
НАУКИ ОБ АТМОСФЕРЕ И КЛИМАТЕ/ATMOSPHERIC AND CLIMATE SCIENCES

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.67> EDN: BYEDOM**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УМЕНЬШЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ В ВЕРТИКАЛЬНОМ СТОЛБЕ АТМОСФЕРЫ НА ПАРАМЕТРЫ РАЗВИВАЮЩЕГОСЯ КОНВЕКТИВНОГО ОБЛАКА**

Научная статья

Эндреев Э.М.¹, Аджиева А.А.^{2,*}, Шаповалов В.А.³, Тумгоева Х.А.⁴, Бачиев Б.А.⁵, Гучаева З.Х.⁶² ORCID : 0000-0002-1047-8417;³ ORCID : 0000-0002-9701-6820;⁵ ORCID : 0009-0006-1818-3505;⁶ ORCID : 0009-0000-9777-4018;^{1,3}Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Российская Федерация²Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова, Нальчик, Российская Федерация⁴Ингушский государственный университет, Магас, Российская Федерация⁵Дагестанский государственный аграрный университет им. М.М. Джамбулатова, Махачкала, Российская Федерация⁶Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (aida-adzhieva[at]mail.ru)

Предложена: 14.07.2026; Принята: 30.07.2026; Опубликовано: 17.08.2026

Аннотация

В работе представлены результаты численного моделирования и количественной оценки чувствительности динамических, микрофизических и макроструктурных параметров изолированного внутримассового конвективного облака к вариациям начального влагосодержания атмосферы. На основе трехмерной негидростатической модели конвективного облака с детальным учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов проведена серия из шести численных экспериментов, в которых начальный профиль удельной влажности во всем вертикальном столбе атмосферы равномерно уменьшался на определенный процент: от 0% (контрольный эксперимент) до 1%, 2%, 3%, 5% и 10%. Количественный анализ временных рядов (продолжительностью 90 минут) показал наличие выраженной нелинейности и порогового характера деградации облачной системы. Если слабые возмущения влагосодержания до 2% компенсируются внутренней термодинамической перестройкой облака, то при достижении критического порога около 3% запускается механизм каскадного ослабления конвекции. При дефиците влажности в 10% максимальная восходящая скорость падает на 51,2%, а масса наиболее чувствительной ледяной фракции (града и крупы) сокращается на 78%. Снижение интенсивности конвекции обусловлено падением скрытой теплоты конденсации на 21,6%, что подавляет развитие восходящего потока и снижает плавучесть, а также активизирует негативное влияние вовлечения сухого воздуха. Полученные зависимости важны для оптимизации параметризации глубокой конвекции в климатических моделях и прогнозирования опасных погодных явлений.

Ключевые слова: численное моделирование, конвективное облако, удельная влажность, вертикальная скорость, град, радиолокационная отражаемость, нелинейная чувствительность, пороговый эффект.

A NUMERICAL STUDY OF THE EFFECT OF A DECREASE IN SPECIFIC HUMIDITY IN THE VERTICAL ATMOSPHERIC COLUMN ON THE PARAMETERS OF A DEVELOPING CONVECTIVE CLOUD

Research article

Endreev E.M.¹, Adzhieva A.A.^{2,*}, Shapovalov V.A.³, Tumgoeva K.A.⁴, Bachiev B.A.⁵, Guchaeva Z.K.⁶² ORCID : 0000-0002-1047-8417;³ ORCID : 0000-0002-9701-6820;⁵ ORCID : 0009-0006-1818-3505;⁶ ORCID : 0009-0000-9777-4018;^{1,3}High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russian Federation²Kabardino-Balkar State Agrarian University, Nalchik, Russian Federation⁴Ingush State University, Magas, Russian Federation⁵Dagestan State Agrarian University named after M.M. Dzhambulatov, Makhachkala, Russian Federation⁶Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, Russian Federation

* Corresponding author (aida-adzhieva[at]mail.ru)

Suggested: 14.07.2026; Accepted: 30.07.2026; Published: 17.08.2026

Abstract

The work presents the results of numerical modelling and a quantitative evaluation of the sensitivity of the dynamic, microphysical and macrostructural parameters of an isolated in-mass convective cloud to variations in the initial moisture content of the atmosphere. Based on a three-dimensional non-hydrostatic model of a convective cloud that takes detailed account of thermodynamic, microphysical and electrical processes, a series of six numerical experiments was conducted in which the initial specific humidity profile throughout the entire vertical column of the atmosphere was uniformly reduced by a

specific percentage: from 0% (control experiment) to 1%, 2%, 3%, 5% and 10%. Quantitative analysis of the time series (lasting 90 minutes) showed the presence of pronounced non-linearity and a threshold nature in the degradation of the cloud system. While weak perturbations in moisture content of up to 2% are compensated for by the cloud's internal thermodynamic reorganisation, upon reaching a critical threshold of around 3%, a mechanism of cascading convective weakening is triggered. With a moisture deficit of 10%, the maximum updraft velocity falls by 51.2%, and the mass of the most sensitive ice fraction (hail and large ice particles) is reduced by 78%. The reduction in convection intensity is due to a 21.6% decrease in the latent heat of condensation, which suppresses the development of the updraft and reduces buoyancy, whilst also amplifying the negative effect of dry air entrainment. The resulting dependencies are important for optimising the parameterisation of deep convection in climate models and for forecasting severe weather events.

Keywords: numerical modelling, convective cloud, specific humidity, vertical velocity, hail, radar reflectivity, non-linear sensitivity, threshold effect.

Введение

Конвективные облака являются одним из наиболее значимых объектов исследования в динамической метеорологии и физике атмосферы. Они оказывают определяющее влияние на глобальный и региональный водный цикл, перенос тепла, влаги и импульса, а также на формирование экстремальных погодных явлений (шквалистые ветра, интенсивные ливни, крупный град) [1], [2]. Среди факторов окружающей среды, определяющих интенсивность и глубину конвекции, особую роль играет влагосодержание тропосферы.

Влияние распределения водяного пара в тропосфере на конвективную активность подробно исследовалось теоретически и в наблюдениях [3], [4]. Ключевым механизмом этого влияния является втягивание сухого окружающего воздуха в конвективный восходящий поток, что снижает плавучесть поднимающегося воздуха и ослабляет восходящие движения [5], [6], для которого предлагается термин — энтрайнмент, от англ. entrainment (вовлечение, увлечение; размыв). Чем суше свободная тропосфера, тем интенсивнее испарение облачных капель при их смешении с окружающим воздухом и тем быстрее теряется плавучесть восходящего термика. Вообще вариации параметров конвективного облака тесно связаны с процессами градообразования [7], [9], например, современные нейросетевые модели позволяют оценивать максимальный размер града именно по термодинамическим параметрам, среди которых ключевую роль играет удельная влажность [8].

Проведённые ранее численные исследования, как правило, рассматривали влияние влажности свободной тропосферы в контексте идеализированных экспериментов с постоянными значениями относительной влажности [5] либо анализировали зависимость от влажности нижнего слоя атмосферы и слоя смешения [11]. Анализ источников показывает, что количественная оценка чувствительности конвективных облаков к изменениям вертикального профиля удельной влажности имеет важное прикладное значение. Во-первых, иссушение атмосферы в отдельных регионах, связанное с изменением климата или адвекцией сухих воздушных масс, существенно модифицирует характеристики конвекции [10]. Во-вторых, понимание этой зависимости критически важно для развития технологий активного воздействия на облака и осадки. В-третьих, корректная параметризация чувствительности конвекции к влажности остаётся одной из основных задач при верификации моделей общей циркуляции атмосферы [4].

В контексте климатических изменений и антропогенного воздействия количественная оценка чувствительности развивающихся облачных систем к вариациям удельной влажности приобретает стратегическое значение для понимания темпов изменений. Например, это необходимо как для повышения точности гидрологических прогнозов, так и для верификации конвективных схем в моделях прогноза погоды и климата [12]. А значит актуальным становится изучение отклика облачных параметров на однородное пропорциональное иссушение всего вертикального столба атмосферы, которое моделирует масштабные адвективные процессы или региональные климатические сдвиги.

Таким образом, целью настоящей работы является комплексное численное исследование и количественный анализ чувствительности динамических, микрофизических и макроструктурных параметров развивающегося конвективного облака к равномерному уменьшению удельной влажности в вертикальном столбе атмосферы в диапазоне от 1% до 10% относительно естественного хода.

Методы и принципы исследования

2.1. Описание численной модели

Для проведения численных экспериментов использовалась трехмерная негидростатическая модель конвективного облака с детальным учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов, базирующаяся на уравнениях гидротермодинамики в приближении Буссинеска [13]. Модель воспроизводит пространственно-временную эволюцию векторов скорости, возмущений давления, потенциальной температуры и массовых долей влаги.

Уравнение движения записывается в векторной форме:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p' + B \hat{\mathbf{k}} - F_D$$

где $\mathbf{u}$ — вектор скорости, ρ_0 — базовая плотность воздуха, p' — возмущение давления, F_D — сила турбулентной вязкости и аэродинамического сопротивления гидрометеоров, $\hat{\mathbf{k}}$ — единичный вектор в вертикальном направлении, B — сила плавучести, определяемая выражением:

$$B = g \cdot \left[\frac{\theta'}{\theta_0} + 0.608 (q'_v - q_c - q_r - q_i - q_s - q_g - q_h) \right]$$

Здесь θ' — возмущение потенциальной температуры, θ_0 — базовая потенциальная температура стратифицированной атмосферы, а $q'_v, q_c, q_r, q_i, q_s, q_g, q_h$ — удельные массовые содержания водяного пара, облачной воды, дождевых капель, первичных ледяных кристаллов, снега, крупы и града соответственно.

Микрофизический блок модели реализует детальное описание фазовых переходов капель воды и ледяных кристаллов в процессах нуклеации, диффузионного роста частиц (включая эффект Бергерона — Финдейзена),

фазовых переходов (замерзание, плавление, сублимацию и десублимацию) и контактных взаимодействий частиц, таких как коагуляция, аккреция капель и ледяных кристаллов и агрегация кристаллов [14]. Микроструктура облака описывается с помощью кинетических уравнений для функций распределения частиц по массам (или радиусам). Модель детально учитывает спектры размеров основных влагосодержащих компонентов, разделяя их на следующие категории: жидкая фаза — облачные капли (q_c) и частицы осадков — дождь (q_r); твердая (ледяная) фаза — ледяные кристаллы (q_i), снег (q_s), крупа (q_g) и град (q_h).

В общем математическом виде для каждого типа облачных частиц i уравнение микрофизического блока записывается как:

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{V} f_i) - \frac{\partial}{\partial z} (v_{gi}(m) f_i) = \left(\frac{\partial f_i}{\partial t} \right)_{\text{конд./субл.}} + \left(\frac{\partial f_i}{\partial t} \right)_{\text{коаг.}} + \left(\frac{\partial f_i}{\partial t} \right)_{\text{трансф.}} + \Delta_{\text{турб.}}(f_i)$$

где: $f_i(x, y, z, m, t)$ — функция распределения частиц i -го типа по массам m ; $\vec{V}$ — вектор скорости воздушного потока; $v_{gi}(m)$ — установившаяся скорость гравитационного осаждения частиц массы m ; Правая часть описывает локальные источники и стоки за счет диффузионного роста $\left(\frac{\partial f_i}{\partial t} \right)_{\text{конд./субл.}}$, коагуляционных взаимодействий $\left(\frac{\partial f_i}{\partial t} \right)_{\text{коаг.}}$, с учетом электрических сил), контактных взаимодействий частиц $\left(\frac{\partial f_i}{\partial t} \right)_{\text{трансф.}}$ и турбулентной диффузии $\Delta_{\text{турб.}}(f_i)$.

Динамика изменений данных функций рассчитывается с учетом их пространственно-временного переноса воздушными потоками, турбулентного перемешивания, а также скорости седиментации (гравитационного осаждения) частиц каждой фракции под действием силы тяжести. Электрические силы значительно изменяют коэффициенты столкновения и слияния частиц (особенно малых фракций), что существенно ускоряет укрупнение гидрометеоров и стимулирует раннее градообразование на стадии активного роста конвективного облака.

Расчетный домен имеет геометрию 60 X 60 X 18 км. Пространственная дискретизация выполнена на регулярной сетке с шагом по вертикали $\Delta z = 200$ м и по горизонтали Δx и $\Delta y = 500$ м. Шаг интегрирования по времени принят равным $\Delta t = 5$ с. На боковых границах заданы условия непротекания, на верхней границе реализован демпфирующий поглощающий слой для предотвращения отражения акустико-гравитационных волн.

2.2. Начальные условия и параметры экспериментов

Начальное термодинамическое состояние атмосферы задавалось на основе реального профиля радиозондирования из архива ФГБУ «ВГИ» (архивный файл `input_sounding_2025_08_13_1200Z.txt`), характеризующегося высоким запасом конвективной неустойчивости. Поверхностная потенциальная температура составляла $T_0 = 300$ К, а базовая удельная влажность у земли достигала $q_0 = 12.52$ г/кг, почти экспоненциально убывая с высотой. Конвекция инициировалась искусственным введением термического возмущения (теплового пузыря) в нижнем 2-километровом слое с радиальным размером 10 км и температурным перегревом $\Delta\theta = 3$ К в геометрическом центре области моделирования.

Набор численных экспериментов включает один контрольный и пять модифицированных запусков, в которых профиль удельной влажности $q_v(z)$ масштабировался коэффициентом $(1 - \delta)$, где δ — относительный дефицит влаги:

z01 Исходный базовый профиль, $\delta = 0\%$.

z02-z06 Равномерное иссушение на $\delta = 1\%, 2\%, 3\%, 5\%, 10\%$, соответственно.

Начальное температурное поле, профиль давления и вектор фонового сдвига ветра оставались строго одинаковыми во всех итерациях численного моделирования, что позволило выделить вклад интегрального влагосодержания. Полная продолжительность симуляций составила 90 минут, фиксация диагностических полей производилась с дискретностью 1 минута.

Основные результаты

Анализ динамических полей продемонстрировал жесткую, но нелинейную зависимость интенсивности вертикальных движений от дефицита влаги. В контрольном эксперименте z01 развитие кучево-дождевой системы характеризуется классической двухпиковой структурой временного хода максимальной вертикальной скорости ($w_{\max}$). Первый интенсивный восходящий импульс фиксируется на 38-й минуте, достигая 45.6 м/с. Этот импульс обусловлен взрывным ростом плавучести при начальной конденсации водяного пара приземного влажного объема воздуха. Вторичный пик формируется на этапе зрелости облачной системы (56-я минута), генерируя максимальные значения восходящих потоков, сопряженные с тепловыделением при кристаллизации и аккреции.

При переходе к экспериментам z02 и z03 (иссушение на 1% и 2%) пиковые значения $w_{\max}$ снижаются слабо — до 45.2 м/с и 43.8 м/с соответственно, а время их наступления совпадает с контролем (38-я минута). Однако дальнейшее уменьшение влажности приводит к резкому перелому тренда. В эксперименте z04 ($\delta = 3\%$) пиковое значение скорости падает до 41.4 м/с (относительное снижение на 9,3%), а сам динамический максимум смещается во времени на 41-ю минуту, что указывает на замедление темпов облачной эволюции.

В экстремальных сценариях z05 (5%) и z06 (10%) наблюдается глубокая деградация динамического потенциала. Максимум восходящей скорости в эксперименте z06 падает более чем в два раза — до 22.29 м/с, а временной сдвиг пика достигает 24 минут.

Интенсивность нисходящих потоков, оцениваемая в нашем случае по модулю минимальной вертикальной скорости ($|w_{\min}|$), демонстрирует аналогичную тенденцию к затуханию. Пиковое значение нисходящего потока уменьшается с -14.31 м/с (z01) до -8.74 м/с (z06). Ослабление нисходящих движений физически предопределено снижением массы выпадающих осадков и замедлением процессов испарительного охлаждения в подоблачном слое.

Максимальная радиолокационная отражаемость ($Z_{\max}$) выступает в качестве важнейшего индикатора зрелости облачной системы и наличия крупнодисперсной ледяной фазы. В экспериментах z01, z02 и z03 пиковая отражаемость стабилизирована на отметке 66.7 дБZ, что однозначно свидетельствует о формировании мощного градового ядра (таблица 1). Начиная с эксперимента z04 ($\delta = 3\%$), значение $Z_{\max}$ начинает монотонно снижаться, достигая 60.9 дБZ в сценарии z06. Снижение отражаемости на ~9 дБZ физически означает резкое падение концентрации и эффективного диаметра градин и крупных капель дождя.

Сводные количественные характеристики экспериментов приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Динамические параметры, максимальная радиолокационная отражаемость, макроструктурные характеристики облака, интегральные массы гидрометеоров, общее выделение скрытой теплоты конденсации (le) и суммарный объем осадков на поверхность

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.67.1>

Эксп.	Дефицит q_v , %	Пик $w_{\max}$ ($w_{\min}$), м/с	Время пика, мин	Относ. изм. пика $w_{\max}$, %	Макс. высота Нвг, км Пик ($Z_{\max}$), дБZ	Время пика, мин	Относ. изм. $Z_{\max}$, %	Интегральная масса q_c+q_r , ($q_i+q_s+q_g+q_h$), 10^6 кг	Изменение интегральной массы q_g+q_h , %	Интеграл le , 10^{15} Дж Суммарные осадки (90 мин), мм	Относ. изм. осадков, %
z01	0	45,64(14,31)	38 (38)	0,0	13,8 (66,68)	40 (56)	0,0	11,274 (14,5)	0,0	-5,19 (13,1)	0,0
z02	1	45,21 (14,11)	38 (39)	-0,9	13,8 (66,7)	40 (56)	0,0	11,272 (14,5)	0,0	-5,18 (13,1)	0,0
z03	2	43,81 (13,77)	38 (39)	-4,0	13,6 (66,7)	41 (56)	0,0	11,273 (14,3)	-1,4	-5,18 (13,1)	0,0
z04	3	41,40 (13,74)	41 (41)	-9,3	13,6 (66,4)	41 (56)	-0,5	10,568 (12,0)	-17,2	-5,14 (13,0)	-0,8
z05	5	35,39 (11,93)	44 (45)	-22,5	13,4 (64,6)	42 (56)	-3,1	10,106 (9,7)	-33,1	-4,96 (12,6)	-3,8
z06	10	22,29 (8,74)	52 (52)	-51,2	12,6 (60,9)	45 (57)	-8,7	6,770 (3,2)	-78,0	-4,07 (10,7)	-18,3

Макроструктурная эволюция облачной геометрии также выявила деградацию кучево-дождевого облака. Максимальная высота вертикального развития (верхняя граница облака Нвг) в контрольном пуске составляет 13.8 км, что указывает на пробой тропопаузы и формирование развитой наковальни. При иссушении атмосферного столба на 10% (z06) верхняя граница падает до 12.6 км (снижение на 1,2 км). Одновременно с этим нижняя граница облачности испытывает подъем с 1.5 км до 2.3 км вследствие дефицита влаги в подоблачном слое и соответствующего падения уровня конденсации. В результате суммарная геометрическая мощность облака уменьшается более чем на 2 км.

Пороговый характер отклика облачной системы прослеживается и при анализе интегральных по области моделирования масс отдельных микрофизических фракций влаги (таблица 1). В то время как пиковая интегральная масса водяного пара (q_v) в силу геометрии начального возмущения остается квазипостоянной ($0,4805 \times 10^9$ кг), массы конденсированных фаз демонстрируют стремительное нелинейное сокращение.

Масса мелкодисперсной облачной воды (q_c) снижается на относительно умеренную величину: с $10,93 \times 10^6$ кг в контрольном эксперименте до $6,62 \times 10^6$ кг в эксперименте z06 (снижение на 39,4%). В то же время масса укрупненной фракции жидких осадков (q_r — дождь) испытывает выраженный коллапс после преодоления 3%-го барьера, сокращаясь в эксперименте z06 более чем в 2,3 раза (до $1,5 \times 10^7$ кг).

Наиболее уязвимым звеном облачного микрофизического «конвейера» оказалась плотная ледяная фаза — град и крупа (q_h и q_g) соответственно. До уровня иссушения в 2% масса града стабильна ($14,3 \times 10^6$ кг). Однако в эксперименте z04 ($\delta = 3\%$) она скачкообразно падает до $12,0 \times 10^6$ кг (уменьшение на 17,2%), в эксперименте z05 теряет треть массы, а при 10%-м иссушении (z06) сокращается на 78%, опускаясь до $3,2 \times 10^6$ кг. Столь катастрофический спад указывает на то, что механизмы градообразования требуют строго определенного уровня влагосодержания тропосферы, ниже которого быстрый рост твердой фазы блокируется.

Суммарный приток энергии за счет фазового перехода первого рода — выделения тепла при конденсации пара (le) — монотонно и нелинейно убывает. В контроле суммарный интеграл выделенного скрытого тепла составляет $5,19 \times 10^{15}$ Дж, тогда как в эксперименте z06 он падает до $4,07 \times 10^{15}$ Дж (падение на 21,6%, таблица 1).

Количество суммарных накопленных осадков на поверхности к 90-й минуте моделирования демонстрирует устойчивость к слабым флуктуациям влажности (вплоть до $\delta = 2\%$ объем осадков неизменно составляет 13.1 мм). Перелом наступает при преодолении 3-5%-го барьера иссушения. В финальном эксперименте z06 количество выпавших осадков снижается до 10.7 мм, что соответствует сокращению осадков на 18,3%. То есть, интегральные

параметры энергетического обмена и влагоотдачи полностью подтверждают системный характер подавления конвекции.

Обсуждение

Фундаментальный характер нелинейного отклика динамики и микрофизики облака на уменьшение влажности находит объяснение в рамках классической теории вовлечения и концепции «буферного сортировщика плавучести» (buoyancy sorting) [15]. Согласно этим представлениям, учтенным в термодинамическом блоке модели, восходящий конвективный поток представляет собой гетерогенный ансамбль элементарных воздушных объемов («пузырей»), которые в процессе подъема непрерывно взаимодействуют со средой, испытывая различную степень турбулентного перемешивания и вовлечения сухого окружающего воздуха.

При уменьшении начальной удельной влажности во всем вертикальном столбе атмосферы парциальное давление водяного пара падает, увеличивая дефицит насыщения тропосферы. В процессе вовлечения — втягивание более сухого воздуха вызывает мгновенное испарение части облачной капельной фракции для восстановления насыщения. Процесс испарения сопровождается поглощением скрытой теплоты, что резко охлаждает вовлеченный объем воздуха. В результате виртуальная потенциальная температура элементарного объема падает ниже температуры окружающей среды, плавучесть становится отрицательной, и данный объем выбывает из восходящего ядра, формируя облачные нисходящие потоки. При иссушении атмосферы доля конвективных объемов, способных сохранить положительную плавучесть и достичь уровня свободной конвекции, падает нелинейно, что объясняет резкое падение интегральных параметров восходящего потока.

Ключевым результатом данной работы является четкая фиксация бифуркационного порога в районе $\Delta q_v \approx 3\%$. В диапазоне дефицита влаги 122% конвективная система успешно компенсирует нехватку влаги. Механизм компенсации реализуется за счет локального сужения восходящего ядра, что временно снижает эффективный периметр вовлечения и защищает центральную часть восходящего потока от разрушительного испарения капель.

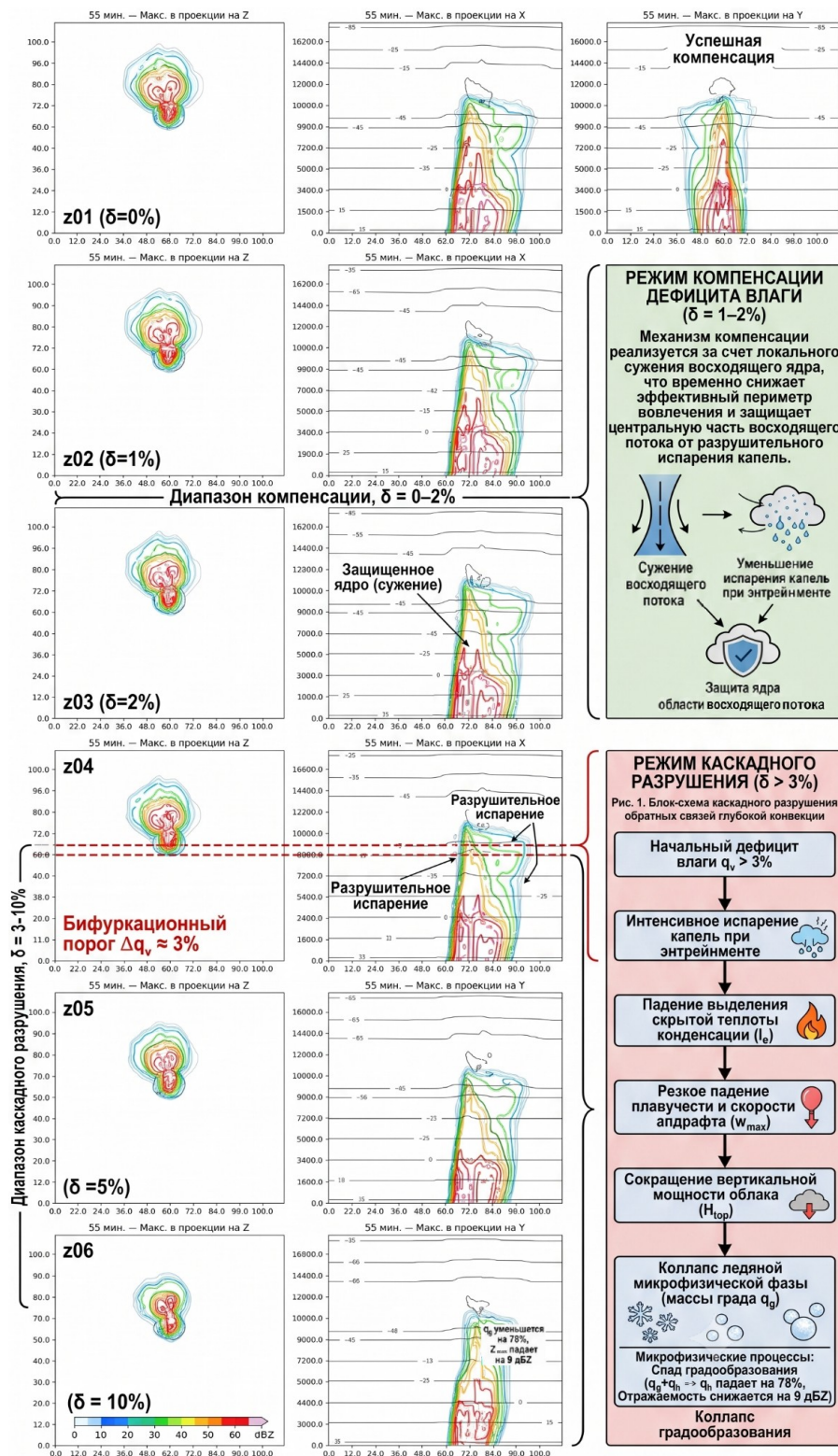


Рисунок 1 - Блок-схема каскадного разрушения обратных связей глубокой конвекции при преодолении порогового дефицита влажности

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.67.2>

Однако при превышении критического порога в 3% этот внутренний защитный ресурс системы оказывается исчерпанным. Происходит разрыв положительной обратной связи, поддерживающей глубокую влажную конвекцию (рисунок 1).

Микрофизические процессы спада градообразования при $\Delta q_v = 10\%$ показывают, что интегральная масса $q_g + q_n$ падает на 78%. Это объясняется тем, что рост зародышей града требует строго определенной критической водности облачной среды. При дефиците пара скорость конденсации снижается, и массовая доля переохлажденных капель падает ниже критического предела. Ледяные ядра, не встречая достаточного количества жидкой влаги для аккреции, прекращают рост и сублимируют или выпадают в виде мелкой крупы и снега, что подтверждается резким падением радиолокационной отражаемости на 9 дБЗ. То есть, снижение уровня нейтральной плавучести ниже изотермы 0°C

заблокировало развитие глубокой конвекции, ограничив эволюцию облака стадией мощных кучевых (*cumulus congestus*).

Обнаруженный пороговый переход согласуется с нелинейной зависимостью интенсивности осадков от влагосодержания столба атмосферы, описанной в наблюдениях тропической конвекции [3], [16]. Физически этот порог связан с тем, что при достаточно низкой влажности уровень нейтральной плавучести опускается ниже уровня заморзания, и эффективность микрофизических механизмов роста ледяных частиц резко снижается. Тем самым прерывается цепочка обратных связей, поддерживающая глубокую конвекцию (конденсация → скрытая теплота → увеличение плавучести → рост облака → дополнительная конденсация).

С точки зрения активного воздействия на облака и осадки результаты работы показывают, что при иссушении атмосферы более чем на 10–20% относительно нормы эффективность воздействия реагентами (например, йодистым серебром) существенно снижается, поскольку уже сама реализующаяся высота облачной вершины не превышает уровня заморзания. Полученные данные согласуются и с результатами наблюдений [6], указывавших на подавление конвективной активности в периоды мезомасштабных адвекций сухого воздуха с востока.

Заключение

На основе результатов серии численных экспериментов, выполненных с помощью трехмерной негидростатической модели конвективного облака с детальным учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов, исследована чувствительность развивающегося конвективного облака к равномерному дефициту удельной влажности в вертикальном столбе атмосферы. Сформулированы следующие основные выводы:

- имеет место выраженный нелинейный характер отклика динамических и микрофизических параметров облака на иссушение атмосферы с фиксацией критического порога перелома зависимостей в районе $\Delta q_v \approx 3\%$. При дефиците влаги до 2% облачная система сохраняет пиковые характеристики за счет внутренней структурной перестройки.

- преодоление 3%-го порога влажностного дефицита запускает каскадный механизм подавления конвекции. В финальной точке расчетной матрицы ($\Delta q_v = 10\%$) максимальная скорость восходящего потока падает на 51,2% (до 22,29 м/с), а интегральная вертикальная активность сокращается в 2,7 раза. Эволюция облака существенно замедляется, сдвигая динамический пик на 14 минут позже относительно контроля.

- селективная деградация плотной ледяной фракции гидрометеоров: при 10%-м иссушении интегральная масса града и крупной крупы по области моделирования падает на 78%, тогда как масса облачных капель сокращается лишь на 39,4%. Это указывает на высокую уязвимость фазовых переходов второго рода (вода-лед) к влажностному режиму тропосферы.

- макроструктурные параметры облака демонстрируют монотонный спад: под влиянием дефицита влаги верхняя граница облачной вершины снижается на 1,2 км, уменьшая общую вертикальную мощность кучево-дождевой системы. Суммарные приземные накопленные осадки уменьшаются на 18,3%.

Полученные количественные закономерности и выявленные аналитические зависимости имеют практическое значение для прогнозирования конвективных осадков при мезомасштабном иссушении атмосферы, для планирования операций по активному воздействию на облака, а также для верификации параметризаций конвекции в глобальных климатических моделях в части описания чувствительности к профилям влажности в тропосфере.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Андреева Е.С., Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.67.3>

Conflict of Interest

None declared.

Review

Andreeva E.S., Don State Technical University, Rostov-on-Don Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.67.3>

Список литературы / References

1. Алоян А.Е. Моделирование конвективной облачности и ее влияния на газовый состав атмосферы / А.Е. Алоян, А.Н. Ермаков, В.О. Арутюнян // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. — 2010. — Т. 46. — № 6. — С. 771–785.
2. Houze R.A. 100 Years of Research on Mesoscale Convective Systems / R.A. Houze // Meteorological Monographs. — 2018. — Vol. 59. — P. 17.1–1754. — DOI: 10.1175/AMSMONOGRAPHS-D-18-0001.1
3. Schiro K.A. Deep Convective Organization, Moisture Vertical Structure, and Convective Transition Using Deep-Inflow Mixing / K.A. Schiro, J.D. Neelin // Journal of the Atmospheric Sciences. — 2019. — Vol. 76. — Iss. 4. — P. 965–987. — DOI: 10.1175/JAS-D-18-0122.1
4. Sherwood S.C. Tropospheric water vapor, convection, and climate / S.C. Sherwood, R. Roca, T.M. Weckwerth et al. // Reviews of Geophysics. — 2010. — Vol. 48. — Iss. 2. — P. 2001. — DOI: 10.1029/2009RG000301
5. Derbyshire S.H. Sensitivity of moist convection to environmental humidity / S.H. Derbyshire, I. Beau, P. Bechtold // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. — 2004. — Vol. 130. — Iss. 604. — P. 3055–3079. — DOI: 10.1256/qj.03.130
6. James R.P. A Numerical Investigation of the Effects of Dry Air Aloft on Deep Convection / R.P. James, P.M. Markowski // Monthly Weather Review. — 2010. — Vol. 138. — Iss. 1. — P. 140–161. — DOI: 10.1175/2009MWR3018.1
7. Жабоева М.М. Вариации параметров конвективного облака и атмосферы при образовании града / М.М. Жабоева // Сборник научных трудов XI Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной 100-



летию со дня рождения академика Андрея Дмитриевича Сахарова. — Нальчик: Кабардино-Балкарский ГАУ, 2021. — С. 49–53.

8. Созаева Л.Т. Оценка максимального размера града по термодинамическим параметрам атмосферы методами нейросетевого моделирования / Л.Т. Созаева, А.Х. Кагермазов // Наука. Инновации. Технологии. — 2026. — № 4. — С. 69–84.

9. Спрыгин А.А. Исследование мезомасштабной конвективной системы в центральных районах ЕТР 7 августа 2021 года / А.А. Спрыгин, А.Е. Вязилов // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. — 2022. — № 2. — С. 394.

10. Varble A.C. Updraft width modulates ambient atmospheric controls on convective cloud depth / A.C. Varble, H. Morrison, E.J. Zipser // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. — 2024. — Vol. 129. — P. 23. — DOI: 10.1029/2024JD041769

11. Yang Z. Summer convective precipitation changes over the Great Lakes Region under a warming scenario / Z. Yang, J. Wang, Y. Qian et al. // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. — 2024. — Vol. 129. — Iss. 11. — P. e2024JD041011. — DOI: 10.1029/2024JD041011

12. Володин Е.М. Представление потоков тепла, влаги и импульса в климатических моделях. конвекция и конденсация / Е.М. Володин // Фундаментальная и прикладная климатология. — 2017. — Т. 2. — С. 26–41.

13. Ашабоков Б.А. Трехмерная численная модель конвективного облака с учетом электрических процессов: некоторые результаты расчетов параметров грозоградовых облаков / Б.А. Ашабоков, Л.М. Федченко, А.В. Шаповалов и др. // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. — 2015. — № 6 (62). — С. 9–15.

14. Morrison H. Confronting the challenge of modeling cloud and precipitation microphysics / H. Morrison, M. van Lier-Walqui, A.M. Fridlind et al. // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. — 2020. — № 12. — P. 1–68. — DOI: 10.1029/2019MS001689

15. Emanuel K.A. A Scheme for Representing Cumulus Convection in Large-Scale Models / K.A. Emanuel // Journal of the Atmospheric Sciences. — 1991. — Vol. 48. — Iss. 21. — P. 2313–2335. — DOI: 10.1175/1520-0469

16. Ahmed F. Reverse Engineering the Tropical Precipitation–Buoyancy Relationship / F. Ahmed, J.D. Neelin // Journal of the Atmospheric Sciences. — 2018. — Vol. 75. — Iss. 5. — P. 1587–1608. — DOI: 10.1175/JAS-D-17-0333.1

Список литературы на английском языке / References in English

1. Aloyan A.E. Modelirovanie konvektivnoi oblachnosti i yee vliyaniya na gazovii sostav atmosferi [Modeling of convective clouds and their impact on the atmospheric gas composition] / A.E. Aloyan, A.N. Yermakov, V.O. Arutyunyan // Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Fizika atmosferi i okeana [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Atmospheric and Oceanic Physics/Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Atmospheric and Oceanic Physics]. — 2010. — Vol. 46. — № 6. — P. 771–785. [in Russian]

2. Houze R.A. 100 Years of Research on Mesoscale Convective Systems / R.A. Houze // Meteorological Monographs. — 2018. — Vol. 59. — P. 17.1–1754. — DOI: 10.1175/AMSMONOGRAPHS-D-18-0001.1

3. Schiro K.A. Deep Convective Organization, Moisture Vertical Structure, and Convective Transition Using Deep-Inflow Mixing / K.A. Schiro, J.D. Neelin // Journal of the Atmospheric Sciences. — 2019. — Vol. 76. — Iss. 4. — P. 965–987. — DOI: 10.1175/JAS-D-18-0122.1

4. Sherwood S.C. Tropospheric water vapor, convection, and climate / S.C. Sherwood, R. Roca, T.M. Weckwerth et al. // Reviews of Geophysics. — 2010. — Vol. 48. — Iss. 2. — P. 2001. — DOI: 10.1029/2009RG000301

5. Derbyshire S.H. Sensitivity of moist convection to environmental humidity / S.H. Derbyshire, I. Beau, P. Bechtold // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. — 2004. — Vol. 130. — Iss. 604. — P. 3055–3079. — DOI: 10.1256/qj.03.130

6. James R.P. A Numerical Investigation of the Effects of Dry Air Aloft on Deep Convection / R.P. James, P.M. Markowski // Monthly Weather Review. — 2010. — Vol. 138. — Iss. 1. — P. 140–161. — DOI: 10.1175/2009MWR3018.1

7. Zhaboeva M.M. Variatsii parametrov konvektivnogo oblaka i atmosferi pri obrazovanii grada [Variations in the parameters of a convective cloud and the atmosphere during the formation of hail] / M.M. Zhaboeva // Collection of scientific papers of the 11th All-Russian (National) Scientific and Practical Conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of Academician Andrey Dmitrievich Sakharov. — Nalchik: Kabardino-Balkarian State Agrarian University, 2021. — P. 49–53. [in Russian]

8. Sozaeva L.T. Ocenka maksimal'nogo razmera grada po termodinamicheskim parametram atmosfery' metodami nejrosetevogo modelirovaniya [Estimation of the maximum size of hail based on thermodynamic parameters of the atmosphere using neural network modeling] / L.T. Sozaeva, A.X. Kagermazov // Science. Innovation. Technologies. — 2026. — № 4. — P. 69–84. [in Russian]

9. Spryg'in A.A. Issledovanie mezomasshtabnoj konvektivnoj sistemy' v central'ny'x rajonax ETR 7 avgusta 2021 goda [Study of a mesoscale convective system in the central regions of the European part of Russia on August 7, 2021] / A.A. Spryg'in, A.E. Vyazilov // Hydrometeorological studies and forecasts. — 2022. — № 2. — P. 394. [in Russian]

10. Varble A.C. Updraft width modulates ambient atmospheric controls on convective cloud depth / A.C. Varble, H. Morrison, E.J. Zipser // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. — 2024. — Vol. 129. — P. 23. — DOI: 10.1029/2024JD041769

11. Yang Z. Summer convective precipitation changes over the Great Lakes Region under a warming scenario / Z. Yang, J. Wang, Y. Qian et al. // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. — 2024. — Vol. 129. — Iss. 11. — P. e2024JD041011. — DOI: 10.1029/2024JD041011



12. Volodin E.M. Predstavlenie potokov tepla, vlagi i impul'sa v klimaticheskix modelyax. konvekciya i kondensaciya [Representation of heat, moisture, and momentum flows in climate models. Convection and condensation] / E.M. Volodin // Fundamental and Applied Climatology. — 2017. — T. 2. — P. 26–41. [in Russian]
13. Ashabokov B.A. Trekhmernaya chislennaya model konvektivnogo oblaka s uchetom elektricheskikh protsessov: nekotorye rezultati raschetov parametrov grozogradovikh oblakov [Three-dimensional numerical model of a convective cloud taking into account electrical processes: some results of calculations of parameters of thunderstorm clouds] / B.A. Ashabokov, L.M. Fedchenko, A.V. Shapovalov et al. // Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN [Proceedings of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. — 2015. — № 6 (62). — P. 9–15. [in Russian]
14. Morrison H. Confronting the challenge of modeling cloud and precipitation microphysics / H. Morrison, M. van Lier-Walqui, A.M. Fridlind et al. // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. — 2020. — № 12. — P. 1–68. — DOI: 10.1029/2019MS001689
15. Emanuel K.A. A Scheme for Representing Cumulus Convection in Large-Scale Models / K.A. Emanuel // Journal of the Atmospheric Sciences. — 1991. — Vol. 48. — Iss. 21. — P. 2313–2335. — DOI: 10.1175/1520-0469
16. Ahmed F. Reverse Engineering the Tropical Precipitation–Buoyancy Relationship / F. Ahmed, J.D. Neelin // Journal of the Atmospheric Sciences. — 2018. — Vol. 75. — Iss. 5. — P. 1587–1608. — DOI: 10.1175/JAS-D-17-0333.1