 © Авторы статьи / Authors of the article

НАУКИ ОБ АТМОСФЕРЕ И КЛИМАТЕ/ATMOSPHERIC AND CLIMATE SCIENCES

DOI: https://doi.org/10.60797/GEO.2026.9.2 EDN: AONAGJ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАГИ В АТМОСФЕРЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ОБЛАКА ЧЕРЕЗ БИФУРКАЦИОННЫЕ ПЕРЕХОДЫ

Научная статья

Эндреев Э.М.[1], Аджиева А.А.[2,] *, Шаповалов В.А.[3], Бачиев Б.А.[4], Тумгоева Х.А.[5], Гучаева З.Х.[6]

[2] ORCID : 0000-0002-1047-8417;

[3] ORCID : 0000-0002-9701-6820;

[4] ORCID : 0009-0006-1818-3505;

[6] ORCID : 0009-0000-9777-4018;

[1, 3] Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Российская Федерация

[2] Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова, Нальчик, Российская Федерация

[4] Дагестанский государственный аграрный университет им. М.М. Джамбулатова, Махачкала, Российская Федерация

[5] Ингушский государственный университет, Магас, Российская Федерация

[6] Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Российская Федерация

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

Предложена: 14.07.2026; Принята: 03.09.2026; Опубликована: 13.11.2026

Аннотация

В статье исследуется критическая роль вертикального профиля относительной влажности (*RH*) в процессах инициации, эволюции и структурной самоорганизации глубокой влажной конвекции. На основе комплексного анализа литературных данных и результатов численного моделирования с высоким разрешением (500 м по горизонтали, 200 м по вертикали) показано, что распределение водяного пара выступает в роли главного термодинамического регулятора («скрытого архитектора») конвективных систем. К анализу эволюции конвективного облака применен аппарат теории бифуркаций (включая бифуркации Пуанкаре–Андронова–Хопфа и седло-узловые переходы). Установлено, что превышение порогового значения *RH* > 60–65% в среднем слое тропосферы (800–500 гПа) провоцирует скачкообразный (бифуркационный) переход от подавленной кучевой облачности к мощным кучево-дождевым системам. Рассмотрены механизмы нелинейного взаимодействия влажности среды с процессами турбулентного вовлечения, микрофизики осадков и концентрации ядер конденсации (*CCN*).

Ключевые слова: вертикальный профиль влажности, глубокая конвекция, турбулентное вовлечение, доступная конвективная потенциальная энергия (CAPE), конвективное торможение (CIN), теория бифуркаций, ядра конденсации (CCN), численное моделирование.

A STUDY OF THE INFLUENCE OF VERTICAL HUMIDITY DISTRIBUTION IN THE ATMOSPHERE ON THE FORMATION OF CONVECTIVE CLOUDS VIA BIFURCATION TRANSFERS

Research article

Endreev E.M.[1], Adzhieva A.A.[2,] *, Shapovalov V.A.[3], Bachiev B.A.[4], Tumgoeva K.A.[5], Guchaeva Z.K.[6]

[2] ORCID : 0000-0002-1047-8417;

[3] ORCID : 0000-0002-9701-6820;

[4] ORCID : 0009-0006-1818-3505;

[6] ORCID : 0009-0000-9777-4018;

[1, 3] High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russian Federation

[2] Kabardino-Balkar State Agrarian University, Nalchik, Russian Federation

[4] Dagestan State Agrarian University named after M.M. Dzhambulatov, Makhachkala, Russian Federation

[5] Ingush State University, Magas, Russian Federation

[6] Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, Russian Federation

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

Suggested: 14.07.2026; Accepted: 03.09.2026; Published: 13.11.2026

Abstract

The article examines the critical role of the vertical profile of relative humidity (*RH*) in the processes of initiation, evolution and structural self-organisation of deep moist convection. Based on a complex analysis of literature data and the results of high-resolution numerical modelling (500 m horizontally, 200 m vertically), it is shown that the distribution of water vapour acts as the main thermodynamic regulator (‘hidden architect’) of convective systems. The tools of bifurcation theory (including Poincaré–Andronov–Hopf bifurcations and saddle-node transitions) were applied to the analysis of convective cloud evolution. It has been established that exceeding the threshold value of *RH* > 60–65% in the middle troposphere (800–500 hPa) triggers an abrupt (bifurcation) transition from suppressed cumulus cloud cover to powerful cumulus-rain systems. The mechanisms of non-linear interaction between ambient humidity and the processes of turbulent entrainment, precipitation microphysics and condensation cloud nuclei (*CCN*) concentrations are examined.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Keywords: vertical humidity profile, deep convection, turbulent entrainment, available convective potential energy (CAPE), convective inhibition (CIN), bifurcation theory, cloud condensation nuclei (CCN), numerical modelling.

Введение

Одной из фундаментальных проблем физики атмосферы и динамики метеорологических процессов остается точный прогноз времени, места и интенсивности развития глубокой влажной конвекции. Традиционные методы оценки конвективной нестабильности, опирающиеся преимущественно на интегральные характеристики, такие как доступная конвективная потенциальная энергия (*CAPE*) и задерживающий слой, или конвективное торможение (*CIN*), часто демонстрируют ограниченную прогностическую точность. На практике нередки ситуации «заряженной, но не стреляющей» атмосферы, когда высокие значения *CAPE* не реализуются в реальные грозовые штормы из-за наличия подавляющих и размывающих факторов в вертикальном профиле термодинамических параметров. Например, сухой воздух в нижней тропосфере приводит к росту уровня конденсации (*LCL*) и увеличению *CIN*, блокируя реализацию даже экстремальных запасов *CAPE*. Современные исследования акцентируют внимание на том, что однослойные параметры недостаточны: вероятность глубокой конвекции существенно полнее описывается интегральным влагосодержанием «столба» и его вертикальным распределением [1]. Поэтому многоуровневые индексы (например, *K*-индекс или Total Totals (итоговый — общих сумм)) традиционно показывают более высокую прогностическую способность, так как неявно учитывают влажность средней тропосферы.

Исторически концепции конвективной неустойчивости, заложенные в середине XX века, рассматривали атмосферную влагу преимущественно в приземном слое. Однако современные наблюдения и численные эксперименты доказывают, что синоптическая изменчивость влажности в средней и верхней тропосфере способна радикально менять вектор развития конвекции даже при идентичных температурных профилях [2]. Главным фактором, ограничивающим рост облака, является вовлечение, которое в несколько более широком понятии известно за рубежом как энтрейнмент. В метеорологии энтрейнмент — это явление в атмосфере, когда турбулентный поток захватывает не турбулентный поток. Обычно это относится к захвату потоком с высокой влажностью окружающего сухого воздуха.

Захват окружающего не турбулентного воздуха восходящим потоком хорошо описано в работе [3]. Когда конвективное ядро вовлекает сухой воздух средней тропосферы с высот приблизительно 3–5 км, происходит мгновенное испарение части облачных капель. Этот процесс является эндотермическим, поглощает скрытую теплоту фазового перехода и резко снижает виртуальную температуру объема. Как следствие, плавучесть облака падает, и восходящий поток распадается. Во влажной среде с относительной влажностью (*RH*) более 50–60% энтрейнмент менее разрушителен, так как вовлекаемый воздух близок к состоянию насыщения, испарение минимально, и поток сохраняет кинетическую энергию. Концепция «глубокого втока» (deep-inflow mixing) показывает, что подъёмная сила восходящего ядра определяется влагосодержанием всего слоя свободной тропосферы, а не только пограничного слоя, чем и объясняется чувствительность инициации конвекции к влажности на высотах 3–5 км [3], [4]. Согласно исследованиям [5], [6] высокая относительная влажность среднего слоя тропосферы выступает «пороговым» условием перехода от мелкой кучевой облачности (*Cumulus humilis*, *mediocris*) к мощной кучево-дождевой (*Cumulus congestus*, *Cumulonimbus*). Спутниковые данные свидетельствуют, что переход к интенсивной конвекции и осадкам по достижении критического значения влагосодержания происходит резко и обладает статистическими признаками непрерывного фазового перехода: интенсивность осадков нарастает над критической точкой по степенному закону, а дисперсия отклика достигает максимума вблизи неё [7]. Эмпирически установлено, что осадки начинают резко нарастать лишь после превышения насыщения в столбе для влаги критического порога (доли насыщения порядка 0,7), что подтверждает пороговый, а не линейный характер отклика конвекции на увлажнение [4].

Вертикальный профиль влажности жестко детерминирует состав и структуру осадков (дождь, ливень, град). В умеренно сухой среде сильное испарение под облаком порождает мощные нисходящие потоки — микробарсты. Охлажденный воздух, достигая поверхности земли, растекается, формируя массу холодного воздуха окруженную более теплым воздухом, так называемый «холодный бассейн» (cold pool) или карман холодного воздуха. Фронт порывов часто развивающийся от этого холодного кармана служит динамическим триггером для инициации новых конвективных ячеек на границе раздела сред [8]. Именно такой механизм самоподдержания холодными карманами лежит в основе организации мезомасштабных конвективных систем (МКС) — крупнейших из конвективных процессов, формирующих сплошные области осадков протяжённостью не менее 100 км [9]. Однако чрезмерно сухая среда приводит к полной диссипации системы. Так, фундаментальные физические принципы, сформулированные в работе [10], указывают на важность толщины приземного влажного слоя и негативное влияние сухих прослоек. Эффекты влияния содержания влаги неразрывно связаны с концентрацией аэрозолей. В работе [11] было продемонстрировано явление аэрозольного «омоложения» конвекции (convective invigoration): при высоком содержании ядер конденсации формируется мелкокапельный спектр, замедляется гравитационное осаждение осадков, и облако способно развиваться и существовать даже в относительно сухой окружающей среде за счет задержки раннего выпадения осадков.

Таким образом, вертикальное распределение водяного пара оказывает определяющее влияние на все стадии жизненного цикла конвективного облака [12], [13]. Влага регулирует преодоление начального барьера конденсации, поддерживает плавучесть восходящих потоков вопреки эффектам испарительного охлаждения при перемешивании и определяет структуру и интенсивность выпадающих осадков.

Целью настоящей работы является комплексное исследование влияния вертикальной структуры влагосодержания в тропосфере на формирование макро- и микроструктурных характеристик конвективных облаков, а также математическая формализация режимов конвекции с использованием аппарата теории бифуркаций.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие задачи:

- систематизированы данные многолетних наблюдений и результаты численного моделирования;

 © Авторы статьи / Authors of the article

- проведено детальное численное моделирование эволюции конвективного облака с варьированием профилей относительной влажности и последующим анализом бифуркационных переходов;
- выявлены ключевые физические механизмы влияния вертикального распределения влаги на инициацию и пространственную организацию облачных систем.

В рамках актуальности следует отметить, что в условиях глобальных климатических изменений фиксируется деформация вертикальных профилей термодинамических параметров. Согласно уравнению Клаузиуса–Клапейрона, с ростом температуры атмосферы ее влагоемкость увеличивается примерно на 7% на каждый градус Цельсия [14]. Это ведет к повсеместному росту абсолютной влажности и, как следствие, к увеличению среднепланетарных запасов энергии CAPE. При этом профиль относительной влажности меняется неоднородно [15]. В ряде регионов отмечается высушивание пограничного слоя и усиление приземных инверсий, что влечет за собой рост задерживающего слоя CIN. Происходит климатическая «поляризация конвективных явлений»: конвективные события становятся более экстремальными по интенсивности выпадающих осадков и разрушительной силе сопутствующих шквалов, но при этом приобретают более эпизодический, локальный характер. Эта тенденция согласуется с наблюдаемым ростом интенсивности короткоживущих ливней, обусловленным статистическим сдвигом от слоистых к конвективным осадкам, при котором ведущую роль в формировании экстремумов играют мезомасштабные конвективные системы [16]. Для их запуска требуются значительно более мощные динамические триггеры (например, выраженные атмосферные фронты или орографический подъем), способные преодолеть возросший барьер конвективного торможения, но в то же время преодолев этот барьер, характеризуются взрывным ростом.

Методы и принципы исследования

Для верификации теоретических положений и выявления нелинейных переходов было проведено численное моделирование с использованием детальной трехмерной негидростатической модели конвективного облака. Применённый подход опирается на сложившуюся традицию явного численного описания эволюции осадкообразующих конвективных облаков в рамках полных трёхмерных моделей [17], [18].

Моделирование реализовано в домене со следующими пространственными характеристиками:
- горизонтальное разрешение: $\Delta x = \Delta y = 500$ м;
- вертикальное разрешение: $\Delta z = 200$ м;
- верхняя граница домена: $z_{макс} = 10$ км;
- граничные условия на поверхности: Фиксированная температура подстилающей поверхности ($T_{пов.} = const$). Поток влаги с поверхности искусственно обнулен для изоляции влияния исходного (начального) вертикального профиля влажности воздуха.

В ходе экспериментов задавались три базовых типа синтетических профилей относительной влажности при неизменном профиле температуры (соответствующем умеренной неустойчивости):

1. Двухслойный профиль. Высокая влажность в пограничном слое (z<1,5 км), варьируемая влажность в свободной тропосфере (z>1,5 км).
2. Экспоненциальный профиль. Плавное убывание влажности с высотой по экспоненциальному закону: $RH(z) = RH_0 \cdot \exp(-z/H_R)$.
3. Профиль с «сухим окном». Высокая приземная и среднетропосферная влажность, прерываемая инверсионным сухим слоем толщиной 1–1,5 км на различных высотах.

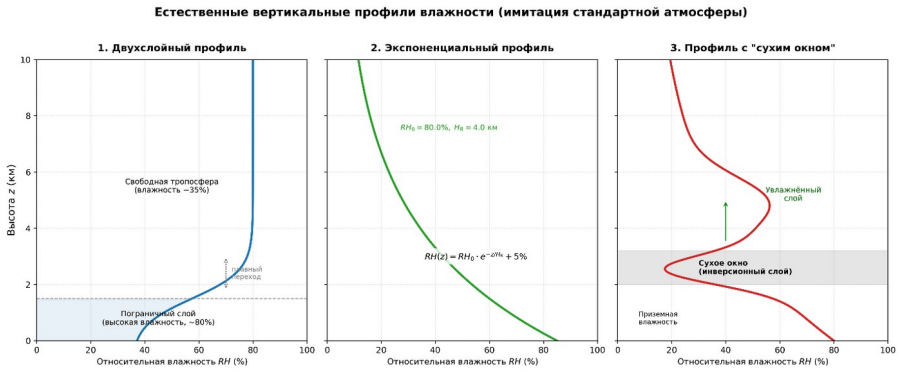


Рисунок 1 - Сценарии начальных вертикальных профилей относительной влажности
DOI: https://doi.org/10.60797/GEO.2026.9.2.1

На рисунке 1 слева приведен двухслойный профиль, он разделен на две зоны горизонтальной пунктирной линией инверсии/границы на высоте z = 1,5 км. В пограничном слое ниже 1,5 км задана стабильно высокая влажность (RH = 80%). Выше 1,5 км в свободной тропосфере показана область варьируемой влажности ΔRH, которая изменялась в численных экспериментах для поиска критических точек.

На рисунке 1 в центре — экспоненциальный профиль, он демонстрирует классическое плавное непрерывное убывание влажности с высотой:

 © Авторы статьи / Authors of the article

$$\mathrm{RH}(z) = \mathrm{RH}_0 \cdot \exp\left(-\frac{z}{H_R}\right)$$

В качестве основы был взят профиль с приземной влажностью RH_0 = 85% и характерным масштабом высоты H_R = 3,5 км.

Профиль с «сухим окном» дан на рисунке 1 справа, он моделирует сложную стратификацию атмосферы. В нижнем слое z < 2 км и в средней тропосфере 3,5 < z < 6 км поддерживается высокая влажность до 70–75%. В диапазоне высот от 2,0 до 3,5 км профиль прерывается резко очерченным инверсионным слоем — «сухим окном» (выделено серым затененным фоном), где влажность падает до 20%, что позволяет исследовать влияние задерживающих слоев на конвекцию.

В рамках разработанного авторами алгоритма была реализована схема непрерывного отслеживания фазового состояния облачной системы. Фиксировались следующие параметры: максимальная вертикальная скорость w_{max}, мощность облака *Hc*, и суммарное влагосодержание. Целью анализа являлось определение характера перехода системы из стационарного безоблачного или малооблачного состояния в режим глубокой конвекции при квазистатическом изменении управляющего параметра — относительной влажности в срединном слое RH_{mid}. Такой подход согласуется с трактовкой инициации глубокой конвекции как порогового (бифуркационного) перехода управляемой системы [7]. Анализировались два типа нелинейных переходов: седло-узловая бифуркация — скачкообразное исчезновение устойчивого состояния равновесия (слабое облако) и скачок на верхнюю ветвь (МКС); бифуркация Пуанкаре–Андронова–Хопфа рождение устойчивого предельного цикла, выражающееся в периодических автоколебательных режимах роста и затухания облачных ячеек.

Основные результаты и обсуждение

Серия численных экспериментов с шагом по влажности ΔRH = 2% и заданных параметрах профиля в слое 800–500 гПа позволила построить бифуркационную диаграмму состояний конвективной системы (рисунок 2).



Рисунок 2 - Бифуркационная диаграмма конвективных режимов
DOI: https://doi.org/10.60797/GEO.2026.9.2.2

Слева на рисунке 2 виден подавленный режим конвекции RH_{mid} < 45%, он отображен синей горизонтальной линией на уровне w_{max} < 2 м/с. На этом участке восходящие термики разрушаются энтрейнментом сухого воздуха. Формируются плоские облака хорошей погоды (*Cumulus humilis*). Точка RH_{mid} = 45% отмечена как точка бифуркации Хопфа, где система теряет устойчивость и переходит в автоколебательный режим. При RH_{mid} <45% восходящие термики полностью разрушаются энтрейнментом сухого воздуха на высотах 3–4 км [3], [6]. На рисунке 2 в центре визуализирован в виде оранжевой заштрихованной области квазистационарный колебательный режим 45% ≤ RH_{mid} ≤ 60% с кривой в диапазоне скоростей 2–6 м/с, отражающей пульсирующий характер развития облачности средней мощности (*Cumulus congestus*). В диапазоне 50–60% система испытывает серию затухающих колебаний (проявление бифуркации Хопфа), формируя пульсирующие облака средней мощности. На рисунке 2 справа — глубокая интенсивная конвекция RH_{mid} > 60%. При переходе через критический порог RH_{mid} = 60% вертикальной пунктирной линией перехода отмечен жесткий бифуркационный скачок. Скорость скачкообразно возрастает с верхнего предела колебательного режима до штормовых 15 м/с. Далее вверх уходит нелинейная красная кривая, стремящаяся к максимальным значениям вертикальной скорости до 45–60 м/с, что соответствует суперячейковым и мультиячейковым грозовым облакам (*Cumulonimbus*). Переход через критический порог RH_{mid} = 60% носит характер жесткого бифуркационного скачка: плавучесть восходящего потока сохраняется, термическая структура стабилизируется, и вертикальная скорость w_{max} возрастает нелинейно, достигая штормовых значений. Резкий, скачкообразный характер этого перехода согласуется с представлением о критической точке непрерывного фазового перехода в системе «влага — конвекция» [7]. Включение в модель блока микрофизики с учетом ядер конденсации (*CCN*) позволило выявить их

 © Авторы статьи / Authors of the article

двойственную роль. При фиксированной пороговой влажности $RH_{mid} \approx 60\%$ увеличение концентрации *CCN* с 100 см$^{-3}$ до 1500 см$^{-3}$ смещает точку бифуркации в сторону меньших значений влажности [11].

За счет дробления влаги на более мелкие капли скорость их гравитационного осаждения падает, радиационное выхолаживание вершины облака усиливается, что локально увеличивает верхнюю нестабильность [12]. Облако аккумулирует скрытую теплоту и живет дольше даже в условиях вовлечения умеренно сухого воздуха. Однако при экстремальном дефиците влаги $RH < 45\%$ даже избыток *CCN* не способен предотвратить испарительный коллапс системы.

Результаты подтвердили, что структура вертикального профиля влаги предопределяет эволюцию конвективной системы. Эксперименты показали, что профиль с «увлажнённой серединой» наиболее благоприятен для генерации изолированных долгоживущих суперячеек.

В условиях, когда нижний подтурбулентный слой умеренно сухой, а средний — влажный, генерируется интенсивный, но локализованный нисходящий холодный поток. Испарение крупных капель на границе облачной подошвы создает мощный горизонтальный градиент плотности. Передний фронт холодного фронта порывов дестабилизирует прилегающие участки атмосферы, динамически инициируя появление новых дочерних конвективных ячеек [8], [9]. Во влажной по всей высоте тропосфере конвекция носит хаотичный, пространственно дезорганизованный (локальный) характер, порождая обильные осадки, но обладая при этом меньшей кинетической энергией ветра.

Заключение

Вертикальный профиль относительной влажности выступает фундаментальным нелинейным регулятором («скрытым архитектором») глубокой влажной конвекции в тропосфере. Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Механизм энтрейнмента сухого воздуха является главным ингибирующим фактором, глушащим плавучесть конвективных термиков посредством испарительного охлаждения. По мере увеличения влажности среды деструктивное влияние энтрейнмента уменьшается.

2. Установлено наличие жестких количественных порогов влажности в средней тропосфере (RH>60–65% в слое 800–500 гПа), определяющих бифуркационный переход системы от подавленной кучевой облачности к мощным кучево-дождевым облакам.

3. Выявлен характер связи влажностного профиля с концентрацией ядер конденсации (*CCN*): высокое содержание аэрозолей способно частично компенсировать умеренный дефицит влаги в среде за счет перестройки микрофизического спектра капель и задержки осадков.

В качестве перспектив дальнейшей разработки темы планируется:

- расширение сравнительного анализа на трехмерные поля наблюдений с привлечением спутниковых данных высокого разрешения.
- применение методов машинного обучения (нейросетевых классификаторов) для автоматической диагностики и предсказания точек бифуркации по оперативным данным аэрологического зондирования.
- детальное моделирование микрофизических процессов льдообразования и разделения электрических зарядов в облаке в зависимости от влажности воздуха для верификации гипотезы о повышении доли положительных молниевых разрядов «облако-земля» в засушливых условиях.

Выявленные закономерности нелинейного отклика конвекции на профиль влаги имеют прямую практическую ценность для оперативной синоптики и численного прогноза погоды. Новейшие спутниковые профилемеры (включая методы радиозатменного зондирования GPS-RO, GNSS-RO и инфракрасные каналы геостационарных спутников) фиксируют микроструктурные 5-минутные колебания влажности среды [15]. Наблюдения показывают, что появление тонких влажных слоев предвосхищает зарождение облака за 30–40 минут до его радарного обнаружения. Внедрение алгоритмов, отслеживающих приближение профиля к выявленным нами критическим порогам RH (60–65%), позволяет заблаговременно прогнозировать взрывную конвекцию.

Следует отметить, что по мнению авторов, в дни с высоким риском опасных явлений погоды экономически оправдано переходить на учащенный запуск радиозондов (от четырех до восьми раз в сутки вместо стандартных двух). Это позволяет в реальном времени наблюдать трансформацию «запирающих» слоев (*CIN*) и регистрировать насыщение средней тропосферы влагой. Использование специализированных индексов триггера конвекции (например, Haines Index (HI) для сухих гроз или CTP/HI_low для оценки взаимодействия почвы и атмосферы) обеспечивает заблаговременное предупреждение о шквалах и порывах (микробарстах), развивающихся в специфических сухих профилях.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Список литературы / References

1. Holloway C.E. Moisture vertical structure, column water vapor, and tropical convective onset / C.E. Holloway, J.D. Neelin // Journal of the Atmospheric Sciences. — 2009. — Vol. 66. — № 2. — P. 365–383.

2. 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. — № 2. — P. RG2001.

3. 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. — № 604. — P. 3055–3079.

4. 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. — 2020. — Vol. 76. — № 4. — P. 965–987.

5. Torri G. On the role of midtropospheric humidity in regulating the onset and intensity of deep convection / G. Torri, J.O. Haerter // Geophysical Research Letters. — 2020. — Vol. 47. — № 11. — P. e2020GL087209.

6. Morrison H. Influences of environmental relative humidity and horizontal scale of subcloud ascent on deep convective initiation / H. Morrison, J.M. Peters, K.K. Chandrakar et al. // Journal of the Atmospheric Sciences. — 2022. — Vol. 79. — № 2. — P. 337–359.

7. Peters O. Critical phenomena in atmospheric precipitation / O. Peters, J.D. Neelin // Nature Physics. — 2006. — Vol. 2. — № 6. — P. 393–396.

8. Feng Z. Mechanisms of convective cloud organization by cold pools over tropical oceans / Z. Feng, S. Hagos, A.K. Rowe // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. — 2015. — Vol. 7. — № 2. — P. 357–381.

9. Houze R.A. Mesoscale convective systems / R.A. Houze // Reviews of Geophysics. — 2004. — Vol. 42. — № 4. — P. RG4003.

10. Emanuel K.A. Atmospheric Convection / K.A. Emanuel. — Oxford: Oxford University Press, 1994. — Vol. 1. — P. 580.

11. Fan J. Substantial convective invigoration by aerosols in pristine environments / J. Fan, D. Rosenfeld, Y. Zhang // Science. — 2019. — Vol. 359. — № 6374. — P. 411–415.

12. Дрофа А.С. Исследование воздействия гигроскопическими частицами на тёплое конвективное облако по результатам численного моделирования Исследование воздействия гигроскопическими частицами на тёплое конвективное облако по результатам численного моделирования / А.С. Дрофа // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. — 2011. — Т. 46. — № 3. — С. 357–367.

13. Алоян А.Е. Моделирование динамики и кинетики газовых примесей и аэрозолей в атмосфере / А.Е. Алоян. — Москва: Наука, 2008. — 415 с.

14. Trenberth K.E. The changing character of precipitation / K.E. Trenberth, A. Dai, R.M. Rasmussen et al. // Bulletin of the American Meteorological Society. — 2003. — Vol. 84. — № 9. — P. 1205–1217.

15. Островский Е.В. Тонкая структура вертикального профиля влажности, влияющая на распространение радиоволн в тропосфере / Е.В. Островский, М.Б. Фридзон // Научный вестник МГТУ ГА. — 2008. — №133. — С. 30–39.

16. Da Silva N.A. Super-Clausius–Clapeyron scaling of extreme precipitation explained by shift from stratiform to convective rain type / N.A. Da Silva, J.O. Haerter // Nature Geoscience. — 2025. — Vol. 18. — № 5. — P. 382–388.

17. Довгалюк Ю.А. Пример результатов расчётов эволюции осадкообразующего конвективного облака с помощью полной трёхмерной модели / Ю.А. Довгалюк, Н.Е. Веремей, М.А. Затевахин // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. — 2016. — № 582. — С. 92–115.

18. Ашабоков Б.А. Численное моделирование термодинамических и микроструктурных параметров конвективного облака в процессе его эволюции / Б.А. Ашабоков, А.В. Шаповалов, В.А. Шаповалов и др. // Итоги науки и техники. Современная математика и ее приложения. Тематические обзоры. — 2018. — Т. 154. — №. 10. — С. 22–31.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Holloway C.E. Moisture vertical structure, column water vapor, and tropical convective onset / C.E. Holloway, J.D. Neelin // Journal of the Atmospheric Sciences. — 2009. — Vol. 66. — № 2. — P. 365–383.

2. 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. — № 2. — P. RG2001.

3. 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. — № 604. — P. 3055–3079.

4. 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. — 2020. — Vol. 76. — № 4. — P. 965–987.

5. Torri G. On the role of midtropospheric humidity in regulating the onset and intensity of deep convection / G. Torri, J.O. Haerter // Geophysical Research Letters. — 2020. — Vol. 47. — № 11. — P. e2020GL087209.

6. Morrison H. Influences of environmental relative humidity and horizontal scale of subcloud ascent on deep convective initiation / H. Morrison, J.M. Peters, K.K. Chandrakar et al. // Journal of the Atmospheric Sciences. — 2022. — Vol. 79. — № 2. — P. 337–359.

7. Peters O. Critical phenomena in atmospheric precipitation / O. Peters, J.D. Neelin // Nature Physics. — 2006. — Vol. 2. — № 6. — P. 393–396.

8. Feng Z. Mechanisms of convective cloud organization by cold pools over tropical oceans / Z. Feng, S. Hagos, A.K. Rowe // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. — 2015. — Vol. 7. — № 2. — P. 357–381.

 © Авторы статьи / Authors of the article

9. Houze R.A. Mesoscale convective systems / R.A. Houze // Reviews of Geophysics. — 2004. — Vol. 42. — № 4. — P. RG4003.

10. Emanuel K.A. Atmospheric Convection / K.A. Emanuel. — Oxford: Oxford University Press, 1994. — Vol. 1. — P. 580.

11. Fan J. Substantial convective invigoration by aerosols in pristine environments / J. Fan, D. Rosenfeld, Y. Zhang // Science. — 2019. — Vol. 359. — № 6374. — P. 411–415.

12. Drofa A.S. Issledovanie vozdeistviya gigroskopicheskimi chastitsami na tyoploe konvektivnoe oblako po rezultatam chislennogo modelirovaniya Issledovanie vozdeistviya gigroskopicheskimi chastitsami na tyoploe konvektivnoe oblako po rezultatam chislennogo modelirovaniya [A study of the impact of hygroscopic particles on a warm convective cloud based on the results of numerical modeling] / A.S. Drofa // Izvestiya RAN. Fizika atmosferi i okeana [Proceedings of RAS. Physics of the Atmosphere and OceanProceedings of RAS. Physics of the Atmosphere and OceanProceedings of RAS. Physics of the Atmosphere and Ocean]. — 2011. — Vol. 46. — № 3. — P. 357–367. [in Russian]

13. Aloyan A.E. Modelirovanie dinamiki i kinetiki gazovy'x primesej i ae'rozolej v atmosfere [Modeling the dynamics and kinetics of gas impurities and aerosols in the atmosphere] / A.E. Aloyan. — Moscow: Nauka, 2008. — 415 p. [in Russian]

14. Trenberth K.E. The changing character of precipitation / K.E. Trenberth, A. Dai, R.M. Rasmussen et al. // Bulletin of the American Meteorological Society. — 2003. — Vol. 84. — № 9. — P. 1205–1217.

15. Ostrovskij E.V. Tonkaya struktura vertikal'nogo profilya vlazhnosti, vliyayushhaya na rasprostranenie radiovoln v troposfere [Fine structure of the vertical humidity profile influencing radio wave propagation in the troposphere] / E.V. Ostrovskij, M.B. Fridzon // Scientific Bulletin of MSTU SA. — 2008. — №133. — P. 30–39. [in Russian]

16. Da Silva N.A. Super-Clausius–Clapeyron scaling of extreme precipitation explained by shift from stratiform to convective rain type / N.A. Da Silva, J.O. Haerter // Nature Geoscience. — 2025. — Vol. 18. — № 5. — P. 382–388.

17. Dovgalyuk Yu.A. Primer rezul'tatov raschyotov e'volyucii osadkoobrazuyushhego konvektivnogo oblaka s pomoshh'yu polnoj tryoxmernoj modeli [An example of the results of calculations of the evolution of a precipitation-forming convective cloud using a full three-dimensional model] / Yu.A. Dovgalyuk, N.E. Veremej, M.A. Zatevaxin // Proceedings of the A. I. Voeikov Main Geophysical Observatory. — 2016. — № 582. — P. 92–115. [in Russian]

18. Ashabokov B.A. Chislennoe modelirovanie termodinamicheskikh i mikrostrukturnikh parametrov konvektivnogo oblaka v protsesse yego evolyutsii [Numerical modeling of thermodynamic and microstructural parameters of a convective cloud during its evolution] / B.A. Ashabokov, A.V. Shapovalov, V.A. Shapovalov et al. // Itogi nauki i tekhniki. Sovremennaya matematika i yee prilozheniya. Tematicheskie obzori [Results of science and technology. Modern mathematics and its applications. Thematic reviews]. — 2018. — Vol. 154. — №. 10. — P. 22–31. [in Russian]