \text{ г/м}^3$) в вертикальной плоскости, проходящей через середину облака, на 20-й минуте развития облака соответственно на фоне изолиний водности и лёдности.

Сравнение рис. 2,а,б показывает, что объём области, ограниченной изоповерхностью водности, в рассматриваемый момент времени больше объема области, ограниченной изоповерхностью лёдности. Отметим еще, что эти области пересекаются: нижняя граница первой области и верхняя граница второй не находятся на одном уровне. Это указывает на то, что, находясь в зоне восходящих воздушных потоков, капли и кристаллы интенсивно взаимодействуют между собой: с нижних слоев облака переохлажденные капли поступают в зону локализации кристаллов, то есть рост кристаллов происходит за счет захвата капель.



а

б

Рис. 2. Изоповерхности водности $1,0 \text{ г/м}^3$ и лёдности $1,0 \text{ г/м}^3$ соответственно на фоне изолиний водности и лёдности в вертикальной плоскости на 20-й минуте

Результаты расчетов максимальных значений параметров облака и их положения над поверхностью земли на 30-й минуте его развития приведены ниже: водность $0,943 \text{ г/м}^3$, $H=3,67 \text{ км}$; лёдность $6,18 \text{ г/м}^3$, $H=2,80 \text{ км}$; суммарная водность и лёдность $6,52 \text{ г/м}^3$, $H=2,63 \text{ км}$; вертикальная скорость $7,27(-9,06) \text{ м/с}$, $H=3,67(0,175) \text{ км}$; коэффициент турбулентности $1465,2 \text{ м}^2/\text{с}$, $H=0,350 \text{ км}$; отражаемость (3,2 см): $61,7 \text{ д БЗ}$, $H=2,10 \text{ км}$.

Сравнение результатов расчетов этих параметров в различные моменты времени показало, что с течением времени, примерно до 20-й минуты развития облака, имело место увеличение их значений, а также расширение областей, охваченных вертикальными движениями воздуха.

Сравнение результатов расчетов максимальных значений параметров облака на 20-й и 30-й минутах его развития показывает, что на 30-й минуте развития облака наблюдается заметное уменьшение максимального значения влажности и некоторых других параметров облака, максимальное значение влажности, например, равно $0,943 \text{ г/м}^3$. Это свидетельствует о том, что развитие облака прекратилось.

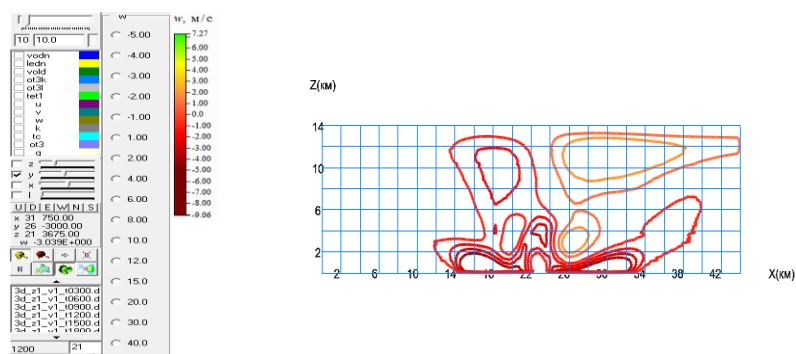


Рис. 3. Изоповерхность вертикальной составляющей скорости $10,0 \text{ м/с}$ на фоне изолиний вертикальной составляющей скорости в вертикальной плоскости на 30-й минуте

На рис. 3 приводятся изолинии вертикальной составляющей скорости воздуха в облаке. Сравнение данного рисунка с рис. 1 показывает, что изоповерхность данного параметра, соответствующая значению скорости $10,0 \text{ м/с}$ на рисунке 3 отсутствует, что связано с тем, что максимальное значение данного параметра в рассматриваемый момент времени равно $7,27 (-9,06) \text{ м/с}$, то есть оно меньше значения $10,0 \text{ м/с}$, для которого строилась изоповерхность.

Значения таких параметров облака, как максимальная скорость восходящих потоков воздуха и высота над поверхностью земли, на которой находится данный параметр, изменились в сторону уменьшения: с $16,9 \text{ м/с}$ до $7,27 \text{ м/с}$ в случае восходящих потоков воздуха и с $-14,3 \text{ м/с}$ до $-9,06 \text{ м/с}$ в случае нисходящих потоков.

Что касается максимального значения ледности в облаке, то в рассматриваемый момент времени она стала равна $6,18 \text{ г/м}^3$, то есть имеет место заметное увеличение данного параметра (с $3,48 \text{ г/м}^3$ до $6,18 \text{ г/м}^3$), а высота над поверхностью земли, на которой она расположена, наоборот, уменьшилась с $H=9,63 \text{ км}$ до $2,80 \text{ км}$. Также имеет место заметное увеличение объема зоны локализации ледяных частиц в облаке. Отметим еще, что изолинии влажности и ледности в рассматриваемый момент времени достигают поверхности земли, что говорит о том, что из облака выпадают жидкие и твердые осадки.

Такие же расчеты были проведены и для момента времени, равного $t=40 \text{ мин}$. Не останавливаясь подробно на результатах расчетов, отметим, что и в этот момент времени продолжалось уменьшение параметров облака. Это указывает на то, что облако постепенно прекращает свое существование.

Остановимся на результатах расчетов параметров модельного облака, которое отличается от исходного облака большей интенсивностью процессов образования первичных кристаллов.

По результатам расчетов, максимальные значения параметров облака и их положения над поверхностью земли на 20-й минуте его развития оказались равными: водность $3,07 \text{ г/м}^3$, $H=7,18 \text{ км}$; лёдность $3,80 \text{ г/м}^3$, $H=9,80 \text{ км}$; суммарная водность и лёдность $3,80 \text{ г/м}^3$, $H=9,80 \text{ км}$; вертикальная скорость воздуха в облаке $17,0 (-14,3) \text{ м/с}$, $H=5,78 (10,5) \text{ км}$; коэффициент турбулентности $1262,6 \text{ м}^2/\text{с}$, $H=0,350 \text{ км}$; отражаемость (3,2 см) $15,5 \text{ дБЗ}$, $H=9,63 \text{ км}$.

Сравнение максимальных значений параметров исходного и модельного облаков показывает, что увеличение интенсивности образования кристаллов в модельном облаке привело к некоторому снижению максимального значения водности при одновременном увеличении лёдности. Таким же образом в модельном облаке наблюдается увеличение более быстрыми темпами максимальной суммарной водности и лёдности. Причина такого поведения этих параметров, по нашему мнению, заключается в том, что появление дополнительных кристаллов в модельном облаке ухудшило условия роста капель из-за ограниченности водяного пара.

По результатам расчетов, структура поля вертикальной составляющей скорости воздушных потоков в облаке носит достаточно сложный характер, кроме этого, структуры полей данного параметра в исходном и модельном облаках практически одинаковы. Это указывает на то, что увеличение интенсивности образования ледяных кристаллов и связанные с ним изменения в микроструктуре модельного облака заметно не повлияли на формирование поля вертикальной составляющей скорости воздушных потоков в рассматриваемый момент времени.

На рис. 4 приведены изоповерхности водности $1,0 \text{ г/м}^3$ и лёдности $1,0 \text{ г/м}^3$ на фоне изолиний данного же параметра на 20-й минуте развития модельного облака.

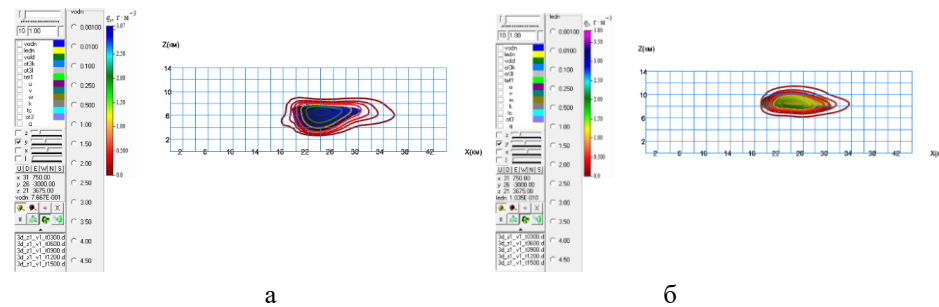


Рис. 4. Изоповерхности водности $1,0 \text{ г/м}^3$ (а) и лёдности $1,0 \text{ г/м}^3$ (б) на фоне изолиний водности и лёдности соответственно в вертикальной плоскости на 20-й минуте развития модельного облака

Таким же образом сравнение рис. 2 и 4 показывает, что, несмотря на некоторое уменьшение водности в модельном облаке, объем области, ограниченной изоповерхностью водности $1,0 \text{ г/м}^3$, практически не изменился. В случае лёдности в модельном облаке наблюдается увеличение как максимального ее значения, так и объема области, ограниченной изоповерхностью данного параметра.

Максимальные значения параметров модельного облака и значения высот над поверхностью земли, на которых они расположены, на 30-й минуте его развития получились равными: водность $0,935 \text{ г/м}^3$, $H=3,67 \text{ км}$; лёдность $6,43 \text{ г/м}^3$, $H=2,97 \text{ км}$; суммарная водность и лёдность $6,77 \text{ г/м}^3$, $H=2,80 \text{ км}$; вертикальная скорость воздуха в облаке и ее положение: $7,27 (-9,06) \text{ м/с}$, $H=3,67 (0,175) \text{ км}$; коэффициент турбулентности $1465,1 \text{ м}^2/\text{с}$, $H=0,350 \text{ км}$; отражаемость (3,2см) $62,1 \text{ дБЗ}$, $H=1,92 \text{ км}$.

По сравнению с предыдущим моментом времени максимальные значения некоторых параметров облака заметно изменились. Максимальное значение водности, например, уменьшилось более чем в три раза. В то же время максимальное

значение лёдности увеличилась примерно в 1,7 раз, максимальное значение вертикальной скорости воздуха уменьшилась с 17,0 м/с до 7,27 м/с. Изменения претерпели и другие параметры облака.

Сравнение полученных значений параметров с значениями параметров исходного облака на 30-й минуте развития показывает, что значение максимальной водности в модельном облаке, хотя и незначительно, но меньше, чем в исходном облаке: $0,935 \text{ г/м}^3$ и $0,943 \text{ г/м}^3$ соответственно. Что касается максимальных значений таких параметров, как лёдность и суммарная водность - лёдность, то они выше в модельном облаке, чем в исходном: соответственно $6,43 \text{ г/м}^3$ и $6,18 \text{ г/м}^3$ для лёдности и $6,77 \text{ г/м}^3$ и $6,52 \text{ г/м}^3$ для суммарной водности - лёдности. Максимальные значения остальных параметров получились одинаковыми или близкими.

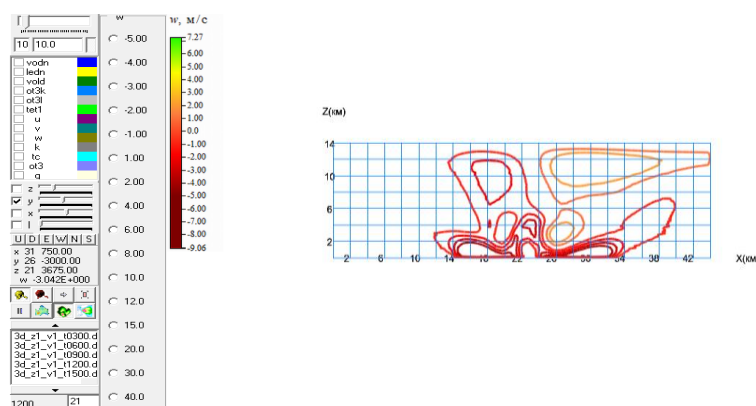


Рис. 5. Изоповерхность вертикальной составляющей скорости 10,0 м/с на фоне изолиний вертикальной составляющей скорости в вертикальной плоскости на 30-й минуте

На рис. 5 приводятся изолинии вертикальной составляющей скорости воздушных потоков в модельном облаке на 30-й минуте развития облака. Максимальные значения скорости воздуха в восходящих и нисходящих потоках в облаке, а также положения этих параметров в облаке равны: $7,27(-9,06) \text{ м/с}$, $H=3,67(0,175) \text{ км}$. В данный момент времени, как и в исходном облаке, изоповерхность вертикальной составляющей скорости 10,0 м/с в облаке отсутствует.

Сравнение рис. 3 и 5 показывает, что изменение интенсивности образования кристаллов в облаке не оказало заметного влияния как на структуру поля вертикальных воздушных потоков, так и на максимальные значения скоростей вертикальных движений воздуха.

Такие же расчеты проводились и для $t=40$ мин развития облака. Не останавливаясь подробно на результатах расчетов, отметим, что, как и в случае исходного облака, примерно с этого момента наблюдается уменьшение параметров модельного облака.

Заключение. В работе в краткой форме затронуто современное состояние физики облаков и активных воздействий на них. Отмечено, что современный этап ее развития является переходным: происходит переход от этапа исследования "элементарных" процессов в облаках к этапу исследования облаков в целом с учетом их системных свойств. Изложены основные направления развития данного научного направления на следующем этапе его развития, к которым относится исследование роли системных свойств облаков в формировании их макро- и микроструктурных характеристик.

Результаты моделирования образования и развития конвективных облаков для различных вариантов содержания в атмосфере аэрозольных частиц, обладающих льдообразующими свойствами, показали, что данная характеристика атмосферы является одним из механизмов, посредством которого осуществляется взаимодействие облаков с окружающей их атмосферой, а также одним факторов, влияющих на формирование макро- и микроструктурных характеристик облаков.

По результатам расчетов, незначительное увеличение содержания отмеченных аэрозольных частиц в атмосфере привело к увеличению таких параметров облака, как максимальная лёдность, максимальная суммарная водность и лёдность при одновременном уменьшении максимальной водности в облаке. В то же время оно практически не повлияло на его макроструктурные характеристики.

В дальнейшем с целью получения более детальных данных о роли аэрозольного состава атмосферы в формировании макро- и микроструктурных характеристик конвективных облаков и активного воздействия на них планируется продолжение разработки эффективных методологий моделирования облачных процессов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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. Ashabokov B.A., Fedchenko L.M., Shapovalov A.V., Kalov K.M., Kalov R.K., Tashilova A.A. and Shapovalov V.A. Mathematical Modeling of the Influence of the Wind Field Structure in the Atmosphere on the Cloud Formation Processes // Atmospheric and Climate Sciences. – 2018. – 8. – P. 84-96.
3. Месарович М., Такахага Я. Общая теория систем: математические основы. – М.: Мир, 1978. – 381 с.
4. Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Затевахин М.А., Игнатъев А.А., Морозов В.Н., Пастушков Р.С. Описание базовой численной нестационарной трехмерной модели конвективного облака // Тр. Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – Вып. 282. – СПб.: Гидрометеоздат, 2016. – С. 45-91.
5. Ковальчук А.Н. О влиянии ветрового сдвига на выпадение града // Тр. Высокотгорного геофизического института. – Вып. 14. – М.: Гидрометеоздат, 1969. – С. 39-48.
6. Мальбахова Н.М. Взаимосвязь структуры градовых облаков с вертикальной структурой ветра в атмосфере // Тр. Высокотгорного геофизического института. – Вып. 80. – М.: Гидрометеоздат, 1990. – С. 99-106.
7. 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.
8. Пастушков Р.С. Численное моделирование взаимодействия конвективных облаков с окружающей их атмосферой // Тр. Центральной аэрологической обсерватории. – Вып. 108. – М.: Гидрометеоздат, 1972. – С. 93-97.
9. Пастушков Р.С. О развитии кучевых облаков в атмосфере с вертикальным сдвигом ветра // Метеорология и гидрология. – 1969. – № 4. – С. 26-41.
10. Федченко Л.М., Гораль Г.Г., Беленцова В.А., Мальбахова Н.М. Опасные конвективные явления и их прогноз в условиях сложного рельефа. – М.: Гидрометеоздат. 1991. – 425 с.
11. Tompkins A.M. Organization of Tropical Convection in Low Vertical Wind Shears: The Role of Cold Pools // Journal of the atmospheric sciences. – 2001. – Vol. 58, No. 13. – P. 1650-1672.
12. Tompkins A.M., and Semie A.G. Organization of Tropical Convection in Low Vertical Wind Shears: Role of Updraft Entrainment // Journal Adv. Model. Earth .Syst. – 2017. – 9. – P. 1046-1068.
13. Владимиров С.А., Пастушков Р.С. Комплексный метод активных воздействий на конвективные облака с целью регулирования осадков. Трехмерное численное моделирование // Тр. Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – Вып. 582. – СПб.: Гидрометеоздат, 2016. – С. 116-127.
14. Пастушков Р.С. Модель активных воздействий на конвективные облака льдообразующими аэрозолями // Тр. Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – Вып. 582. – СПб.: Гидрометеоздат, 2016. – С.128-157.

15. Zhang S., Wang M., Ghan S. J., Ding A., Wang H., Zhang K., Neubauer D., Lohmann U., Ferrachat S., Takeamura T., Gettelman A., Morrison H., Lee Y., Shindell D.T., Partridge D. G., Stier P., Kipling Z., Fu C. On the characteristics of aerosol indirect effect based on dynamic regimes in global climate models // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2016. – Vol. 16. – P. 2765-2783.
16. Miltenberger A.K. et al. Aerosol-cloud interactions in mixed-phase convective clouds–Part 2: Meteorological ensemble // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2018. – Vol. 18, No. 14. – P. 0593-10613.
17. Altaratz O., Koren I., Remer L.A., Hirsch E. Review: Cloud invigoration by aerosols – coupling between microphysics and dynamics // *Atmospheric Research*. – 2014. – 140-141. – P. 38-60.
18. Fan J., Wang Y., Rosenfeld D., Liu X. Review of Aerosol-Cloud Interactions: Mechanisms, Significance, and Challenges // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 2016. – 73. – P. 4221-4252.
19. Lee S.S. Effect of Aerosol on Circulations and Precipitation in Deep Convective Clouds // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 2012. – 69. – P. 1957-1974.
20. Tao W.K., Chen J.-P., Li Z., Wang C., Zhang C. Impact of aerosols on convective clouds and precipitation // *Reviews of Geophysics*. – 2012. – Vol. 50, RG2001. – 62 p.

REFERENCES

1. Ashabokov B.A., Fedchenko L.M., Shapovalov A.V., Shapovalov V.A. Fizika oblakov i aktivnykh vozdeystviy na nikh [Physics of clouds and active influences on them]. Nal'chik; Pechatnyy dvor, 2017, 240 p.
2. Ashabokov B.A., Fedchenko L.M., Shapovalov A.V., Kalov K.M., Kalov R.K., Tashilova A.A. and Shapovalov V.A. Mathematical Modeling of the Influence of the Wind Field Structure in the Atmosphere on the Cloud Formation Processes, *Atmospheric and Climate Sciences*, 2018, 8, pp. 84-96.
3. Mesarovich M., Takakhara Ya. Obschchaya teoriya sistem: matematicheskie osnovy [General theory of systems: mathematical foundations]. Moscow: Mir, 1978, 381 p.
4. Veremey N.E., Dovgalyuk Yu.A., Zatevakhin M.A., Ignat'ev A.A., Morozov V.N., Pastushkov R.S. Opisanie bazovoy chislennoy nestatsionarnoy trekhmernoy modeli konvektivnogo oblaka [Description of the basic numerical non-stationary three-dimensional model of a convective cloud], *Tr. Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voeikova* [Proceedings of the Main Geophysical Observatory. A.I. Voeikova]. Vol. 282. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2016, pp. 45-91.
5. Koval'chuk A.N. O vliyaniy vetrovogo sdviga na vypadenie grada [On the effect of wind shear on hail], *Tr. Vysokogornogo geofizicheskogo instituta* [Proceedings of the High Mountain Geophysical Institute], Vol. 14. Moscow: Gidrometeoizdat, 1969, pp. 39-48.
6. Mal'bakhova N.M. Vzaimosvyaz' struktury gradovykh oblakov s vertikal'noy strukturoy vetra v atmosfere [Relationship between the structure of hail clouds and the vertical structure of the wind in the atmosphere], *Tr. Vysokogornogo geofizicheskogo instituta* [Proceedings of the High Mountain Geophysical Institute], Vol. 80. Moscow: Gidrometeoizdat, 1990, pp. 99-106.
7. 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 in the development of cumulus clouds], *Dinamika kuchevykh oblakov* [Dynamics of cumulus clouds]. Moscow: Mir, 1964, pp 187-201.
8. Pastushkov R.S. Chislennoe modelirovanie vzaimodeystviya konvektivnykh oblakov s okruzhayushchey ikh atmosferoy [Numerical modeling of the interaction of convective clouds with their surrounding atmosphere], *Tr. Tsentral'noy aerologicheskoy observatorii* [Proceedings of the Central Aerological Observatory], Vol. 108. Moscow: Gidrometeoizdat, 1972, pp. 93-97.
9. Pastushkov R.S. O razvitiy kuchevykh oblakov v atmosfere s vertikal'nym sdvigom vetra [On the development of cumulus clouds in an atmosphere with vertical wind shear], *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology], 1969, No. 4, pp. 26-41.
10. Fedchenko L.M., Goral' G.G., Belentsova V.A., Mal'bakhova N.M. Opasnye konvektivnye yavleniya i ikh prognoz v usloviyakh slozhnogo rel'efa [Dangerous convective phenomena and their forecast in conditions of complex relief]. Moscow: Gidrometeoizdat. 1991, 425 p.
11. Tompkins A.M. Organization of Tropical Convection in Low Vertical Wind Shears: The Role of Cold Pools, *Journal of the atmospheric sciences*, 2001, Vol. 58, No. 13, pp. 1650-1672.
12. Tompkins A.M., and Semie A.G. Organization of Tropical Convection in Low Vertical Wind Shears: Role of Updraft Entrainment, *Journal Adv. Model. Earth .Syst.*, 2017, 9, pp. 1046-1068.

13. *Vladimirov S.A., Pastushkov R.S.* Kompleksnyy metod aktivnykh vozdeystviy na konvektivnye oblaka s tsel'yu regulirovaniya osadkov. Trekhmernoe chislennoe modelirovanie [A complex method of active influences on convective clouds in order to regulate precipitation. Three-dimensional numerical modeling], *Tr. Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voeykova* [Proceedings of the Main Geophysical Observatory. A.I. Voeykova], Vol. 582. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2016, pp. 116-127.
14. *Pastushkov R.S.* Model' aktivnykh vozdeystviy na konvektivnye oblaka l'dobrazuyushchimi aerolyami [Model of active influences on convective clouds by ice-forming aerosols], *Tr. Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voeykova* [Proceedings of the Main Geophysical Observatory. A.I. Voeykova], Vol. 582. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2016, pp. 128-157.
15. *Zhang S., Wang M., Ghan S. J., Ding A., Wang H., Zhang K., Neubauer D., Lohmann U., Ferrachat S., Takeamura T., Gettelman A., Morrison H., Lee Y., Shindell D.T., Partridge D. G., Stier P., Kipling Z., Fu C.* On the characteristics of aerosol indirect effect based on dynamic regimes in global climate models, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, Vol. 16, pp. 2765-2783.
16. *Miltenberger A.K. et al.* Aerosol-cloud interactions in mixed-phase convective clouds—Part 2: Meteorological ensemble, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, Vol. 18, No. 14, pp. 0593-10613.
17. *Altaratz O., Koren I., Remer L.A., Hirsch E.* Review: Cloud invigoration by aerosols – coupling between microphysics and dynamics, *Atmospheric Research*, 2014, 140-141, pp. 38-60.
18. *Fan J., Wang Y., Rosenfeld D., Liu X.* Review of Aerosol-Cloud Interactions: Mechanisms, Significance, and Challenges, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2016, 73, pp. 4221-4252.
19. *Lee S.S.* Effect of Aerosol on Circulations and Precipitation in Deep Convective Clouds, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2012, 69, pp. 1957-1974.
20. *Tao W.K., Chen J.-P., Li Z., Wang C., Zhang C.* Impact of aerosols on convective clouds and precipitation, *Reviews of Geophysics*, 2012, Vol. 50, RG2001, 62 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Петров.

Ашабоков Борис Азреталиевич – Высокогорный геофизический институт; e-mail: ashabokov.boris@mail.ru; г. Нальчик, Россия; тел.: 88662404841; д.ф.-м.н.; профессор; зав. отделом физики облаков; зав. отделом в «ИИПРУ КБНЦ РАН».

Шаповалов Виталий Александрович – e-mail: vet555_83@mail.ru; тел.: 89187855350; д.ф.-м.н.; зав. лабораторией математического моделирования.

Шериева Марианна Азреталиевна – e-mail: ryer16@yandex.ru; м.н.с.

Лесев Вадим Николаевич – Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х.М. Бербекова; e-mail: pr_ur@kbsu.ru; г. Нальчик, Россия; к.ф.-м.н.; доцент; и.о. первого проректора.

Куповых Геннадий Владимирович – Южный федеральный университет; e-mail: kupovyx@sfd.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89289543642; д.ф.-м.н.; профессор; зав. кафедрой высшей математики.

Ashabokov Boris Azretalievich – High Mountain Geophysical Institute; e-mail: ashabokov.boris@mail.ru; Nalchik, Russia; phone: 88662404841; dr. of phys. and math. sc.; professor; head of the department of cloud physics.

Shapovalov Vitaly Alexandrovich – e-mail: vet555_83@mail.ru; phone: +79187855350; dr. of phys. and math. sc.; head of the laboratory of mathematical modeling.

Sherieva Marianna Azretalievna – e-mail: ryer16@yandex.ru; junior researcher.

Lesev Vadim Nikolaevich – Kh.M. Berbekov Kabardino-Balkarian State University; e-mail: pr_ur@kbsu.ru; Nalchik, Russia; cand. of phys. and math. sc.; associate professor; acting first vice-rector.

Kupovyh Gennady Vladimirovich – Southern Federal University; e-mail: kupovych@sfd.ru; Taganrog, Russia; phone: +79289543642; dr. of phys. and math. sc.; professor; head of the department of higher mathematics.