

Некоторые результаты исследований роли взаимодействия процессов в конвективных облаках в формировании их макро- и микроструктурных характеристик

Ашабоков Борис Азреталиевич
Институт информатики и проблем регионального
управления КБНЦ РАН
Нальчик, КБР, Россия
ashabokov.boris@mail.ru

Тумгоева Хадижат Абукаровна
Ингушский государственный университет
Магас, ИР, Россия
hadiga-71@mail.ru

Лесев Вадим Николаевич
Кабардино-Балкарский государственный университет
имени Х.М. Бербекова
Нальчик, КБР, Россия
pr_ur@kbsu.ru

Шаповалов Виталий Александрович
Высокогорный геофизический институт
Нальчик, КБР, Россия
vet555_83@mail.ru

Аннотация Отмечено, что настоящий период времени является переходным для физики облаков: происходит переход от этапа изучения "элементарных" процессов в облаках к этапу изучения облаков в целом с учетом их системных свойств. Одним из направлений развития данного научного направления на наступающем этапе его развития является изучение роли их системных свойств в процессах облакообразования. Приводятся методология, модель и некоторые результаты численного исследования роли эмерджентных свойств облаков в формировании их микроструктурных характеристик.

Abstract. It is noted that the present time period is transitional for cloud physics: there is a transition from the stage of studying "elementary" processes in clouds to the stage of studying clouds as a whole, taking into account their system properties. One of the directions of development of this scientific direction at the coming stage of its development is the study of the role of their systemic properties in the processes of cloud formation. The methodology, model and some results of numerical investigation of the role of emergent properties of clouds in the formation of their microstructural characteristics are presented.

Ключевые слова: конвективные облака, эмерджентные свойства облаков, механизм взаимодействия, деформация полей термодинамических параметров, град.

Keywords: convective clouds, emergent properties of clouds, interaction mechanism, deformation of fields of thermodynamic parameters, hail.

I. ВВЕДЕНИЕ

В работе [2] было показано, что примерно с начала 90-х годов в развитии физики облаков и активных воздействий на них появились тенденции, указывающие на замедление ее развития. Причиной этих негативных тенденций, как отмечено в данной работе, является то, что настоящий период времени является переходным для данного научного направления: происходит переход от этапа исследования "элементарных" процессов в облаках

к этапу изучения формирования их макро- и микроструктурных характеристик с учетом их системных свойств.

Важно отметить, что переход научного направления от одного этапа развития к другому не может быть одномоментным, для этого требуется время, иногда достаточно длительное. В настоящее время нельзя сказать, что все процессы в облаках изучены на достаточном уровне, есть такие процессы, которые не до конца поняты даже на качественном уровне [6]. В большей степени это относится к микрофизическим процессам: к процессам образования и роста первичных капель и кристаллов, к процессам электризации облачных частиц и формирования электрической структуры облаков, к взаимодействию частиц реагентов с облачной средой и т.д.

Такое состояние исследований этих процессов не позволяет формализовать их, препятствует учету их в численных моделях облаков и становится источником серьезных неопределенностей при численном исследовании облаков. С этим связано и то, что на пути агрегирования результатов "элементарных" процессов в облаках, которое возможно только в рамках численных моделей, и, таким образом, на пути развития математического моделирования облаков возникают серьезные трудности. Поэтому на наступающем этапе развития физики облаков продолжение изучения "элементарных" процессов в облаках останется одним из важнейших направлений исследований.

Новым направлением исследований в физике облаков на этом этапе является исследование роли системных свойств облаков в формировании их макро- и микроструктурных характеристик. Такими свойствами являются взаимодействие процессов в облаках и взаимодействие облаков с окружающей их атмосферой, которая является вышестоящей системой для облаков. Именно эти свойства являются структурообразующими для систем, в том числе для облаков [11].

Можно заметить, что на следующих этапах развития физики облаков роль математического моделирования, как метода исследования, значительно повышается, оно становится основным методом исследования. Поэтому повышаются и требования к моделям облаков. Отметим, что в последние годы наблюдается повышение внимания к разработке многомерных и нестационарных численных моделей конвективных облаков. В работе [2] приведена трехмерная нестационарная модель конвективных облаков с детальным учетом процессов, в том числе и микрофизических. В работе [3] приводится такая же модель, но микрофизические процессы в ней учитываются в параметризованном виде.

Остановимся в краткой форме на основных проблемах проведения исследований роли системных свойств облаков в их образовании и развитии. Относительно механизмов взаимодействия облаков с окружающей их атмосферой можно отметить, что их достаточно много и в связи с этим для изучения их роли в процессах облакообразования возникает необходимость выделения наиболее важных из них, также возникает необходимость разработки эффективных методологий, моделей и методов проведения исследований, позволяющих оперативно проводить массовые численные эксперименты и анализировать получающуюся при этом информацию.

Что касается исследований роли взаимодействия процессов в облаках (эмерджентных свойств облаков), то возникающие в данном направлении проблемы носят более сложный характер. Они заключаются в том, что выделение конкретных механизмов взаимодействия облачных процессов для исследования их роли возможно в ограниченных случаях и возникает необходимость использования других подходов. К ним, по нашему мнению, относится подход, используемый в настоящей работе и основанный на использовании для проведения исследований косвенных проявлений этих свойств. Но в данном случае проведение исследований может потребовать разработки новых моделей и методов.

Очевидно, что количество публикаций, посвященных результатам исследований по отмеченным направлениям, существенно ограничено. В работах [2,20] приводятся результаты моделирования роли структуры поля ветра в атмосфере в формировании грозоградовых облаков, т.е. в исследованиях рассматривался механизм взаимодействия облаков и атмосферы, который обусловлен полем ветра в атмосфере. Исследования проводились на основе трехмерной нестационарной модели [2].

Но на то, что поле ветра в атмосфере в состоянии оказать существенное влияние на процессы облакообразования, внимание обратили относительно давно. Можно, например, отметить работы [5–27], в которых приведены некоторые результаты исследований в данном направлении. Из этих работ в [5, 9, 10, 17–19] исследования проводились путем радиолокационного наблюдения за процессами образования и развития облаков при различных полях ветра в атмосфере. Но детальное исследование роли данного фактора возможно только на основе математического моделирования. В работах [12, 14, 16, 21, 23–27] исследования в этом направлении проводились на основе численного моделирования.

В краткой форме остановимся на состоянии активного воздействия (АВ) на конвективные облака. Можно сказать, что оно носит достаточно сложный и неоднозначный характер. В основе используемых для управления процессами осадкообразования в конвективных облаках технологий до настоящего времени, можно сказать, лежат не методы АВ, полученные в результате строгих исследований, а концепции, предложенные в прошлом столетии. Но с учетом недостаточной изученности облачных процессов и связанной с ней существенной ограниченностью наших знаний о закономерностях формирования макро- и микроструктурных характеристик облаков предложение научно обоснованных концепций АВ на такие сложные и нелинейные системы, как конвективные облака, не представляется возможным. В связи с этим и с учетом повышения потребности в эффективных технологиях управления процессами осадкообразования в облаках актуальность разработки научно обоснованных методов АВ существенно повышается.

Задачи, возникающие на этом пути, можно сформулировать в виде [1]:

- нахождение локальной области в облаке, в которой условия благоприятны для достижения целей активного воздействия;
- определение концентрации частиц реагента, которую следует обеспечить в данной области в каждый момент времени.

На пути решения этих задач возникают серьезные трудности. В большей степени это касается второй задачи. Использование моделей облаков для решения этих задач пока еще сводится к перебору различных вариантов внесения реагента, причем, для этой цели могут использоваться самые различные модели [2, 4, 7, 13, 15]. Среди них могут быть и такие, которые не подходят для решения этих задач. Очевидно, что результаты решения отмеченных задач, полученные таким способом, могут оказаться не самыми удачными, что делает разработку методологий и методов их решения актуальной проблемой. Отметим еще, что необходимость интенсификации проведения исследований по отмеченным выше направлениям, включая исследования по развитию методов АВ на облака с целью регулирования осадков и предотвращения градобитий, связана еще и с тем, что, несмотря на ограниченность наших знаний о процессах формирования макро- и микроструктурных характеристик конвективных облаков, практические работы по АВ на облака приняли широкие масштабы.

Ниже остановимся на методологии и некоторых результатах исследования роли взаимодействия процессов в конвективных облаках в формировании их микроструктурных характеристик.

II. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЙ

Методология проведения исследований роли взаимодействия процессов в облаках в формировании их микроструктурных характеристик, как было отмечено, основана на использовании для этой цели проявления этого взаимодействия. В качестве такого проявления данного системного свойства облаков в настоящей работе используется деформация поля температуры в облаке по

сравнению с ее полем в окружающей атмосфере. Она, как известно, связана с взаимодействием динамических, термодинамических и микрофизических процессов в облаке. Исследование ее роли проводилось для мощных несимметричных градовых облаков. Для этой цели использовалась двумерная численная модель микрофизических процессов в градовых облаках на фоне заданной гидротермодинамики. Микрофизические процессы в модели описываются детально. Она позволяет проследить процессы формирования микроструктуры облака для различных вариантов деформаций поля температуры.

В модели учитываются такие микрофизические процессы, как коагуляция капель, аккреция, замерзание капель, осаждение облачных частиц в поле силы тяжести, а также их перенос воздушными потоками [20]. Система уравнений, которые описывают изменение в пространстве и во времени функций распределения по массам капель $f_1(x,z,m,t)$ и ледяных частиц $f_2(x,z,m,t)$, записывается в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_1}{\partial t} + V_x \frac{\partial f_1}{\partial x} + (V_z - V_1) \frac{\partial f_1}{\partial z} &= \left[\frac{\partial f_1}{\partial t} \right]_k + \left[\frac{\partial f_1}{\partial t} \right]_a + \\ &+ \left[\frac{\partial f_1}{\partial t} \right]_o + \left[\frac{\partial f_1}{\partial t} \right]_s + \frac{\partial}{\partial x} K \frac{\partial f_1}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial f_1}{\partial z} + I_1, \quad (1) \\ \frac{\partial f_2}{\partial t} + V_x \frac{\partial f_2}{\partial x} + (V_z - V_2) \frac{\partial f_2}{\partial z} &= \left[\frac{\partial f_2}{\partial t} \right]_a + \left[\frac{\partial f_2}{\partial t} \right]_s + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} K \frac{\partial f_2}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial f_2}{\partial z} + I_2 + u \\ 0 \leq x \leq L_x, 0 \leq z \leq L_z, 0 \leq m < \infty, t > 0, \end{aligned}$$

где $V_x(x,z)$ и $V_z(x,z)$ – составляющие вектора скорости воздушных потоков по осям Ox и Oz ; $V_1(m)$, $V_2(m)$ – установившиеся скорости падения капель и ледяных частиц; $K(x,z)$ – коэффициент турбулентной диффузии; $\left[\frac{\partial f_1}{\partial t} \right]_k$, $\left[\frac{\partial f_1}{\partial t} \right]_a$, $\left[\frac{\partial f_1}{\partial t} \right]_d$, $\left[\frac{\partial f_1}{\partial t} \right]_s$ – изменения функции распределения капель за счет процессов коагуляции, аккреции, дробления и замерзания капель; $\left[\frac{\partial f_2}{\partial t} \right]_a$, $\left[\frac{\partial f_2}{\partial t} \right]_s$ – изменения функции распределения кристаллов за счет аккреции и замерзания капель; L_x , L_z – верхние значения границ пространственной области.

Для проведения расчетов применялся метод расщепления по физическим процессам.

Функции $I_1(x,z,m,t)$, $I_2(x,z,m,t)$ описывают образование капель и кристаллов в естественных условиях, функция $u(x,z,m,t)$ образование искусственных кристаллов при активном воздействии, т.е. при внесении частиц льдообразующего реагента.

Система уравнений (1) дополняется начальными и граничными условиями, соответственно (2) и (3):

$$\begin{aligned} f_1(x,z,m,0) &= f_1^0(x,z,m) \\ f_2(x,z,m,0) &= f_2^0(x,z,m) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} f_1(x,z,m,t) &= f_2(x,z,m,t) = 0 \\ \text{при } x=0, x=L_x, z=L_z, \\ \frac{\partial f_2(x,z,m,t)}{\partial z} &= \frac{\partial f_2(x,z,m)}{\partial z} = 0 \\ \text{при } z=0. \end{aligned} \quad (3)$$

Дискретные значения x_i и z_j и m_n задавались в виде:

$$x_i = i \cdot 1000 \text{ м}, i \in [0:30];$$

$$z_j = j \cdot 500 \text{ м}, j \in [0:30];$$

$$m_0 = 2 \cdot 10^{-10} \text{ г}, m_{n+1} = 2 \cdot m_n, n \in [1:39].$$

Размеры ледяных частиц рассчитаны в предположении, что плотности льда $\rho = 0,9 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$.

Поля скоростей воздушных потоков в облаке, как было отмечено, в модели заданы и не меняются с течением времени, для их построения использовались эмпирические модели структуры воздушных потоков в мощных кучево-дождевых облаках, а также ее характеристики, полученные в результате измерений. В передней и центральной частях облака расположены области восходящих потоков, максимальное значение скорости составляет 35 м/с. В нижней половине тыловой части облака расположена область нисходящих потоков. Такая структура воздушных потоков характерна для мощного градового облака. Она соответствует вертикальному разрезу облака, находящегося в квазистационарном состоянии, вдоль направления его движения. Составляющие вектора скорости воздушных потоков V_x и V_z найдены путем интерполяции их значений на крупной сетке, а их значения в узлах сетки (x_i, z_j) , $(i, j = 1, 2, 3, \dots, n)$ на основе двумерной кубической сплайн-интерполяции. При определении поля температуры в облаке учитывалось, что под влиянием восходящих потоков и фазовых переходов воды происходит его деформация по сравнению с полем температуры в атмосфере [8]. Максимальное отклонение температуры в облаке от ее значения в атмосфере на таком же уровне ΔT определялось на основе экспериментальных данных. Было предположено, что оно составляет 13 °C–14 °C. В области нисходящих потоков воздуха значения ΔT отрицательны, а максимум равен 4 °C – 5 °C.

Было предположено, что в начальный момент времени спектр капель описывается формулой Хргиана-Мазина, а спектр кристаллов гамма-распределением [8]. Пространственное распределение жидких и твердых частиц в начальный момент задавалось в соответствии с полем температуры в облаке и принятой динамикой. Наибольшая концентрация капель наблюдается в центре облака и составляет 800 см^{-3} .

Модель позволяет использовать различные поля скоростей воздушных потоков, при этом их вид определяется типом моделируемого облака. Для моделирования симметричных градовых облаков использовалась такая структура поля скоростей, которая характерна для них. При моделировании мощных облаков его структура задавалась по Браунингу и Футу [22].

Из системы уравнений (1) можно заметить, что процессы диффузионного роста облачных частиц в модели в явном виде отсутствуют. Учет этих процессов в модели осуществляется через начальные функции распределения и источники частиц. Предположено, что начальные распределения капель и кристаллов, которые описываются формулой Хргиана-Мазина и гамма-функцией, сформированы под влиянием процессов конденсации и сублимации, в дальнейших изменениях функций распределения частиц в облаке роль этих процессов незначительна.

В табл. 1, например, приводятся значения концентрации ледяных частиц в начальный момент времени на разных уровнях в плоскости XOZ.

ТАБЛИЦА 1. КОНЦЕНТРАЦИЯ ЛЕДЯНЫХ ЧАСТИЦ В НАЧАЛЬНЫЙ МОМЕНТ НА РАЗНЫХ УРОВНЯХ В ЦЕНТРЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ ОБЛАКА ($x=15$ км)

z (км)	T (°C)	n (м ⁻³)
10	-30	990
9	-21,5	180
8	-15	47
7	-9,6	9,7
6	-4,8	1,6
5	-0,5	0,4

Можно заметить, что концентрация кристаллов увеличивается по высоте с уменьшением температуры, т.к. возрастает вероятность замерзания капель. Кроме этого, они переносятся вверх восходящими потоками воздуха. Более быстрыми темпами она увеличивается, начиная примерно с температурного уровня -10 °C.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ

Остановимся на результатах исследования роли взаимодействия процессов в формировании их микроструктуры. Для этой цели были проведены расчеты с использованием различных вариантов структуры поля скоростей воздушных потоков в облаке с соответствующими им отклонениями температуры в облаке от ее значения в атмосфере.

Результаты расчетов показали, что на образование и рост зародышей градин существенное влияние оказывает величина деформации поля температуры, которая определяется характеристиками восходящих воздушных потоков и процессов фазовых переходов воды. Важно отметить, что при отсутствии такой деформации для образования градовых частиц в облаке требуются нереально большие водности, примерно 80 г/м³, т.е. можно сказать, что в этом случае в облаке град не образуется. Он образуется, начиная с некоторой величины ΔT , определяемой параметрами облака.

На рис. 1 приведены изолинии параметров облака на 18 и 24 мин. его развития, в случае, ΔT примерно равно 13 °C. Можно заметить, что в верхней части области, расположенной над и между изотермами -10 °C и -25 °C происходит формирование кристаллов, с диаметрами в интервале $2-5$ мм. Они являются зародышами градин и, находясь между этими изотермами, смещаются влево и вниз. Одновременно происходит увеличение их концентрации за счет поступающих снизу замерзших относительно крупных капель, а также их рост за счет переохлажденных капель, поступающих снизу в область между отмеченными изотермами. Таким образом, под влиянием взаимодействия процессов в мощных градовых облаках происходит формирование протяженной зоны, в которой условия благоприятны для образования и роста градовых частиц. Деформация поля температуры способствует увеличению протяженности данной зоны и, как следствие, увеличению времени нахождения в ней градовых частиц и, таким образом, образованию крупных градин.

Для сравнения отметим, что, согласно результатам изотопного анализа градин, модальные значения температуры зарождения града на крупяных зародышах составляет -20 °C... -25 °C, а на замерзших каплях примерно -10 °C. Согласно этим же исследованиям, рост града происходит в температурном интервале -10 °C ... -25 °C.

Таким образом, можно сказать, что результаты расчетов температурных условий образования и роста зародышей градин согласуются с результатами, полученными экспериментальным путем. Результаты расчетов указывают еще на то, что формирование слоистой структуры градин обусловлено изменениями режима их роста при движении в интервале температур -10 °C ... -25 °C, а не движениями вверх и вниз по вертикали, кроме этого, они четко показывают, что деление облака в вертикальном или горизонтальном направлении на зоны (зона зарождения града, зона роста града и т.д.), как это принято в настоящее время, не соответствует реальной картине.

Таким же образом радиолокационная структура градовых облаков в целом подтверждает полученную в результате расчетов схему образования градовых осадков в облаках, а также роль взаимодействия процессов гидротермодинамики и микрофизики в формировании их микроструктуры. Важно еще отметить, что, как показывают результаты расчетов, формирование так называемой "зоны аккумуляции" в облаке не наблюдается.

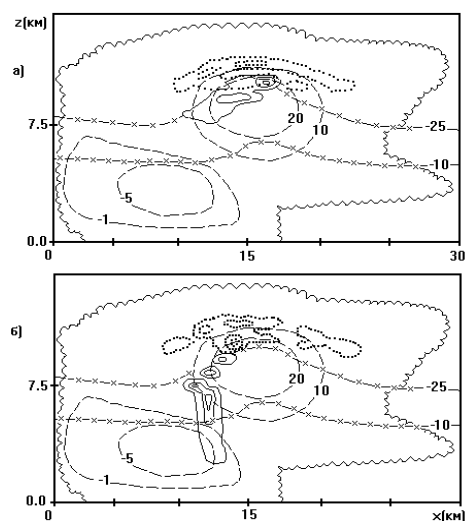


Рис. 1. Изолинии параметров облака при $t = 18$ мин (а) и $t = 24$ мин (б):

- _____ изолинии концентрации крупных градин с $d=2$ см;
- изолинии концентрации кристаллов с $d=2-5$ мм;
- x-x-x- изолинии температуры;
- изолинии скорости вертикальных потоков

На рис. 1 видно, что в температурном интервале от значений -10 °C до -25 °C изолинии концентрации крупных градин образуют замкнутые области. Это свидетельствует о том, что происходит циклическое изменение интенсивности градовых осадков из облака. Объяснение причин такого поведения характеристик осадков не представляется возможным. Среди процессов, приводящих к образованию и росту частиц осадков, отсутствуют циклические процессы. Поэтому, видимо, можно предположить, что такая особенность выпадения осадков из облаков обусловлена взаимодействием облачных процессов.

Очевидно, что в реальных условиях структуры воздушных потоков и поля температуры в облаке могут оказаться значительно более сложными, чем использованные при проведении расчетов. Таким же образом, деформация поля температуры может носить более

сложный характер, чем на рис. 1. В связи с этим заданное поле температуры в модели, можно сказать, носит осредненный характер. В реальных условиях рассматриваемая часть облака, в которой происходит образование и рост градовых частиц, видимо, будет состоять из взаимодействующих между собой неоднородностей, в которых температура выше, чем в окружающей атмосфере.

IV. ВЫВОДЫ

1) Дальнейший прогресс физики облаков и активных воздействий на них связан с изучением закономерностей формирования макро- и микроструктурных характеристик облаков с учетом их системных свойств, с разработкой новых эффективных технологий управления процессами осадкообразования в конвективных облаках, основанных на новых представлениях о закономерностях формирования их макро- и микроструктурных характеристик, с развитием численного моделирования облаков.

2) Предложены методология и модель и на их основе проведены численные эксперименты по исследованию влияния взаимодействия процессов в облаках на формирование их микроструктурных характеристик.

3) Исследования показали, что роль взаимодействия процессов в облаках значительна в процессах облако- и осадкообразования. Данное системное свойство существенным образом влияет на формирование структуры облака.

4) Под влиянием взаимодействия процессов в мощных градовых облаках формируется протяженная зона, в которой условия благоприятны для образования и роста градовых частиц. Она расположена между изотермами - 10 °С ... - 25 °С, образование, движение и рост градин происходит в данной зоне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Шаповалов А.В. Разработка нового физического принципа воздействия на градовые процессы кристаллизующим реагентом на основе численного моделирования // Доклады Третьей международной научной конференции с элементами научной школы «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата». – Ставрополь, 2018. – С. 39-42.
2. Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Шаповалов А.В., Шаповалов В.А. Физика облаков и активных воздействий на них. – Нальчик: Печатный двор. 2017. – 240 с.
3. Веремей Н.Е., Довгалою Ю.А., Затевахин М.А., Игнатьев А.А., Морозов В.Н., Пастушков Р.С. Описание базовой численной нестационарной трехмерной модели конвективного облака // Труды ГГО. – 2016. – Вып. 282. – С. 45-91.
4. Владимиров С.А., Пастушков Р.С. Комплексный метод активных воздействий на конвективные облака с целью регулирования осадков. Трехмерное численное моделирование // Труды ГГО. – 2016. – Вып. 582. – С. 116-127.
5. Ковальчук А.Н. О влиянии ветрового сдвига на выпадение града // Труды ВГИ. – 1969. – Вып. 14. – С. 39-48.
6. Коган Е.Л., Мазин И.П., Сергеев Б.Н., Хворостянов В.И. Численное моделирование облаков. – М.: Гидрометеоздат, 1984. – 185 с.
7. Кузнецов И.Е., Страшко О.В., Дорофеев В.В., Гоцев Д.В. Математическая модель характеристик конвективно-неустойчивой атмосферы с учетом микрофизических процессов в облаках // Сборник трудов ИТНТ-2018 «Информационные технологии и нанотехнологии». 24–27 апреля 2018 года. – Самара: Предприятие "Новая техника", 2018. – С. 1566-1575.
8. Мазин И.П., Шметер С.М. Облака. Строение и физика образования. – Л.: Гидрометеоздат, 1983. – 280 с.
9. Макитов В.С., Инюхин В.С., Куцев С.А., Лиев К.Б. Формирование градового облака при слиянии конвективных ячеек // Физика атмосферы и океана. – 2022. – Т. 58, №. 4. – С. 448-455. – DOI: 10.31857/S0002351522040095.
10. Мальбахова Н. М. Взаимосвязь структуры градовых облаков с вертикальной структурой ветра в атмосфере // Труды ВГИ. – 1990. – Вып. 80. – С. 99-106.
11. Месарович М., Такакура Я. Общая теория систем: математические основы. – М.: Мир, 1978. – 381 с.
12. Ньютон Ч.У. Гидродинамическое взаимодействие с окружающим полем ветра как один из факторов развития кучевых облаков // Динамика кучевых облаков. – М.: Мир, 1964. – С. 187-201.
13. Павлов Г.С. Моделирование гидротермодинамики кучевых облаков на естественных и альтернативных ядрах конденсации в атмосфере Земли // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. – 2020. – №. 6 (80). – С. 48-56.
14. Пастушков Р.С. О развитии кучевых облаков в атмосфере с вертикальным сдвигом ветра // Метеорология и гидрология. – 1969. – № 4. – С. 26-41.
15. Пастушков Р.С. Модель активных воздействий на конвективные облака льдообразующими аэрозолями // Труды ГГО. – 2016. – Вып. 582. – С.128-157.
16. Пастушков Р.С. Численное моделирование взаимодействия конвективных облаков с окружающей их атмосферой // Труды ЦАО. – 1972. – Вып. 108. – С. 93-97.
17. Томашова А.С. Особенности полей температуры и ветра при формировании мезомасштабных конвективных систем // Азимут геонаук : Материалы Междисциплинарной молодежной научной конференции, Томск, 07–09 декабря 2021 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2022. – С. 76-80.
18. Федосеева Е.В. и др. Исследование процессов формирования и развития опасных атмосферных метеоявлений, связанных с эволюцией конвективной облачности // Распространение радиоволн. – 2019. – С. 258-262.
19. Федченко Л.М., Гораль Г.Г., Беленцова В.А., Мальбахова Н.М. Опасные конвективные явления и их прогноз в условиях сложного рельефа. – М.: Гидрометеоздат. 1991. – 425 с.
20. Ashabokov B.A., Fedchenko L.M., Shapovalov A.V., Kalov N.H., Kalov R.H., Sherieva M.A., Shapovalov V.A. Mathematical Modeling of the Influence of the Wind Field Structure in the Atmosphere on the Cloud // ACS. – 2018. – Vol. 8, No. 1. – P. 84-96.
21. Baur F., Keil C., Barthlott C. Combined effects of soil moisture and microphysical perturbations on convective clouds and precipitation for a locally forced case over Central Europe // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2022. – DOI: 10.1002/qj.4295.
22. Browning K.A., Foote G.B. Airflow and hail growth in supercell storms and some implications for hail suppression // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 1976. – Vol. 102, No. 433. – P. 499-533.
23. Miltenberger A.K. et al. Aerosol–cloud interactions in mixed-phase convective clouds. Part 2: Meteorological ensemble // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2018. – Vol. 18, No. 14. – P. 10593-10613.
24. Onishi R., Takahashi K. A Warm-Bin–Cold-Bulk Hybrid Cloud Microphysical Model // Journal of the Atmospheric Sciences. – 2012. – 69. – P. 1474-1497.
25. Shpund J., Khain A., Rosenfeld D. Effects of sea spray on microphysics and intensity of deep convective clouds under strong winds // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2019. – Vol. 124, No. 16. – P. 9484-9509.
26. Tompkins A.M. Organization of tropical convection in low vertical wind shears: The role of cold pools // Journal of the atmospheric sciences. – 2001. – Vol. 58, No. 13. – P. 1650-1672.
27. Wellmann C. et al. Using emulators to understand the sensitivity of deep convective clouds and hail to environmental conditions // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. – 2018. – Vol. 10, No. 12. – P. 3103-3122.