

УДК 551.509.616

## ИССЛЕДОВАНИЕ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КОНВЕКТИВНЫЕ ОБЛАКА ЛЬДООБРАЗУЮЩИМИ РЕАГЕНТАМИ С ЦЕЛЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ ОСАДКОВ

*А.А. Бычков<sup>1</sup>, В.А. Шаповалов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Агентство атмосферных технологий, bychkovaleks@gmail.com

<sup>2</sup> ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», atajuk@mail.ru

Представлены результаты численного моделирования активного воздействия на конвективные облака с целью искусственного увеличения осадков. Численные эксперименты выполнены на основе трехмерной модели конвективного облака со спектральной микрофизикой.

Исследовалось влияние источника искусственных ледяных частиц в конвективном облаке на процессы образования и развития его микроструктурных параметров. На основе численного моделирования получена количественная оценка эффективности различных вариантов внесения кристаллизующего реагента. Полученные данные необходимы для усовершенствования методов засева облаков.

**Ключевые слова:** численное моделирование, трехмерная модель, конвективное облако, искусственное увеличение осадков, спектральная микрофизика, льдообразующий реагент.

## A STUDY BASED ON NUMERICAL MODELING OF EFFICIENCY OF THE IMPACT ON CONVECTIVE CLOUDS BY ICE-FORMING REAGENTS TO PRECIPITATION ENHANCEMENT

*A.A. Bychkov<sup>1</sup>, V.A. Shapovalov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Agency of Atmospheric Technologies

<sup>2</sup> High Mountain Geophysical Institute

The results of numerical modeling of the impact on convective clouds for the purpose of artificial increase of precipitation are presented. Numerical experiments are made on the basis of three-dimensional convective cloud model with spectral microphysics.

The influence of a source of artificial ice particles in the convective cloud on the processes of formation and development of microstructural parameters in it was studied. Quantitative assessment of the effectiveness of different options making the crystallizing reagent was conducted on the basis of numerical simulation. The obtained data are required to improve methods of cloud seeding.

**Keywords:** numerical modeling, three-dimensional model of convective cloud, the artificial increase of precipitation, spectral microphysics, ice-forming reagent.

### Введение

Анализ работ по искусственному увеличению осадков (ИУО) показывает, что в этой области имеется ряд нерешенных проблем, относящихся к планированию экспериментов, оценке их результатов, а также выбору ситуаций, благоприятных для воздействия. В ходе многолетних опытных и производственных работ разрабатывались и совершенствовались методы и средства активных воздействий (АВ)

на облака [5, 6, 8—13], математическое моделирование физических процессов в облаках [1—5, 16—18]. На основе накопленного опыта была разработана методическая литература, в которой изложены принципы, организация и методика проведения работ по ИУО, вопросы оценки эффекта воздействия и др. [7, 10].

В мировой практике активных воздействий на переохлажденные облака наиболее распространенными льдообразующими реагентами в настоящее время являются йодистое серебро, твердая углекислота, жидкий азот. Ввод в облака кристаллов йодистого серебра с самолета осуществляется путем распыления под основанием облаков или непосредственно в облаках на уровнях, где его льдообразующая эффективность близка к максимальной. Реагент диспергируется путем сжигания в специальной горелке ацетонового раствора  $AgI$ . Также осуществляется отстрел в вершины облаков пиротехнических шашек (пиропатронов). Сгорая в процессе падения в толще облака, они выделяют большое количество кристаллов йодистого серебра в переохлажденный облачный объем.

Физика воздействия на облака с целью ИУО льдообразующими реагентами опирается на механизм Бергерона — образование дождя в смешанных облаках через твердую фазу, т.е. с участием ледяных кристаллов. Из-за малочисленности естественных льдообразующих ядер облачные капельки часто остаются в переохлажденном состоянии при очень низкой температуре — практически до  $-40$  °С. Ледяные частицы, введенные в переохлажденное облако, быстро растут за счет сублимации, затем начинается процесс гравитационной коагуляции. За счет роста ледяных кристаллов содержание воды в жидком состоянии в облаке уменьшается (капли испаряются или замерзают). Во многих случаях осадкообразование, обусловленное процессом Бергерона, приводит к выпадению на поверхность Земли дождя, так как снежинки, крупа и мелкий град тают в теплом слое воздуха под облаком [9].

Этот механизм формирования частиц осадков служит теоретической основой современных методов воздействия на переохлажденные облака и туманы.

### **Состояние проблемы засева конвективных облаков**

В настоящее время существуют две основные концепции засева облаков льдообразующими реагентами с целью искусственного увеличения осадков: микрофизическая и динамическая.

Микрофизическая концепция засева облака основана на том, что внесение реагента в облако приводит к изменению его микрофизических параметров (водности, концентрации и размера частиц, количества осадков), но геометрические размеры облака при этом изменяются мало. Микрофизическая концепция засева исходит из возможности увеличения осадков за счет уменьшения выноса влаги в наковальню и более эффективного превращения мелкокапельной влаги в осадки.

Динамическая концепция засева основана на предположении, что в результате воздействия на переохлажденную часть облака реагентом в количестве от  $10^5$  м<sup>-3</sup> и более объем нагревается за счет выделения скрытой теплоты фазовых переходов, что приводит к увеличению скорости восходящих потоков и к изменению геометрических размеров облака (высоты, площади).

Следует отметить, что при воздействии могут происходить оба отмеченных физических процесса, которые приводят к увеличению количества осадков.

Обычно самолеты оборудуются несколькими устройствами для отстрела пиропатронов с йодистым серебром, устройствами сброса углекислоты и устройствами для распыления жидкого азота [10].

В пиропатронах ПВ-50 масса выстреливаемой пиротехнической шашки с йодистым серебром составляет от 300 до 450 г в зависимости от состава пиротехнической смеси. При отстреле предусмотрена задержка начала горения пиротехнического состава от 8 до 30 с. Протяженность трассы горения пиротехнического состава и выделения искусственных ядер кристаллизации составляет до 3500 м.

В пиропатронах ПВ-26 масса выстреливаемой пиротехнической шашки составляет 34 г. Продолжительность горения пиротехнического состава составляет приблизительно 45 с, а протяженность трассы горения — до 2500 метров.

Сравнительные характеристики пиропатронов ПВ-26 и ПВ-50 приведены в табл. 1.

Таблица 1

Краткие характеристики пиротехнических изделий ПВ-50 и ПВ-26

Характеристика	ПВ-50	ПВ-26
Масса пиротехнического состава, г	400	34
Время горения состава, с	55	45
Длина трассы дымления, м	До 3500	До 2500
Выход льдообразующих ядер с 1 г пиротехнического состава	$5 \cdot 10^{12}$	$5 \cdot 10^{12}$

Для засева облаков твердой углекислотой используются самолетные автоматические устройства, позволяющие осуществлять дозированный (от 0,1 до 10 кг/мин) сброс в облака гранул  $\text{CO}_2$  размером 0,2—1,0 см. В табл. 2 приведены основные параметры твердой углекислоты как хладореагента для активных воздействий на переохлажденные облака и туманы.

Таблица 2

Характеристики твердой углекислоты

Температура испарения $\text{CO}_2$ при атмосферном давлении	$-78,9^\circ\text{C}$
Объем воздуха, охлаждаемого до $-40^\circ\text{C}$ за 1 с свободно падающей гранулой диаметром 1 см	$55\text{ см}^3$
Объем воздуха, который гранула может охладить до температуры ниже $-40^\circ\text{C}$ за весь период своего существования	$18600\text{ см}^3$
Расстояние, проходимое гранулой до ее испарения	До 4300 м
Выход активных ядер кристаллизации с 1 г твердой углекислоты	$10^{12}\text{—}10^{13}$

Работе кристаллизующего реагента ( $\text{AgI}$ ) ставится в соответствие гетерогенный механизм образования искусственных кристаллов. К возможным механизмам нуклеации для частиц реагента  $\text{AgI}$  относятся [5]:

1) осаждение (нуклеация путем сублимации) — переход пара в твердое состояние при появлении пересыщения над льдом;

2) контактная нуклеация — кристаллизация при контакте частицы реагента с переохлажденной каплей;

3) конденсационное замерзание (иногда называемое сорбцией) — конденсация водяного пара на поверхность ядра с последующей кристаллизацией при наличии пересыщения над водой;

4) объемное замерзание (иммерсионная нуклеация) — активация частиц, предварительно собранных каплей и полностью в нее погруженных.

Определение количества дополнительных осадков на опытной территории, над которой проводился засев облаков, является одним из ключевых моментов работ по ИУО.

Количество дополнительных осадков в результате АВ описывается выражением

$$\Delta Q = Q_{\text{возд}} - Q_{\text{ест}},$$

где  $Q_{\text{возд}}$  — количество осадков, выпавших из облаков, подвергшихся воздействию;  $Q_{\text{ест}}$  — количество осадков, которое бы выпало при естественном развитии облаков.

Первое слагаемое измеряют с помощью осадкомерной сети или проградированным метеорологическим радиолокатором.

Второе слагаемое определяют двумя способами.

При рандомизированном засеве [5]  $Q_{\text{ест}}$  получают на основе прямых измерений с помощью осадкомерной сети или с помощью метеорологического радиолокатора [12], который откалиброван по фактическим осадкам.

При отсутствии рандомизации  $Q_{\text{ест}}$  прогнозируется по уравнению регрессии осадков на контрольной территории:

$$Q_{\text{ест}} = \alpha Q_{\text{кт}} + \beta,$$

где  $Q_{\text{кт}}$  — осадки на контрольной территории;  $\alpha$  и  $\beta$  — коэффициенты линейного уравнения регрессии, определяемые методом наименьших квадратов с использованием многолетних архивных данных об осадках на опытной и контрольной территории за период, предшествовавший воздействиям.

Несмотря на то что первым из приведенных выше способов  $Q_{\text{ест}}$  определяется гораздо корректнее, чем вторым, методика рандомизированного засева облаков при проведении производственных работ по ИУО практически не применяется. Это связано с тем, что методика требует пропуска засева значительного количества облаков (около половины) на территории воздействия.

Несмотря на широкое развитие работ по проблеме ИУО, до сих пор не решены многие важные вопросы [5, 6, 8, 15]. Так, отсутствуют физически обоснованные и статистически подтвержденные критерии пригодности различных типов облачности для воздействия. Не разработаны объективные методы количественной оценки эффективности воздействия в единичных опытах. Не разработана оптимальная технология воздействий на различные типы облаков.

Эти проблемы связаны с большой сложностью и недостаточной изученностью самого объекта исследований. Большое разнообразие облачных форм и характерных для них микрофизических и мезомасштабных параметров, недостаточная изученность закономерностей формирования микроструктуры облаков, их

пространственная неоднородность и изменчивость во времени затрудняют исследование изменений, происходящих в облаке в результате АВ.

В связи с отмеченными трудностями наиболее перспективным методом исследования эволюции параметров облаков при различных условиях является численное моделирование [4]. Применение моделей позволяет проанализировать влияние различных способов внесения реагентов в разные части облака на ход процессов осадкообразования, не прибегая к сложным и спорным натурным экспериментам.

Оценка эффекта воздействия проводилась с помощью численных моделей в работах [2, 11, 16].

Одним из наиболее распространенных методов учета в моделях воздействия является добавление искусственных кристаллов в соответствующую часть спектра ледяных частиц в течение нескольких минут. Далее естественные и искусственные кристаллы эволюционируют вместе.

В настоящей работе на основе трехмерной модели облака с детальной микрофизикой [1—3, 14] проведены численные эксперименты по моделированию АВ на конвективные облака с целью ИУО и рассчитан физический эффект засева в каждом случае внесения реагента.

Ниже кратко остановимся на разработанной модели.

При описании процессов в облаках будем использовать следующие обозначения:  $u(\vec{r}, t)$ ,  $v(\vec{r}, t)$ ,  $w(\vec{r}, t)$  — компоненты вектора скорости воздушных потоков в облаке;  $\vec{V} = \{u, v, w\}$  — вектор скорости;  $\vec{n}_z$  — орт оси  $z$ ;  $\theta(\vec{r}, t)$  — потенциальная температура;  $\pi(\vec{r}, t) = c_p \bar{\theta} (P(\vec{r}, t)/1000)^{R/c_p}$  — безразмерное давление;  $\bar{\theta}$  — средняя потенциальная температура;  $R$  — газовая постоянная;  $s(\vec{r}, t)$  — удельная влажность воздуха;  $Q_s(\vec{r}, t)$  — суммарное отношение смеси жидкой и твердой фаз в облаке;  $\sigma(z)$  — параметр, учитывающий изменение плотности воздуха с высотой;  $P(\vec{r}, t)$  и  $T(\vec{r})$  — давление и температура соответственно;  $C_p$  — теплоемкость воздуха при постоянном давлении;  $L_k, L_c, L_3$  — удельная теплота конденсации, сублимации и замерзания соответственно;  $\pi'(\vec{r})$ ,  $\theta'(\vec{r})$ ,  $s'(\vec{r})$  — отклонения безразмерного давления, потенциальной температуры и удельной влажности от их фоновых значений в окружающей атмосфере  $\pi_0(\vec{r})$ ,  $\theta_0(\vec{r})$ ,  $s_0(\vec{r})$ ;  $\left[ \frac{\delta M_k}{\delta t} \right]$ ,  $\left[ \frac{\delta M_c}{\delta t} \right]$  — изменения удельной влажности за счет диффузии пара на капли и кристаллы;  $\frac{\delta M_3}{\delta t}$  — масса капельной воды, замерзающей в единицу времени в единице объема воздуха;  $K(\vec{r}, t)$  — коэффициент турбулентной диффузии;  $V_1(m)$ , и  $V_2(m)$  — установившаяся скорость падения жидких и твердых частиц;  $\left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{KD}$ ,  $\left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{KG}$ ,  $\left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{AK}$ ,  $\left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{DP}$ ,  $\left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_3$  — изменения функции распределения

капель за счет микрофизических процессов конденсации, коагуляции капель, аккреции капель и кристаллов, дробления и замерзания соответственно;  $\left(\frac{\partial f_2}{\partial t}\right)_C$ ,  $\left(\frac{\partial f_2}{\partial t}\right)_{AK}$ ,  $\left(\frac{\partial f_2}{\partial t}\right)_3$  — изменения функции распределения кристаллов за счет сублидации, аккреции и замерзания капель;  $\left(\frac{\partial f_3}{\partial t}\right)_3$ ,  $\left(\frac{\partial f_3}{\partial t}\right)_{AK}$  — изменения функции распределения  $f_3(\vec{r}, m, t)$  за счет образования осколков при спонтанном замерзании переохлажденных облачных капель и их аккреции с кристаллами;  $I_1$  и  $I_2$  — источники капель и кристаллов;  $I_{AB}$  — источник искусственных кристаллов при АВ кристаллизующими реагентами;  $\rho_-(\vec{r}, t)$ ,  $\rho_+(\vec{r}, t)$ ,  $\rho_3(\vec{r}, t)$  — отрицательный, положительный и суммарный объемные заряды соответственно;  $\epsilon_0$  — диэлектрическая постоянная вакуума;  $a_2$  и  $a_3$  — коэффициенты разделения зарядов;  $\rho_2(\vec{r}, t)$  и  $\rho_3(\vec{r}, t)$  — уменьшение объемных зарядов за счет тока проводимости атмосферы и разрядов;  $U(\vec{r}, t)$ ,  $E(\vec{r}, t)$  — потенциал и напряженность электростатического поля облака;  $(\vec{V} \cdot \nabla) \equiv u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z}$ ;  $\Delta' = \frac{\partial}{\partial x} K \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial}{\partial z}$ .

В трехмерном случае введенные переменные зависят от трех пространственных координат — расстояния по горизонтали  $(x, y)$  и высоты  $(z)$ ; при этом  $\vec{r}$  соответствует координатам  $(x, y, z)$ . Для границ пространственной области используются обозначения  $0, L_x, 0, L_y$  и  $0, L_z$ .

Гидротермодинамический блок модели состоит из уравнения движения (1), описывающего влажную конвекцию в приближении Буссинеска, в котором учитывают адвективный и турбулентный перенос, силы плавучести, трения и барических градиентов [2]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)u &= -\nabla\pi' + \Delta'u + lv, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)v &= -\nabla\pi' + \Delta'v - lu, \\ \frac{\partial w}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)w &= -\nabla\pi' + \Delta'w + g \left( \frac{\theta'}{\theta_0} + 0,61s' - Q_s \right); \end{aligned} \quad (1)$$

уравнения неразрывности

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \sigma w; \quad (2)$$

уравнения термодинамики

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \theta &= \frac{L_k}{C_p T} \frac{\theta}{\delta t} \frac{\delta M_K}{\delta t} + \frac{L_C}{C_p T} \frac{\theta}{\delta t} \frac{\delta M_C}{\delta t} + \frac{L_3}{C_p T} \frac{\theta}{\delta t} \frac{\delta M_3}{\delta t} + \Delta' \theta, \\ \frac{\partial s}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) s &= -\frac{\delta M_K}{\delta t} - \frac{\delta M_C}{\delta t} + \Delta' s; \end{aligned} \quad (3)$$

уравнения для функций распределения по массе капель  $f_1(\vec{r}, m, t)$ , ледяных частиц  $f_2(\vec{r}, m, t)$  и осколков замерзания  $f_3(\vec{r}, m, t)$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial f_1}{\partial t} + u \frac{\partial f_1}{\partial x} + v \frac{\partial f_1}{\partial y} + (w - V_1) \frac{\partial f_1}{\partial z} = \\ &= \left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{КД} + \left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{КГ} + \left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{АК} + \left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{ДР} + \left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_3 + \Delta' f_1 + I_1, \\ \frac{\partial f_2}{\partial t} + u \frac{\partial f_2}{\partial x} + v \frac{\partial f_2}{\partial y} + (w - V_2) \frac{\partial f_2}{\partial z} &= \left( \frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_C + \left( \frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_{АК} + \left( \frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_3 + \Delta' f_2 + I_2 + I_{AB}, \\ \frac{\partial f_3}{\partial t} + u \frac{\partial f_3}{\partial x} + v \frac{\partial f_3}{\partial y} + (w - V_2) \frac{\partial f_3}{\partial z} &= \left( \frac{\partial f_3}{\partial t} \right)_3 + \left( \frac{\partial f_3}{\partial t} \right)_{АК} + \Delta' f_3; \end{aligned} \quad (4)$$

уравнения для расчета количества электричества

$$\begin{aligned} \rho_- &= a_2 \int_0^\infty m f_2 dm - \rho_2, \\ \rho_+ &= a_3 \int_0^\infty m f_3 dm - \rho_3; \end{aligned} \quad (5)$$

уравнение Пуассона для потенциала электростатического поля

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = -\frac{\rho_\Sigma}{\epsilon_0}. \quad (6)$$

Начальные условия для уравнений (2) — (6) имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} u(\vec{r}, 0) &= u_0(\vec{r}), \quad v(\vec{r}, 0) = v_0(\vec{r}), \quad w(\vec{r}, 0) = w_0(\vec{r}), \\ \theta(\vec{r}, 0) &= \theta_0(\vec{r}), \quad s(\vec{r}, 0) = s_0(\vec{r}), \\ f_1(\vec{r}, m, 0) &= f_2(\vec{r}, m, 0) = f_3(\vec{r}, m, 0) = 0, \quad \rho_-(\vec{r}, 0) = \rho_+(\vec{r}, 0) = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Граничные условия имеют вид

$$\begin{aligned} &u(\vec{r}, t) = u_0(\vec{r}), \quad v(\vec{r}, t) = v_0(\vec{r}), \quad w(\vec{r}, t) = w_0(\vec{r}) \Big|_{x=0, L_x; y=0, L_y; z=L_z}, \\ &\theta(\vec{r}, t) = \theta_0(\vec{r}), \quad s(\vec{r}, t) = s_0(\vec{r}) \Big|_{x=0, L_x; y=0, L_y; z=L_z}, \\ &u(\vec{r}, t) = v(\vec{r}, t) = w(\vec{r}, t) = 0, \quad \theta(\vec{r}, t) = \theta_0(\vec{r}), \quad s(\vec{r}, t) = s_0(\vec{r}) \Big|_{z=0}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_1(\bar{r}, m, t) = f_2(\bar{r}, m, t) = f_3(\bar{r}, m, t) = 0 \Big|_{x=0, L_x; y=0, L_y; z=L_z}, \\
 \partial f_1(\bar{r}, m, t) / \partial z = \partial f_2(\bar{r}, m, t) / \partial z = \partial f_3(\bar{r}, m, t) / \partial z = 0 \Big|_{z=0}, \\
 \partial U(\bar{r}, t) / \partial x = 0 \Big|_{x=0, L_x}, \quad \partial U(\bar{r}, t) / \partial y = 0 \Big|_{y=0, L_y}, \\
 \partial U(\bar{r}, t) / \partial z = 0 \Big|_{z=L_z}, \quad U(\bar{r}, t) = 0 \Big|_{z=0}.
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Система уравнений применяется относительно пространственно-временной области

$$0 \leq x \leq L_x, \dots, 0 \leq y \leq L_y, \dots, 0 \leq z \leq L_z, 0 \leq m < \infty, t > 0.$$

Коэффициент турбулентной диффузии рассчитывается по формуле

$$K = CL_T^2 \left[ \sum_{i,j=1}^3 \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)^2 \right]^{1/2}, \tag{9}$$

где  $C$  — безразмерная константа,  $L_T$  — характерный масштаб турбулентности.

Для описания коагуляционных процессов в облаке применяется интегро-дифференциальное уравнение следующего вида:

$$\begin{aligned}
 \left( \frac{\partial f}{\partial t} \right)_{KT} = -f_1(\bar{r}, m, t) \int_0^\infty \beta_1(m, m') \cdot f_1(\bar{r}, m', t) dm' + \\
 + \int_0^{m/2} f_1(\bar{r}, m - m', t) \beta_1(m, m - m') f_1(\bar{r}, m', t) dm',
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

где  $\beta_1(m, m') = \pi(r(m) + r(m'))^2 \cdot |V_1(m) - V_1(m')| \cdot E_1(m, m')$ ;  $r(m)$  и  $r(m')$  — радиусы сталкивающихся частиц;  $V_1(m)$  и  $V_1(m')$  — скорости падения частиц;  $E_1(m, m')$  — коэффициент захвата для капель.

Линейный коэффициент столкновений для капель радиусом  $r < 400$  мкм рассчитывается по аппроксимационной формуле

$$E_1 = 1 + P_1 - A_1 \cdot P_1^{-C_1} - B_1 \cdot (1 - P_1)^{-D_1}, \tag{11}$$

где  $P_1 = r/r'$ ;  $A_1 = 27,2r^{-1,645}$ ;  $B_1 = 58,8r^{-1,9}$ ;  $C_1 = (15,24/r)^4 + 1,13$ ;  $D_1 = (16,65/r)^8 + 0,00393r' + 0,98$ .

Для капель с радиусом более 400 мкм коэффициент столкновения определяется по предельной формуле  $E_1 = 1 + P_1$ .

Расчет взаимодействия капель и кристаллов проводится на основе следующих соотношений:



$$\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_{AK} = -f_1(\bar{r}, m, t) \int_0^{\infty} \beta_2(m, m') \cdot f_2(\bar{r}, m', t) dm', \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial f_2}{\partial t}\right)_{AK} = & -f_2(\bar{r}, m, t) \int_0^{\infty} \beta_2(m, m') \cdot f_1(\bar{r}, m', t) dm' + \\ & + \int_0^m \beta_2(m, m-m') f_2(\bar{r}, m-m', t) f_1(\bar{r}, m', t) dm', \end{aligned} \quad (13)$$

где  $\beta_2(m, m') = \pi(r(m) + r(m'))^2 \cdot |V_1(m) - V_2(m')| \cdot e_2(m, m')$ ,  $e_2(m, m')$  — коэффициент захвата для капель и кристаллов. Выражение (13) справедливо в предположении, что столкновение кристаллов с каплями приводит к замерзанию последних.

При численном решении уравнений коагуляции используется преобразование переменных

$$m = m_0 \exp[3(I-1)/I_0], \quad I_0 = 6/\ln 2,$$

и функции распределения

$$G(I) dI = mf(m) dm.$$

Значения функции  $G(I)$  в промежутке между узлами рассчитываются с помощью интерполяции значений функции в близлежащих узлах.

Скорость падения капель аппроксимируется следующими выражениями:

$$V_1(r_i) = \begin{cases} \mu_1 r_i^2 & \text{при } 2 \leq r_i \leq 66 \text{ мкм, } \mu_1 = 1,2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-1} \text{с}^{-1}, \\ \mu_2 r_i & \text{при } 66 \leq r_i \leq 600 \text{ мкм, } \mu_2 = 8 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}, \\ \mu_3 r_i^{1/2} & \text{при } r_i > 600 \text{ мкм, } \mu_3 = 2 \cdot 10^3 \text{ см}^{1/2} \text{с}^{-1}. \end{cases} \quad (14)$$

Для вычисления скорости падения кристаллических частиц применяются аппроксимационные формулы

$$V_2(r_i) = aD_r^b, \quad (15)$$

где  $V_2$  — скорость падения частицы (м/с);  $D_r$  — диаметр капли, масса которой равна массе кристалла размером  $r_i$  (мм);  $a$  и  $b$  — константы, зависящие от формы кристалла.

Скорость падения капель и кристаллов корректируется с учетом изменения плотности воздуха с высотой:

$$V_i(z) = V_i(0) \left( \frac{\rho_0(0)}{\rho_0(z)} \right)^{0.5}, \quad (16)$$

где  $V_i(0)$  и  $\rho_a(0)$  — скорость падения частиц и плотность воздуха у поверхности Земли соответственно,  $\rho_a(z)$  — плотность воздуха на высоте  $z$ .

Изменение функции  $f_1(\vec{r}, m, t)$  вследствие дробления капель рассчитывается по формуле

$$\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{др} = -P_{др}(m)f_1(\vec{r}, m, t) + \int_m^{\infty} Q(m, m')P_{др}(m')f_1(\vec{r}, m', t)dm', \quad (17)$$

где  $P_{др}(m)$  — вероятность распада в единицу времени капли массой  $m$ ;  $Q(m, m')$  — вероятность образования капли массой  $m$  при распаде капли массой  $m'$ . Для расчета  $P_{др}(m)$  используется выражение

$$P_{др}(m) = 2,94 \cdot 10^{-7} \exp(34 r(m)). \quad (18)$$

Функция  $Q(m, m')$  рассчитывается по формуле

$$Q(m, m') = \frac{145,37}{m} \frac{r(m)}{r(m')} \exp\left(-7 \frac{r(m)}{r(m')}\right). \quad (19)$$

Расчет изменений функций  $f_1(\vec{r}, m, t)$  и  $f_2(\vec{r}, m, t)$  за счет кристаллизации капель проводится с использованием функции  $R_{fr}(\vec{r}, m)$  — вероятности замерзания в единицу времени капли массой  $m$  в точке  $(\vec{r})$ :

$$\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_3 = -\left(\frac{\partial f_2}{\partial t}\right)_3 = -R_{fr}(\vec{r}, m)f_1(\vec{r}, m, t), \quad (20)$$

$$R_{fr}(\vec{r}, m) = A_{fr} \exp\left[B_{fr}(T_{md}(m) - T_c(\vec{r}))\right], \quad (21)$$

где  $A_{fr}$ ,  $B_{fr}$  — параметры;  $T_{md}(m)$  — медианная температура замерзания капель массой  $m$  (°C);  $T_c$  — температура воздуха в выбранной точке (°C).

Для  $T_{md}$  получено выражение

$$T_{md}(m) = -48,46r(m)^{-0,125}, \quad (22)$$

где  $r(m)$  — радиус капли (мкм).

Микрофизический блок описывает процессы нуклеации, конденсации, коагуляции капель с каплями, сублимации, аккреции, замерзания капель, осаждения облачных частиц в поле силы тяжести, их перенос воздушными потоками.

Моделирование эволюции полей облачных параметров проводилось в прямоугольной области, которая представляет собой вертикальное сечение некоторой части атмосферы. При проведении расчетов задавались следующие размеры пространственной области: от 40 до 80 км по горизонтали и 16 км по вертикали. Шаг сетки по координатам  $X$  и  $Y$  составлял 500—1000 м, по координате  $Z$  — 250—500 м. Направления осей сетки  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  совпадало с направлениями на восток, на север и по вертикали соответственно. Инициализация облака производилась заданием теплового импульса у поверхности Земли с прогревом  $\Delta T = 1 \dots 4$  °C.

### Применение трехмерной модели конвективного облака для исследования вопросов искусственного увеличения осадков

Методы АВ на облака нуждаются в научном обосновании, в частности, на основе численного моделирования эволюции их микроструктуры при естественном развитии и при засеве реагентами.

Разработанная численная трехмерная модель конвективного облака [1—3] достаточно адекватно описывает объект моделирования, поэтому она может быть применена для исследования эффективности методов ИУО.

По результатам численных экспериментов в работе была проведена оценка эффекта различных вариантов АВ.

В качестве основных характеристик для оценки эффекта воздействия использовались интенсивность и количество осадков на подстилающей поверхности, высота верхней границы облака, скорость восходящего потока.

В качестве входных параметров использовались данные атмосферного зондирования на территории Москвы за весенне-летний период.

Ниже приведены результаты расчетов для нескольких зондов. Для каждого случая был выполнен расчет естественного развития облака и несколько вариантов с воздействием, в которых варьировались уровень внесения реагента и его концентрация. Моделировалось АВ кристаллизующим реагентом.

Естественный ход эволюции параметров облака применялся в качестве опорного варианта для сравнений.

Воздействие в данной серии численных экспериментов производилось в момент  $t_{\text{возд}} = 20$  мин от начала развития облака. Температура внесения реагента варьировалась в пределах от  $-6$  до  $-10$  °С, концентрация искусственных ледяных кристаллов — от  $10^4$  до  $10^6$  м<sup>-3</sup>. Результаты расчетов АВ на облака для наиболее эффективных температурных уровней приведены в табл. 3 и 4.

Контролировалось изменение под влиянием воздействия следующих параметров: мощности облака ( $\Delta H$ ), максимального значения вертикальной скорости ( $W$ ) и ее уровня ( $H_{W_{\text{max}}}$ ), дополнительного количества осадков ( $\Delta Q$ ), относительного увеличения количества осадков в результате воздействия ( $\Delta Q/Q \cdot 100$  %), эффективности осадкообразования ( $K_{\text{ос}}$ ) и времени эволюции облака ( $T_{\text{эв}}$ ).

Рассмотрим некоторые из расчетных вариантов АВ на конвективные облака с помощью кристаллизующих реагентов.

#### Вариант 1

В первом варианте моделирования активных воздействий на конвективные облака использовались данные зондирования на территории Москвы (Долгопрудный) за 7 мая 2015 года, 3.00 мск.

По результатам расчетов высота уровня конденсации составила 730 м (при давлении 934 гПа и температуре 6,5 °С), а вертикальное распределение температуры по основным пороговым значениям составило: 0 °С — 1770 м;  $-6$  °С — 2730 м;  $-10$  °С — 3370 м;  $-15$  °С — 4170 м;  $-25$  °С — 5770 м;  $-40$  °С — 8170 м. Вертикальный разрез облака в момент начала воздействия приведен на рис. 1.

Параметры модельного облака при естественном развитии и полученные результаты при воздействии на конвективное облако кристаллизующим реагентом с различной концентрацией и на разных температурных уровнях представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчетов АВ на конвективное облако по данным за 3:00 мск 7 мая 2015 г.

Параметр	Ест. ход	Вариант					
		1	2	3	4	5	6
Высота внесения $H_{\text{вн}}$ (м)	-	2730	2730	2730	3370	3370	3370
$T_{H_{\text{вн}}}$ (°С)	-	-6	-6	-6	-10	-10	-10
Расход реагента (м <sup>-3</sup> )	-	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>
<i>Характеристики облака</i>							
$H_{\text{ВГО}}$ (м)	7280	7880	8830	9630	7780	8680	9430
$\Delta H$ (м)	0	600	1550	2350	500	1400	2150
$H_{\text{Wmax}}$ (м)	3680	4230	4830	5130	4430	5030	5430
$W$ (м/с)	21,3	23,1	26,9	30,4	22,3	25,4	28,6
$\Delta W$ (м/с)	0,0	1,8	5,6	9,1	1,0	4,1	7,3
$t_{\text{эвол.}}$ (МИН)	58	62	67	73	61	66	71
$Q_{\text{max}}$ (мм/ч)	26,8	30,1	37,2	44,1	29,0	34,8	40,9
$Q$ (мм)	8,9	10,0	12,4	14,7	9,7	11,6	13,6
$\Delta Q$ (мм)	0,0	1,1	3,5	5,8	0,7	2,7	4,7
$\Delta Q/Q \cdot 100$ (%)	0,0	12,5	38,8	64,6	8,2	30,0	52,7

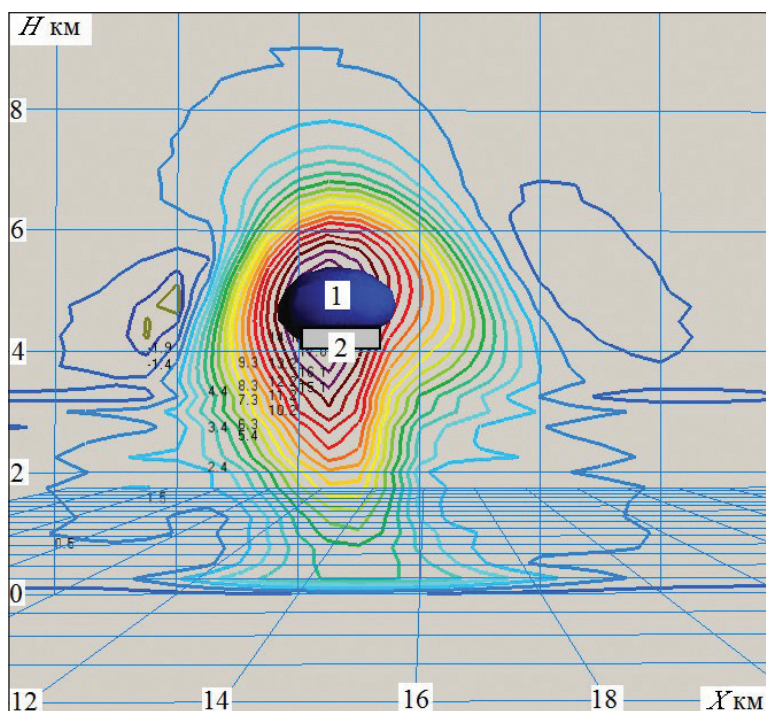


Рис. 1. Вертикальный разрез конвективного облака по результатам моделирования.  
1 — область зоны накопления; 2 — область внесения реагента.

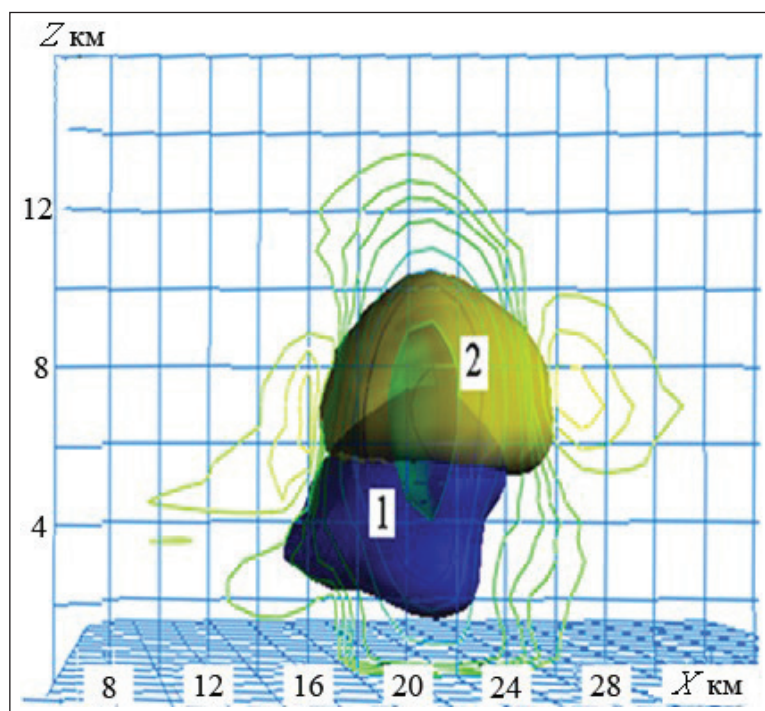


Рис. 2. Вертикальный разрез облака на 30-й минуте развития.  
Приведены изолинии вертикальной скорости;  
1 — изоповерхность водности, 2 — изоповерхность ледности.

### Вариант 2

Второй вариант расчетов активного воздействия на облако выполнен на основе данных зондирования на территории Москвы (Долгопрудный) за 15.00 мск 29 мая 2015 г.

По результатам расчетов высота уровня конденсации составила 850 м (при давлении 910 гПа и температуре 17,1 °С), а вертикальное распределение температуры по основным пороговым значениям составило: 0 °С — 4250 м; -6 °С — 5440 м; -10 °С — 6230 м; -15 °С — 7230 м; -25 °С — 9210 м; -40 °С — 12 180 м. Разрез облака в вертикальной плоскости на 30-й минуте развития приведен на рис. 2.

Параметры модельного облака при естественном развитии и полученные результаты представлены в табл. 4.

Следует отметить, что были выполнены расчеты и по результатам других зондирований. Не останавливаясь на них подробно, отметим, что эффект воздействия зависел от стратификации атмосферы, параметров подоблачного слоя, уровня внесения реагента, его концентрации и момента внесения.

Анализ результатов проведенных расчетов показал, что наиболее эффективно проводить воздействие на температурном уровне -6 °С на облака, находящиеся в стадии развития.

Результаты расчетов АВ на конвективное облако по данным за 15.00 мск 29 мая 2015 г.

Параметр	Ест. ход	Вариант					
		1	2	3	4	5	6
Высота внесения $H_{\text{вн}}$ (м)	-	5440	5440	5440	6230	6230	6230
$T_{H_{\text{вн}}}$ (°С)	-	-6	-6	-6	-10	-10	-10
Расход реагента (м <sup>-3</sup> )	-	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>4</sup>	105	10 <sup>6</sup>
<i>Характеристики облака</i>							
$H_{\text{ВГО}}$ (м)	7500	8250	9650	10750	8050	9500	10700
$\Delta H$ (м)	0	750	2150	3250	550	2000	3200
$H_{\text{Итmax}}$ (м)	4000	4000	7050	7600	4000	4000	8100
$W$ (м/с)	16,1	16,1	19,3	24,2	16,1	16,1	21,4
$\Delta W$ (м/с)	0,0	0,0	3,2	8,1	0,0	0,0	5,3
$t_{\text{эвол.}}$ (мин)	59	63	72	79	62	71	79
$Q_{\text{max}}$ (мм/ч)	21,0	22,5	28,9	37,3	22,1	25,0	33,7
$Q$ (мм)	7,0	7,5	9,6	12,4	7,4	8,3	11,2
$\Delta Q$ (мм)	0,0	0,5	2,6	5,4	0,3	1,3	4,2
$\Delta Q/Q \cdot 100$ (%)	0,0	6,8	37,3	77,5	5,0	19,0	60,2

**Выводы**

1. На основе трехмерной модели исследовано формирование осадков в конвективных облаках при естественном развитии и при воздействии кристаллизующим реагентом. Применялась разработанная в Высокогорном геофизическом институте трехмерная модель конвективного облака с детальным учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов. Проведены численные эксперименты, в которых варьировались: уровень внесения кристаллизующего реагента, его концентрация, момент воздействия. В качестве основных характеристик для оценки эффекта воздействия использовались: интенсивность и количество осадков на уровне подстилающей поверхности, высота верхней границы облаков, скорость восходящих потоков в облаке.

2. Результаты выполненных численных расчетов показали, что внесение дополнительного количества ледяных кристаллов в переохлажденную часть конвективного облака в объеме 10<sup>4</sup> част./м<sup>3</sup> позволяет достичь эффекта ИУО преимущественно за счет изменений в протекании микрофизических процессов. Эффект ИУО при этом может достигать от 5,0 до 12,5 %. Внесение же количества ледяных кристаллов в объеме 10<sup>5</sup>—10<sup>6</sup> част./м<sup>3</sup> позволяет запустить в облаке процессы, приводящие к изменению динамических характеристик облака, при которых эффект ИУО может достигать значений от 19 до 77,5 %.

3. С помощью разработанной модели конвективного облака физический эффект воздействия оценивается достаточно корректно путем сравнения значений параметров, полученных для случая естественного развития облака, с их значениями при моделировании активного воздействия.

4. Результаты теоретических исследований эффективности воздействия на конвективную облачность, выполненные методами численного моделирования,



показали, что при планировании воздействий необходимо учитывать такие факторы, как высота внесения реагента, режим работы технических средств воздействия и продолжительность их работы. Учет данных параметров позволяет в значительной степени повысить эффективность воздействия для конвективных облаков различной мощности с учетом термодинамического состояния атмосферы.

### Список литературы

1. *Ашабоков Б.А.* и др. Численное моделирование электрических характеристик конвективных облаков // Б.А. Ашабоков, М.Н. Бейтуганов, Г.В. Куповых, А.В. Шаповалов, К.А. Продан, В.А. Шаповалов // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. 2012. № 6. С. 65—68.
2. *Ашабоков Б.А., Шаповалов В.А., Езаова А.Г., Шаповалов М.А.* Исследование образования ледяной фазы в мощных конвективных облаках на основе трехмерной численной модели // Естественные и технические науки. 2014. № 5(73). С. 78—83.
3. *Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Шаповалов А.В., Езаова А.Г., Шаповалов М.А.* Численные эксперименты по исследованию формирования микроструктурных характеристик грозоградных облаков // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Сер. естественные науки. 2014. № 3 (181). С. 40—44.
4. *Бычков А.А., Сергеев Б.Н., Щукин Г.Г.* Оценка эффективности искусственного увеличения осадков с использованием легких летательных аппаратов // Записки РГГМУ. 2017. № 47. С. 68—79.
5. *Деннис А.* Изменение погоды засевом облаков. — М.: Мир, 1983.
6. *Зацепина Л.П., Зимин Б.И., Зонтов Л.Б., Поздеев В.Н., Серегин Ю.А.* Методика и условия проведения эксперимента по засеву конвективных облаков в Поволжье // Труды ЦАО. 1986. Вып. 162. С. 23—35.
7. *Ким Н.С., Корнеев В.П., Частухин А.В., Щукин Г.Г.* Экологические аспекты российских технологий активных воздействий на облака // Ученые записки РГГМУ. 2017. № 46. С. 91—99.
8. *Корниченко Е.Е.* Результаты эксперимента по воздействию на кучево-дождевые облака с целью искусственного регулирования осадков // Труды УкрНИИ. 1982. Вып. 187. С. 3—25.
9. *Мазин И.П., Шмелер С.М.* Облака. Строение и физика образования. — Л.: Гидрометеоздат, 1983. 280 с.
10. Методические указания проведения работ по искусственному регулированию осадков из конвективных облаков самолётными средствами воздействия. — М.: изд-во ЦАО, 1988. 29 с.
11. *Хворостьянов В.И., Хаин А.П., Черкасова Н.И., Когтева Е.А.* Двумерная модель динамического засева конвективной облачности // Метеорология и гидрология. 1995. № 9. С. 68—84.
12. *Шаповалов А.В., Шаповалов В.А., Тапасханов В.О., Стасенко В.Н.* Программное обеспечение приема и представления информации нового российского ДМРЛ-С // Доклады Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Нальчик, 7—9 октября 2014 г. — Нальчик: ООО Печатный двор, 2015. Ч. 1. С. 131—138.
13. *Колосков Б.П., Корнеев В.П., Щукин Г.Г.* Методы и средства модификации облаков, осадков и туманов. — СПб: изд-во РГГМУ, 2012. 341 с.
14. *Ashabokov B.A., Shapovalov A.V., Kuliev D.D., Prodan K.A., Shapovalov V.A.* Numerical Simulation of Thermodynamic, Microstructural, and Electric Characteristics of Convective Clouds at the Growth and Mature Stages // Radiophysics and Quantum Electronics. 2014. V. 56, Is. 11. P. 811—817.
15. *Howell W.E.* Comments “On using historical comparisons in evaluating cloud seeding operations” // J. Climate Appl. Met. 1984. V. 23. P. 850.
16. *Hsie E.-Y., Farley R.D., Orville H.D.* Numerical Simulation of Ice-Phase Convective Cloud Seeding // J. Appl. Meteor. 1980. V. 19. P. 950—977.
17. *Khvorostyanov V.I., Curry J.A.* Thermodynamics, Kinetics, and Microphysics of Clouds. — Cambridge University Press, 2014. 782 p.
18. *Liu X L, Niu S J.* Numerical Simulation of Macro- and Micro-structures of Intense Convective Clouds with a Spectral Bin Microphysics Model // Adv. Atmos. Sci. 2010. 27(5). P. 1078—1088.