



Научная статья

УДК 551.51

<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2026.2.4>

## СОСТОЯНИЕ И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ФИЗИКИ ОБЛАКОВ И АКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Борис Азреталиевич Ашабоков<sup>1</sup>,  
Игорь Сергеевич Афанасьев<sup>2\*</sup>,  
Зухура Сайдуллаховна Гаева<sup>3</sup>,  
Виталий Александрович Шаповалов<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Высокогорный геофизический институт (д. 2, пр. Ленина, Нальчик, 360030, Российская Федерация)

<sup>1</sup> Кабардино-Балкарский научный центр РАН (д. 37А, ул. И. Арманд, Нальчик, 360000, Российская Федерация)

<sup>4</sup> Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова (д. 173, ул. Чернышевского, Нальчик, 360004, Российская Федерация)

<sup>1</sup> [ashabokov.boris@mail.ru](mailto:ashabokov.boris@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-2889-0864>

<sup>2</sup> [afanasevigor278@gmail.com](mailto:afanasevigor278@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0003-4490-6659>

<sup>3</sup> [gzs@mail.ru](mailto:gzs@mail.ru); <https://orcid.org/0009-0003-4305-0809>

<sup>4</sup> [vet555\\_83@mail.ru](mailto:vet555_83@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-9701-6820>

\* Автор, ответственный за переписку

### Аннотация.

Объектом исследования является состояние физики конвективных облаков и активных воздействий. Отмечено, что темпы развития данного научного направления существенно снизились с конца 80-х годов. Традиционные методы анализа, фокусирующиеся на состоянии исследований «элементарных» процессов в облаках, не позволили выявить причины замедления его развития. По результатам анализа состояния физики конвективных облаков и активных воздействий с точки зрения этапов развития систем удалось установить эти причины. Оказалось, что они заключаются в том, что настоящий период времени является переходным для данного научного направления. Он состоит в переходе от изучения «элементарных» процессов к изучению облаков как целостных систем. Цель работы – анализ основных направлений развития физики конвективных облаков и активных воздействий, формулировка задач этих направлений, анализ методологий моделирования роли системных свойств в формировании облаков. Обсуждаются некоторые результаты исследований роли таких системных свойств, как взаимодействие облаков с окружающей атмосферой и взаимодействие процессов в облаках в формировании их структуры. Рассмотрены про-

веденные ранее исследования, основанные на использовании трехмерной нестационарной модели и двумерной модели микрофизических процессов в градовых облаках с заданной термогидродинамикой. Установлено, что процессы облакообразования наиболее чувствительно к вариациям скорости ветра в нижних слоях тропосферы. Выявлено, что рост града происходит в температурном интервале  $-10^{\circ}\text{C} \dots -25^{\circ}\text{C}$ , а процессы осадкообразования носят циклический характер. Предложен алгоритм разработки метода активного воздействия на градовые облака с учетом их синергетических свойств.

**Ключевые слова:** физика облаков, численное моделирование, микрофизика облаков, системные свойства, бифуркация, активные воздействия.

**Для цитирования:** Состояние и основные направления исследований физики облаков и активных воздействий / Б. А. Ашабоков, И. С. Афанасьев, З.С. Гаева, и др. // Наука. Инновации. Технологии. 2026. № 2. С. 71–90. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2026.2.4>

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 12.04.2026;  
одобрена после рецензирования 15.06.2026;  
принята к публикации 25.06.2026.

**1.6.18. Atmospheric and climate sciences  
(physical and mathematical sciences)**  
Research article

**Current state and main research trends in cloud  
physics and active effects**

**Boris A. Ashabokov<sup>1</sup>**  
**Igor S. Afanasyev<sup>2\*</sup>**  
**Zukhura S. Gaeva<sup>3</sup>**  
**Vitaly A. Shapovalov<sup>4</sup>**

<sup>1,2,3,4</sup> High Mountain Geophysical Institute (2, Lenin Ave., Nalchik, 360030, Russian Federation)

<sup>1</sup> Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (37A. Armand St., Nalchik, 360000, Russian Federation)

<sup>4</sup> Kabardino-Balkarian State University named after Kh. M. Berbekov (173, Chernyshevskogo St., Nalchik, 360004, Russian Federation)

<sup>1</sup> afanasevigor278@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-4490-6659>

<sup>2</sup> ashabokov.boris@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2889-0864>

<sup>3</sup> gzs@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0003-4305-0809>

<sup>4</sup> vet555\_83@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9701-6820>

\* Corresponding author

#### Abstract.

The subject of the study is the current state of the physics of convective clouds and weather modification. It is noted that the pace of development in this scientific field has significantly declined since the late 1980s. Traditional analytical approaches, focusing on the state of research into "elementary" cloud processes, failed to identify the reasons for this slowdown. By analyzing the state of convective cloud physics and weather modification from the perspective of system development stages, these reasons have been established. It has been found that the present period represents a transitional phase for this scientific field, characterized by a shift from studying "elementary" processes toward investigating clouds as integrated systems. The study analyzes the main trends in the physics of convective clouds and weather modification, specifies the objectives of these directions, and examines methodologies for modeling the role of systemic properties in cloud formation. Some research results concerning the role of such systemic properties as cloud-environment interaction and internal cloud process interactions in shaping cloud structure are discussed. Previously conducted studies based on a three-dimensional non-stationary model and a two-dimensional microphysical model of hail clouds with prescribed thermohydrodynamics are reviewed. It has been established that cloud formation processes are most sensitive to wind speed variations in the lower troposphere. It has been revealed that hail growth occurs within the temperature range of  $-10^{\circ}\text{C}$  to  $-25^{\circ}\text{C}$ , and precipitation processes exhibit a cyclic character. An algorithm for developing weather modification techniques for hail clouds, taking into account their synergistic properties, is proposed.

#### Keywords:

cloud physics, numerical modeling, cloud microphysics, systemic properties, bifurcation, weather modification.

#### For citation:

Ashabokov BA, Afanasyev IS, Gaeva ZS, Shapovalov VA. Current state and main research trends in cloud physics and active effects. *Science. Innovations. Technologies.* 2026;(2):71–90. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2026.2.4>

Conflict of interest: the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 12.04.2025;  
approved after reviewing 15.06.2025;  
accepted for publication 25.06.2025.

### **Введение**

Наиболее продуктивным периодом для физики облаков и активных воздействий стала вторая половина XX века. В сжатые сроки сформировалась методологическая база, позволяющая изучать механизмы образования облаков и закономерности формирования их макро- и микроструктуры [1]. Накоплен массив данных натурных наблюдений за эволюцией конвективных облаков как в естественных условиях, так и при активном воздействии. Создан класс численных моделей, включая трехмерные нестационарные с подробным учетом микрофизики [1–5].

Однако достигнутые успехи не исключают неоднозначности в оценке текущей ситуации. Начиная с конца 1980-х годов, стало заметно существенное замедление темпов развития физики облаков и активных воздействий. Анализ состояния данной области за разные временные отрезки (1980-е годы, начало 1990-х, 2010 г.) подтверждает отсутствие качественных сдвигов примерно с середины 1980-х годов. Принципиально новые результаты, способных углубить существующие представления, за указанный период не были получены.

Неоднозначная ситуация сохраняется и в сфере активных воздействий на конвективную облачность. Реализуемые подходы базируются либо на субъективных концепциях авторов относительно механизмов осадкообразования, либо на моделировании, не учитывающем синергетические свойства облаков как нелинейных динамических систем [6–7]. В сложившихся условиях подобные методы не обладают должной научной обоснованностью и надежностью. Это актуализирует задачу создания новых методологий и строго обоснованных подходов к активным воздействиям.

Преодоление негативных тенденций в развитии физики облаков требует выявления причин их возникновения. Предшествующие исследования [1–3, 8], посвященные анализу состояния данного научного направления, фокусировались преимущественно на степени изученности микрофизических процессов в контексте их формализации с целью включения их в численные модели облаков. В работе [3] анализ выполнен с позиций этапов, методологий и инструментов изучения сложных систем.

Текущий этап правомерно считать переходным: акцент смещается с исследования «элементарных» процессов на рассмотрение облаков как сложных динамических систем. Ключевой целью выступает выявление закономерностей формирования макро- и микроструктуры облаков. Дальнейший прогресс физики облаков будет обусловлен постановкой и решением качественно новых задач посредством соответствующих моделей и методологий. Развитие технологий активных воздействий требует разработки методов с учетом синергетических свойств облаков.

В статье приводятся итоги анализа текущего состояния физики облаков и активных воздействий, сформулированы приоритетные направления ее развития и соответствующие им задачи. Обсуждаются результаты моделирования влияния системных свойств на структуру конвективных облаков, формулируются задачи, возникающие на пути создания метода активного воздействия на градовые процессы.

### **Материалы и методы исследований**

Методология исследования сложных систем вне зависимости от их природы базируется на двух фундаментальных подходах — декомпозиции и агрегировании [9]. Применительно к конвективным облакам на этапе декомпозиции из общей системы были выделены «элементарные» микрофизические процессы, такие как процессы образования и роста капель и кристаллов, а также их электризации. Изучением этих процессов методами лабораторного моделирования занималась физика облаков во второй половине прошлого столетия. Можно отметить работы [10–11], посвященные данной проблеме. К настоящему времени их состояние можно охарактеризовать таким образом, что многие из них, преимущественно процессы с участием капель, удалось исследовать и формализовать. Что касается процессов образования и роста кристаллов, а также электризации частиц в облаках, то исследования в направлениях изучения и формализации этих процессов продолжаются.

Важно отметить, что агрегирование «элементарных» процессов в облаках возможно в рамках численных моделей, что делает численное моделирование основным методом исследований.

В краткой форме остановимся на методологиях изучения роли системных в процессах облакообразования.

1. *Исследование влияния взаимодействия облаков с окружающей атмосферой на процессы облакообразования.*

В работе [12] применялась методика, основанная на сопоставлении параметров реального и модельных облаков, сформированных при различных вариациях поля ветра в атмосфере. Вычислительные эксперименты базировались на трехмерной нестационарной модели. Исходные параметры задавались на основе данных аэрологического зондирования (метеостанция аэропорта М/Воды). Вычисления выполнялись для двух серий модельных облаков.

2. *Исследование влияния взаимодействия процессов в облаках на формирование структуры облака.*

Проведение исследований в данном направлении сопряжено со значительными методическими трудностями, главная из которых – необходимость разработки специализированных моделей облачной динамики. Прямая оценка вклада отдельных процессов в формирование макро- и микроструктуры затруднена их высокой взаимосвязью [3, 13]. Поэтому в работе реализован подход, основанный на анализе косвенных индикаторов их взаимодействия. Стоит отметить, что деформация термодинамических полей внутри облака относительно фоновых значений является интегральным следствием совместного действия динамических, термодинамических и микрофизических механизмов. Таким образом, изучение влияния данной деформации на формирование микроструктуры облака позволяет косвенно оценить роль взаимодействия процессов в осадкообразовании.

В работе [3] приводятся результаты моделирования влияния деформации температурного поля в облаке на процессы осадкообразования, использовалась двумерная модель микрофизики градовых облаков с заданной термогидродинамикой [3–4, 11]. Детальное описание «элементарных» процессов, а также методики и итоги моделирования приведены в источниках [2–3, 5].

## **Результаты исследований и их обсуждение**

### *1. Анализ состояния физики конвективных облаков.*

Раздел посвящен анализу текущего этапа развития физики облаков, который характеризуется как переходной. Наблюдается фундаментальный сдвиг парадигмы: от детального изучения изолированных «элементарных» процессов к комплексному исследованию облаков как целостных систем с целью выявления закономерностей формирования их макро- и микроструктуры. Сформулированы приоритетные направления исследований нового этапа, определены ключевые задачи и обсуждаются методологические подходы к их решению.

Анализ эволюции методов исследования облаков как сложных систем позволяет выделить три последовательных этапа:

- 1) декомпозиция системы и изучение «элементарных» процессов в облаках;
- 2) агрегирование «элементарных» процессов;
- 3) изучение облаков как целостных объектов для установления закономерностей формирования их макро- и микроструктуры.

Рассмотрим состояние первого этапа. Конвективные облака представляют собой сложную иерархическую систему, элементами второго иерархического уровня которой являются блоки процессов термогидродинамики, микрофизических и электрических процессов. Стоит отметить, что изучение термогидродинамики опиралось на фундаментальные законы термодинамики и гидродинамики, сформулированные еще в XIX веке. Основное внимание на этапе уделялось изучению микрофизических процессов (нуклеация, рост частиц) и механизмов электризации облачных частиц. Изучение этих процессов было основано на лабораторном моделировании.

Анализ результатов этого направления показывает, что, если процессы с участием капель изучены детально и успешно формализованы, то механизмы взаимодействия ледяных кристаллов и атмосферных аэрозолей требуют дальнейшего углубленного исследования. Существенные трудности возникают при формализации

процессов взаимодействия частиц реагентов с облачной средой, что препятствует моделированию активного воздействия. Ситуация с электризацией облачных частиц также остается проблемной: количество изученных и формализованных механизмов ограничено, что не позволяет в полной мере описать электрическую структуру облаков.

Второй этап – агрегирование «элементарных» процессов – развивался параллельно с первым. Как было отмечено, решение данной задачи возможно в рамках численных моделей облаков. К настоящему моменту разработаны модели, на основе которых возможно исследование закономерностей формирования макро- и микроструктуры облаков с учетом отмеченных процессов [2–5].

Таким образом, настоящий период является переходным для физики облаков – происходит переход от этапа изучения «элементарных» процессов к этапу изучения закономерностей формирования их макро- и микроструктуры.

Несмотря на это, завершение исследований недостаточно изученных «элементарных» процессов (активация аэрозолей, рост кристаллов, электризация) остается актуальной задачей. Особенно критичным является изучение взаимодействия реагентов со средой, так как разработка эффективных методов активного воздействия невозможна без детального знания этих механизмов и их корректного учета в численных моделях.

Как отмечалось ранее, главная цель нового этапа развития физики облаков – выявить закономерности формирования их макро- и микроструктуры. Для этого необходимо определить факторы, являющиеся структурообразующими. К ним относят, прежде всего, системные свойства облаков: их взаимодействие с атмосферой и взаимодействие «элементарных» процессов в облаках [3, 12, 13].

Первый фактор связан с иерархичностью системы «атмосфера–облако». Атмосфера является вышестоящей системой по отношению к облаку: именно её состояние диктует условия облакообразования, задавая направления развития и требования к параметрам облака. Таким образом, взаимодействие с окружающей средой выступает фундаментальным структурообразующим элементом. При этом механизмы такого влияния многообразны, и некоторые из них

(например, причины формирования одноячейковых или многоячейковых структур в схожих условиях) до сих пор не имеют полного качественного объяснения.

Также стоит отметить, что взаимодействие физических процессов в облаках приводит к возникновению эмерджентных свойств – качественно новых характеристик, которыми не обладает ни один из отдельных процессов в изоляции [3].

Исходя из этого, формулируются два новых направления исследований:

- исследование роли взаимодействия облаков с окружающей атмосферой в формировании их макро- и микроструктуры;
- исследование роли взаимодействия процессов в облаках в формировании их макро- и микроструктуры.

Задачи, методология и методы решения этих направлений будут рассмотрены далее. В качестве примера приведем результаты численного моделирования, демонстрирующие роль системных свойств в процессах облакообразования.

## 2. *Роль взаимодействия облаков с окружающей атмосферой.*

Анализ результатов численных экспериментов позволяет оценить влияние конфигурации ветрового поля на динамику облакообразования, что представляет собой один из доминирующих механизмов связи облачной системы с внешней средой. На рисунке 1 приведено сравнение двух сценариев: идеализированной модельной структуры ветра (слева) и реальной картины, восстановленной по данным наблюдений (справа).

Реальная структура поля ветра и входные данные модели были получены по результатам аэрологического зондирования атмосферы (аэропорт Минеральные Воды) [12]. Как видно на рисунке, реальная структура поля ветра носит более сложный характер: направление ветра меняется по высоте, в то время как в модельной структуре направление ветра едино на всех высотах. В табли-

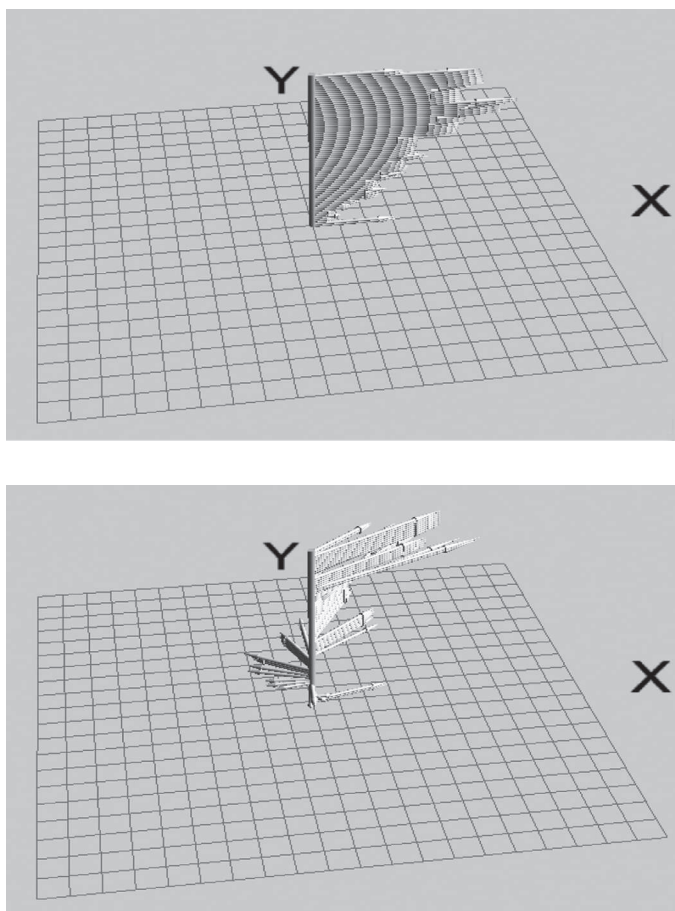


Рис. 1.

**Модельная (слева) и реальная (справа) структура поля ветра в атмосфере.**

Fig. 1. Model (left) and real (right) structure of the wind field in the atmosphere.

це 1 приведены максимальные значения параметров исходного и модельного облаков. В таблице использованы обозначения:  $Q_{max}$ ,  $W_{max}$ ,  $Z_{max}$  – максимальные значения удельной влажности, вертикальной составляющей скорости воздушных потоков и отражаемости,  $HQ_{max}$ ,  $HW_{max}$  и  $HZ_{max}$ -высоты над поверхностью земли, на которых расположены максимальные значения отмеченных параметров.

Можно заметить, что структуры и параметры исходного и модельного облаков заметно различаются: процессы облакообразования носят более интенсивный характер в случае модельной структуры поля ветра в атмосфере, т.е. в случае, когда атмосфера меньше препятствует процессам облакообразования.

Таблица 1. МАКСИМАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБЛАКОВ, СООТВЕТСТВУЮЩИХ РЕАЛЬНОЙ И МОДЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЕ ПОЛЯ ВЕТРА В АТМОСФЕРЕ (02.06.2010 г.)  
Table 1. Maximum values of some cloud parameters corresponding to the real and model structure of the wind field in the atmosphere (June 02,2010)

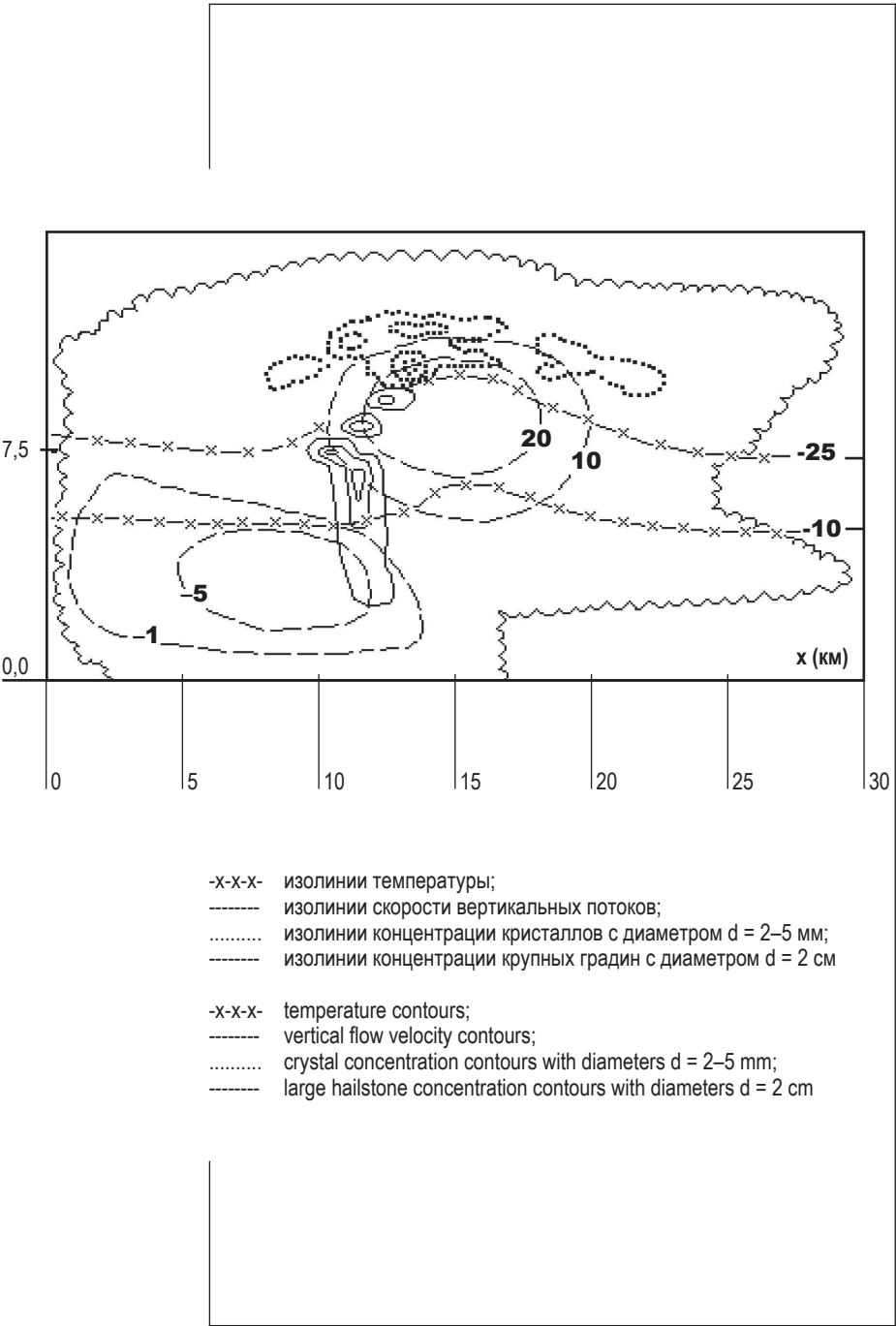
|                              | Реальная структура поля ветра в атмосфере |      |      | Модельная структура поля ветра в атмосфере |      |      |
|------------------------------|-------------------------------------------|------|------|--------------------------------------------|------|------|
| Время, мин                   | 20                                        | 30   | 40   | 20                                         | 30   | 40   |
| $Q_{max}$ , г/м <sup>3</sup> | 6,63                                      | 8,7  | 6,9  | 11,8                                       | 11,1 | 10,9 |
| $HQ_{max}$ , км              | 4,75                                      | 5,25 | 4,5  | 7,0                                        | 6,75 | 6,5  |
| $W_{max}$ , м/с              | 17,9                                      | 12,8 | 7,9  | 44,4                                       | 39,3 | 39,0 |
| $HW_{max}$ , км              | 3,5                                       | 5,0  | 5,0  | 6,5                                        | 7,0  | 6,75 |
| $Z_{max}$ , dBZ              | 37,6                                      | 64,7 | 64,3 | 60,0                                       | 62,8 | 66,6 |
| $HZ_{max}$ , км              | 4,25                                      | 5,25 | 3,75 | 6,5                                        | 6,0  | 5,5  |

Были проведены численные эксперименты, направленные на изучение влияния вариаций скорости ветра при сохранении его направления. Первая серия расчетов предполагала варьирование скорости ветра на 5 % в каждом из высотных интервалов: [0–2 км], [2–4 км], [4–6 км], [6–8 км], [9–12 км]. Для второй серии величина вариации составляла 10 %. Таким образом, каждая серия включала 5 облаков, соответствующих указанным изменениям скорости ветра в заданных слоях атмосферы. Вычислительные эксперименты продемонстрировали повышенную чувствительность процессов облакообразования к изменениям скорости ветра в нижних слоях тропосферы. Вероятно, это обусловлено тем, что рост скорости ветра в приземных слоях интенсифицирует приток теплого и влажного воздуха, способствуя развитию более мощных облачных систем. Соответственно, реакция облака на возмущения скорости ветра ослабевает с увеличением высоты слоя вариации. Начиная с определенного уровня, облака практически не реагируют на изменения скорости ветра в тропосфере.

### 3. *Роль взаимодействия процессов в облаке в формировании его структуры.*

Непосредственная оценка роли взаимодействия отдельных процессов осложнена их сильной взаимозависимостью. В данном исследовании применен косвенный метод анализа, базирующийся на изучении роли деформации полей термодинамических параметров. Из работ, посвященных изучению деформации метеорологических элементов в облаках в натуральных условиях, можно отметить работу [13]. Однако возможности такого подхода к изучению роли данного фактора в облакообразовании существенно ограничены. Более эффективным для проведения исследований в этом направлении является математическое моделирование. Для этой цели была использована модель микрофизических процессов в градовых облаках, в которой термогидродинамика была задана. Поля параметров термогидродинамики были построены на основе эмпирической модели мощных градовых облаков [14].

Численные эксперименты выполнялись при варьировании величины отклонения температуры в облаке от фоновых значений



**Рис. 2.** Изолинии параметров облака на 24 минуте развития облака.  
Fig. 2. Cloud parameter contours at 24 minutes of cloud development.

( $\Delta T$ ), достигавшей максимума в  $13^\circ\text{C}$ . На рисунке 2 показаны изолинии параметров облака, соответствующие 24-й минуте эволюции при максимальном значении  $\Delta T$  [3].

Анализ расчетных данных и изолиний параметров облака выявил следующие закономерности:

1. Для образования градин при отсутствии деформации поля температуры требуется экстремально высокая влажность в облаке (около  $80\text{ г/м}^3$ ). Под влиянием деформации поля температуры в облаке формируется протяжённая зона, в которой создаются термодинамические и микроструктурные условия, способствующие зарождению и интенсивному росту градин.
2. Ледяные кристаллы диаметром 2–5 мм формируются в слое между изотермами  $-10^\circ\text{C}$  и  $-25^\circ\text{C}$ . Эти кристаллы служат зародышами градин и удерживаются в указанном температурном слое за счёт восходящих потоков.
3. Одновременно происходит увеличение их концентрации за счёт замерзания крупных капель, а также рост градин за счёт захвата переохлажденных капель, поступающих в эту зону из нижней части облака восходящими потоками.
4. Формирование слоистой структуры градин обусловлено не столько многократными вертикальными перемещениями в зоне восходящих потоков, сколько изменением режима роста в процессе движения в указанном температурном интервале. Разделение облака на зоны зарождения и роста градин не соответствует физической реальности.
5. Замкнутые области, ограниченные изолиниями концентраций градин, указывают на циклический характер осадкообразования. Это согласуется с принципом колебательной эволюции сложных систем и подтверждает системную природу процесса.

Важно отметить, что полученные результаты моделирования (в частности, температурные интервалы) хорошо согласуются с данными изотопного анализа градин, полученными в ходе натурных исследований [10]. Модальные значения температуры зарождения града на крупных зародышах составляют от  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $-25^{\circ}\text{C}$ , а на замерзших каплях примерно  $-10^{\circ}\text{C}$ . Рост града также происходит в температурном интервале от  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $-25^{\circ}\text{C}$ . Это подтверждает адекватность используемой методологии.

4. *Принципы разработки метода активного воздействия на основе системных свойств.*

Анализу проблемы разработки методов активного воздействия на конвективные облака посвящено достаточно много работ, из которых можно отметить, например, работу [15]. Но при этом не учитывалось, что при разработке таких методов облака необходимо рассматривать как системы. На основании результатов проведенного анализа современного состояния физики облаков и активных воздействий сформулированы основные задачи и принципы алгоритма разработки метода активного воздействия на градовые облака с учетом их синергетических свойств.

Ключевые задачи алгоритма, вытекающие из результатов исследования:

- анализ состояния облачной среды в различных областях облака и протекающих в них микрофизических процессов с целью определения области, условия в которой благоприятны для достижения целей активного воздействия;
- определение зоны бифуркации в облаке, в которой условия благоприятны для АВ с целью предотвращения образования крупных градин;
- определение минимальных размеров (горизонтальных и вертикальных) данной области, достаточных для предотвращения образования градин;
- определение способа исключения **многовариантности** развития облака после активного воздействия в зону бифуркации.

Переход к разработке методов активного воздействия на конвективные облака, учитывающих синергетические свойства облаков, позволяет повысить научную обоснованность и надежность методов активных воздействий. Выявленные закономерности (наличие зоны бифуркации и бифуркационных переходов в облаке) составляют фундамент для разработки нового физического принципа воздействия на градовые процессы кристаллизующим реагентом.

### **Заключение**

В развитии физики облаков и активных воздействий в настоящее время наметился переход к новому этапу развития. Дальнейший прогресс в этой области науки будет связан с постановкой и решением качественно новых задач. Сформулированы приоритетные направления его развития. Отмечено, что и на наступающем этапе исследование недостаточно изученных процессов в облаках (в основном микрофизических и электрических) сохраняет высокую значимость. Новыми направлениями исследований выступают оценка влияния внешней среды и взаимодействия процессов в облаках на формирование их структуры.

Численные эксперименты показали, что процессы облакообразования в высокой степени чувствительны к изменениям структуры поля в нижней тропосфере. Установлено, что слоистость градин формируется за счет смены режимов роста в специфическом температурном диапазоне ( $-10^{\circ}\text{C} \dots -25^{\circ}\text{C}$ ), а не только за счет вертикальных перемещений. Выявленная цикличность осадкообразования коррелирует с принципами эволюции нелинейных систем.

В сфере активных воздействий приоритет отдается методам, разработанным с учетом синергетических свойств облаков. Предложен алгоритм создания методов воздействия на градовые облака, базирующийся на учете этих свойств.

**Список источников**

1. Ашабоков Б. А., Калажоков Х. Х. Численное моделирование градовых облаков. М.: Гидрометеоиздат, 1992. 135 с.
2. Численное моделирование облаков / Е. Л. Коган, И. П. Мазин, Б. Н. Сергеев, В. И. Хворостьянов. М.: Гидрометеоиздат, 1984. 185 с.
3. Физика облаков и активных воздействий на них / Б. А. Ашабоков, Л. М. Федченко, А. В. Шаповалов, В. А. Шаповалов. Нальчик: Печатный двор, 2017. 240 с.
4. Описание базовой численной нестационарной трехмерной модели конвективного облака / Веремей Н. Е., и др. // Труды Главной геофизической обсерватории. 2016. Вып. 282. С. 45–91.
5. Straka J. Cloud and Precipitation Microphysics: Principles and Parameterizations. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. 408 p.
6. Руководство по организации и проведению противогордовых работ / М. Т. Абшаев, А. М. Абшаев, М. В. Бареева, А. М. Малкарова. Нальчик: Печатный двор, 2014. 508 с.
7. Колосков Б. П., Корнеев В. П., Щукин Г. Г. Методы и средства модификации облаков, осадков и туманов. СПб.: Издательство РГГМУ, 2012. 342 с.
8. Мазин И. П., Шмидт С. М. Облака, строение и физика образования. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 279 с.
9. Методы анализа нелинейных динамических систем / М. Холоднюк, А. Клич, М. Кубичек, М. Марек. М.: Мир, 1991. 368 с.
10. Pruppacher H. R., Klett J. D. Microphysics of Clouds and Precipitation. D. Reidel Publishing Company, 1978. 714 p.
11. Хоргуани В. Г. Микрофизика зарождения и роста града. М.: Гидрометеоиздат, 1984. 186 с.
12. Численное моделирование влияния структуры поля ветра в атмосфере на макро- и микроструктурные характеристики конвективных облаков / Б. А. Ашабоков и др. // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58, № 6. С. 669–680.
13. Мазин И. П., Шмидт С. М. О деформации полей метеорологических элементов в зоне кучевого облака // Вопросы физики облаков. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. С. 135–167.
14. Browning K. A., Foote G. B. Airflow and hail growth in supercell storms and some implications for hail suppression. National Hail Research Experiment, 1975. Tech. Rep. № 75/1. 75 p.

15. Пастушков Р. С. Численное моделирование активных воздействий на конвективные облака: актуальные направления, нерешенные задачи, возникающие вопросы (по публикациям 2007–2010 гг.) // Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Нальчик: Печатный двор, 2013. С. 16–25.

### References

1. Ashabokov BA, Kalazhokov KhKh. Numerical modeling of hail clouds. Moscow: Gidrometeoizdat; 1992. 135 p. (In Russ.).
2. Kogan EL, Mazin IP, Sergeev BN, Khvorostyanov VI. Numerical cloud modeling. Moscow: Gidrometeoizdat; 1984. 185 p. (In Russ.).
3. Ashabokov BA, Fedchenko LM, Shapovalov AV, Shapovalov VA. Cloud physics and active weather modification. Nalchik: Pechatny Dvor; 2017. 240 p. (In Russ.).
4. Veremey NE, Dovgalyuk YuA, Zatevakhin MA, Ignat'ev AA, Morozov VN, Pastushkov RS. Description of a baseline non-stationary three-dimensional convective cloud model. Trudy Glavnoi Geofizicheskoi Observatorii. 2016;(282):45-91. (In Russ.).
5. Straka J. Cloud and Precipitation Microphysics: Principles and Parameterizations. Cambridge: Cambridge University Press; 2009. 408 p.
6. Abshaev MT, Abshaev AM, Barekova MV, Malkarova AM. Guidelines for organizing and conducting hail suppression operations. Nalchik: Pechatny Dvor; 2014. 508 p. (In Russ.).
7. Koloskov BP, Korneev VP, Shchukin GG. Methods and techniques for cloud, precipitation, and fog modification. St. Petersburg: RSHMU Publishing House; 2012. 342 p. (In Russ.).
8. Mazin IP, Shmeter SM. Clouds: Structure and physics of formation. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1983. 279 p. (In Russ.).
9. Kholodniok M, Klich A, Kubichek M, Marek M. Methods of nonlinear dynamical systems analysis. Moscow: Mir Publishers; 1991. 368 p.
10. Pruppacher HR, Klett JD. Microphysics of Clouds and Precipitation. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company; 1978. 714 p.
11. Khorguani VG. Microphysics of hail initiation and growth. Moscow: Gidrometeoizdat; 1984. 186 p. (In Russ.).

12. Ashabokov BA, Fedchenko LM, Shapovalov VA, Lesev VN, Sherieva MA. Numerical simulation of the impact of atmospheric wind field structure on macro- and microphysical characteristics of convective clouds. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2022;58(6):669-680. (In Russ.).
13. Mazin IP, Shmeter SM. On the deformation of meteorological element fields in the cumulus cloud zone. In: *Questions of Cloud Physics*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1978. P. 135–167. (In Russ.).
14. Browning KA, Foote GB. Airflow and hail growth in supercell storms and some implications for hail suppression. *National Hail Research Experiment*; 1975. Tech. Rep. No. 75/1. 75 p.
15. Pastushkov RS. Numerical modeling of active influences on convective clouds: current trends, unsolved problems, emerging issues (based on publications from 2007-2010). In: *Reports of the All-Russian Conference on Cloud Physics and Active Influences on Hydrometeorological Processes*. Nalchik: Pechatny Dvor LLC; 2013. P. 16–25. (In Russ.).

### **Информация об авторах**

**Борис Азреталиевич Ашабоков** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом физики облаков ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», заведующий отделом ИИПРУ КБНЦ РАН, Scopus ID: 6505916110, Researcher ID: K-4299-2015.

**Игорь Сергеевич Афанасьев** – аспирант, направление подготовки 05.06.01 – Науки о Земле, направленность: 1.6.18 «Науки об атмосфере и климате», ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Researcher ID: AEO-9994-2022.

**Зухура Сайдуллаховна Гаева** – кандидат физико-математических наук, с.н.с., отдел физики облаков ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Scopus ID: 14051805000, AuthorID: 141744.

**Виталий Александрович Шаповалов** – доктор физико-математических наук, доцент, зав. лаборатории математического моделирования ФГБУ «Высокогорный геофизический институт»; Scopus ID: 57190966150; WOS RESEARCH ID: J-9696-2015 AuthorID: 178219; Spin код: 6938-9800.

**Вклад авторов:** все авторы внесли равный вклад в подготовку публикации.

**Information about the**

**Boris A. Ashabokov** – Dr. Sci. (Phys. and Math.), Head of the Department of Cloud Physics of the Federal State Budgetary Institution “High Mountain Geophysical Institute”, Head of Department, IIRMP, KBSC RAS. Scopus ID: 6505916110, Researcher ID: K-4299-2015.

**Igor S. Afanasyev** – postgraduate student, 05.06.01 – Earth Sciences, 1.6.18 “Atmospheric and climate sciences”, Federal State Budgetary Institution “High Mountain Geophysical Institute”, Researcher ID: AEO-9994-2022.

**Zukhura S. Gaeva** – Cand. Sci. (Phys. and Math.), Senior Researcher, Cloud Physics Department, Federal State Budget Institution “High-Mountain Geophysical Institute”, Scopus ID: 14051805000, AuthorID: 141744.

**Vitaly A. Shapovalov** – Dr. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Head of the Laboratory of Mathematical Modeling, Federal State Budget Institution “High-Mountain Geophysical Institute”, Scopus ID: 57190966150, Web of Science ResearcherID: J-9696-2015, AuthorID: 178219, SPIN Code: 6938-9800.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.