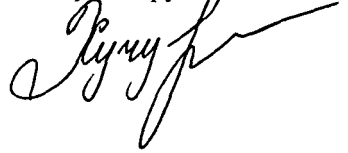


25

На правах рукописи



Хучунаева Светлана Бузигитовна

**ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОТОПНОГО
СОСТАВА ОБЛАЧНЫХ ЧАСТИЦ**

25 00 30 – Метеорология, климатология, агрометеорология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Нальчик
2007

Работа выполнена в ГУ «Высокогорный геофизический институт»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
заслуженный деятель науки РФ,
профессор
Тлсов Мухамед Индрисович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Сенов Хамиша Машхариевич

кандидат физико-математических наук
Богаченко Евгений Моисеевич

Ведущая организация: Главная геофизическая обсерватория
(ГГО) им А И Воейкова,
г Санкт - Петербург

Защита состоится 31 мая 2007 года в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 327 001 01 при Высокогорном геофизическом институте по адресу 360030, КБР, г Нальчик, пр Ленина, 2

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГУ «Высокогорный геофизический институт»

Автореферат разослан 26 апреля 2007 г

Ученый секретарь диссертационного
совета, доктор физ -мат наук,
профессор



А.В. Шаповалов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Исследованию облаков и процессов, приводящих к образованию града, посвящено значительное количество работ как у нас в стране, так и за рубежом

Развитие этой области знаний в последние десятилетия позволило разработать методы активных воздействий (АВ) и применить их для защиты сельскохозяйственных культур от града. Несмотря на то, что систематическими исследованиями града занимаются более полувека, до сих пор не выявлены основные закономерности его зарождения и роста. Это связано со сложностью математического описания процесса и невозможностью проведения тщательных прямых измерений в градовых облаках. Поэтому, результаты исследований града, полученные косвенными методами, носят в основном качественный характер.

В последние десятилетия анализ изотопного состава в частицах осадков находит все большее применение. Изотопный метод не только дополняет классические методы метеорологии, но в некоторых случаях выходит за пределы их прежних возможностей. Данные изотопного анализа позволяют получить весьма ценную информацию, способствующую лучшему пониманию проблемы развития облаков и образования осадков. Что касается механизма образования града, то использование изотопных данных более перспективно, так как во льду долговременно сохраняется изотопная «запись». Отсюда и большая возможность применения методов стабильных изотопов для решения многих задач физики градообразования.

В настоящее время для исследования условий образования и роста града по изотопным данным используется адиабатическая модель, которая, слишком приближенно описывает облачные процессы.

В этой связи актуальной является задача разработки более адекватной численной модели формирования изотопного состава облачных частиц – двумерной нестационарной, описывающей облако на разных стадиях развития, что способствовало бы более глубокому исследованию физических процессов образования града.

Цель исследования

Целью работы является разработка двумерной нестационарной численной модели конвективного облака с описанием формирования изотопного состава облачных частиц и исследование на ее основе физических закономерностей роста града

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи

- произведен анализ изотопных и численных методов исследования конвективных осадков,
- создана двумерная численная модель градового облака, позволяющая оценить распределение изотопов водорода в облаке в различные моменты времени,
- разработан метод анализа процесса градообразования на основе сопоставления результатов расчетов по модели и экспериментальных данных о содержании изотопов водорода в ледяных наслоениях градин,
- проведено сравнение предложенного и ранее использовавшихся методов анализа уровней образования града по изотопным данным

Научная новизна

В работе впервые

- разработана двумерная нестационарная модель конвективного облака, позволяющая рассчитать распределение изотопов водорода по высоте на разных стадиях развития облака,
- на основе модели получены новые данные о формировании изотопного состава градин в облаке,
- показано, что изотопный состав различных зародышей и слоев градин формируется различным распределением изотопов в облаке,
- разработан метод исследования механизма градообразования, основанный на расчете распределения изотопов в облаке по двумерной нестационарной модели,

- предложен способ определения точки отсчета для расчета распределения изотопов по высоте,
- проведены исследования распределения изотопов водорода в нескольких градовых процессах

Положения выносимые на защиту

- 1 Численная модель конвективного облака для оценки распределения изотопов водорода по вертикали в разные моменты его развития
- 2 Метод исследования механизма градообразования на основе модели формирования изотопного состава облачных частиц и данных инструментальных измерений концентрации дейтерия в градинах
- 3 Результаты расчетов распределения изотопов в градовых облаках по данным зондирования атмосферы в дни с градовыми процессами
- 4 Способ выбора точки отсчета и распределения изотопов в облаке для определения условий зарождения и роста града

Личный вклад автора

Автор разработал и реализовал для расчетов численную модель изотопного состава облачных частиц для исследования механизма градообразования. Автор принимал участие в подготовке проб для изотопного анализа. Автором лично проведены численные эксперименты по исследованию эволюции облаков, выполнен анализ их результатов. Проведено сравнение результатов, полученных по различным моделям.

Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях молодых ученых КБНЦ РАН в г. Нальчик, 2003, 2004, 2005 гг., на Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, посвященной 70-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции РАН, г. Нальчик 2005 г., на Второй конференции молодых ученых нацио-

нальных гидрометеослужб государств – участников СНГ «Новые методы и технологии в гидрометеорологии», Москва, 2006 г., на Итоговых сессиях ученого Совета и общегеофизических семинарах Высокогорного геофизического института

По теме диссертации опубликовано 11 работ

Объем и структура диссертации

Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы

Общий объем работы составляет 122 страницы машинописного текста, включая 31 таблицу, 12 рисунков и список используемой литературы из 112 наименований

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, формулируются цели и задачи диссертационной работы, характеризуются теоретические и методологические основы исследования, раскрываются научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения об их апробации, о публикациях, объеме и структуре работы

В первой главе приведен анализ современного состояния исследований механизма зарождения и роста града на основе изотопных методов. Рассматривается адиабатическая модель. Анализируется формирование изотопного состава осадков

Главным фактором, определяющим содержание тяжелого кислорода и дейтерия в атмосферных осадках, служит температура воздуха. Это принципиально важно для количественной интерпретации изотопных данных ледяных наслоений градин. Однако из-за непостоянства изменений содержания изотопов в облачном паре в разных стадиях развития облака на одних и тех же температурных уровнях могут формироваться различные значения изотопов кислорода и водорода в зародышах и в слоях градин. Используемая до настоящего времени адиабатическая модель не позволяет решить эту неоднозначность

В этой главе также рассматриваются состояние и перспективы численного моделирования градовых облаков и возможности их использования для создания изогонной модели облака, описывающей формирование изотопного состава облачных частиц, в том числе - градин

Во второй главе представлена разработанная численная модель формирования изотопного состава облачных частиц, которая является развитием математической модели конвективного облака с детальным описанием термодинамических и микрофизических процессов Ашабокова Б А и Шаповалова А В , созданной в ВГИ

Усовершенствованная модель состоит из трех блоков ранее существовавших гидротермодинамического и микрофизического и третьего - нового, в который включены уравнения для расчета содержания изотопов в водяном паре и облачных частицах

Гидротермодинамический блок модели состоит из уравнений движения, описывающих влажную конвекцию в приближении Буссинеска, уравнения неразрывности, уравнений термодинамики, начальных и граничных условий. Подробно уравнения приведены в диссертации

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. Система уравнений для функций распределения по массам капель $f_1(\vec{r}, m, t)$ и ледяных частиц $f_2(\vec{r}, m, t)$ имеет следующий вид

$$\frac{\partial \mathcal{F}_1}{\partial t} + u \frac{\partial \mathcal{F}_1}{\partial x} + (w - V_1) \frac{\partial \mathcal{F}_1}{\partial z} = \left(\frac{\partial \mathcal{F}_1}{\partial a} \right)_{KL} + \left(\frac{\partial \mathcal{F}_1}{\partial a} \right)_{KG} + \left(\frac{\partial \mathcal{F}_1}{\partial a} \right)_{AK} + \left(\frac{\partial \mathcal{F}_1}{\partial a} \right)_{LP} + \left(\frac{\partial \mathcal{F}_1}{\partial a} \right)_3 + \Delta' f_1 + I_1, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathcal{F}_2}{\partial t} + u \frac{\partial \mathcal{F}_2}{\partial x} + (w - V_2) \frac{\partial \mathcal{F}_2}{\partial z} = \left(\frac{\partial \mathcal{F}_2}{\partial a} \right)_C + \left(\frac{\partial \mathcal{F}_2}{\partial a} \right)_{AK} + \left(\frac{\partial \mathcal{F}_2}{\partial a} \right)_3 + \Delta' f_2 + I_2 + I_{AB},$$

где $V_1(m)$, $V_2(m)$ - установившиеся скорости падения жидких и твер-

дых частиц, $\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_{КД}$, $\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_{КГ}$, $\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_{АК}$, $\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_{ДР}$, $\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_3$ - изме-

нения функции распределения капель за счет микрофизических процессов конденсации, коагуляции капель, аккреции капель и кристал-

лов, дробления и замерзания соответственно, $\left(\frac{\partial f_2}{\partial t}\right)_c$, $\left(\frac{\partial f_2}{\partial t}\right)_{АК}$,

$\left(\frac{\partial f_2}{\partial t}\right)_3$ - изменения функции распределения кристаллов за счет суб-

лимации, аккреции и замерзания капель

Для системы уравнений (1) используются следующие началь-

$$f_1(\vec{r}, m, 0) = f_2(\vec{r}, m, 0) = 0, \quad (2)$$

$$f_1(\vec{r}, m, t) = f_2(\vec{r}, m, t) = 0 \text{ при } x = 0, L_x,$$

$$f_1(\vec{r}, m, t) = f_2(\vec{r}, m, t) = 0 \text{ при } z = L_z, \quad (3)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial z} = \frac{\partial f_2}{\partial z} = 0 \text{ при } z = 0$$

Для анализа изотопного состава градин в данной модели используются поля (вертикальные разрезы) температуры воздуха, удельного влагосодержания, влажности и ледности. В модель включены уравнения, позволяющие рассчитывать фракционирование изотопов молекул воды.

Важнейшей характеристикой изотопного обмена между жидкой и паровой фазами является коэффициент разделения α , который определяется формулой

$$\alpha = \frac{N}{1-N} \frac{n}{1-n}, \quad (4)$$

где n и N — мольные доли изотопной разновидности воды в паровой и жидкой фазах при их равновесии.

Поскольку N и $n \ll 1$, то из равенства (4) следует

$$N = \alpha(T)n \quad (5)$$

Для коэффициента фракционирования $\alpha(T)$ существует ряд аппроксимаций, среди которых используются

$$\ln \alpha = -0,10 + \frac{15013}{T^2},$$

$$\ln \alpha = 24844/T^2 - 76,248/T + 0,056612,$$

(T – температура в градусах Кельвина) и другие

Без учета кристаллизационных процессов уравнение, описывающее изменение с высотой содержания тяжелой воды в облачном паре, можно записать в виде

$$\frac{1}{n} \frac{dn}{dz} = [\alpha(T) - 1] \frac{1}{s} \frac{ds}{dz}, \quad (6)$$

где s – удельная насыщающая влажность облачного воздуха

Для решения системы уравнений модели на временном интервале (t_n, t_{n+1}) используется метод расщепления, предложенный Г И Марчуком Проводится расщепление на системы

а) уравнений переноса метеорологических субстанций вдоль траекторий и турбулентного переноса на интервале ($t_n, t_{n+2/5}$),

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) \varphi = \Delta' \varphi, \quad (7)$$

где $\varphi = \{u, w, \theta, s, f_1(m), f_2(m), f_3(m)\}$ – любая из метеорологических субстанций, подверженных переносу,

б) уравнений процессов конденсации, сублимации, замерзания капель и окончательных значений удельной влажности и потенциальной

температуры
$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{L_k}{C_p} \frac{\theta}{T} \frac{\delta M_k}{\delta t} + \frac{L_c}{C_p} \frac{\theta}{T} \frac{\delta M_c}{\delta t} + \frac{L_s}{C_p} \frac{\theta}{T} \frac{\delta M_s}{\delta t}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} = - \frac{\delta M_k}{\delta t} - \frac{\delta M_c}{\delta t}$$

на интервале ($t_{n+2/5}, t_{n+3/5}$),

в) уравнений адаптации метеополей с учетом окончательных значений потенциальной температуры и удельной влажности на интервале ($t_{n+3/5}, t_{n+4/5}$)

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\nabla \pi' + \vec{n}_z g (\theta'/\theta_0 + 0,61s' - Q_s), \quad (9)$$

где $\varphi = \{u, w\}$,

г) уравнений, описывающих процессы дробления, коагуляции и аккреции кристаллов на интервале ($t_{n+4/5}, t_{n+1}$)

При построении разностного уравнения второго порядка аппроксимации по всем переменным для уравнения переноса субстанций вдоль траекторий и турбулентного переноса

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + u \frac{\partial \varphi}{\partial x} + w \frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} K \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad (10)$$

встречается одна трудность. Она заключается в том, что коэффициенты u и w являются функциями x , z и t , которые меняют знаки в области определения решения. В конечно-разностном виде уравнение (1) записывается так

$$\begin{aligned} & \frac{\varphi_{i,k}^{n+1} - \varphi_{i,k}^n}{\tau} + u_{i,k}^n \frac{\varphi_{i,k}^{n+1} - \varphi_{i-1,k}^{n+1}}{h_x} + w_{i,k}^n \frac{\varphi_{i,k}^{n+1} - \varphi_{i,k-1}^{n+1}}{h_z} = \\ & = K_{i,k}^{n+1} \left(\frac{\varphi_{i-1,k}^{n+1} - 2\varphi_{i,k}^{n+1} + \varphi_{i+1,k}^{n+1}}{h_x^2} + \frac{\varphi_{i,k-1}^{n+1} - 2\varphi_{i,k}^{n+1} + \varphi_{i,k+1}^{n+1}}{h_z^2} \right) + \\ & + \frac{K_{i+1,k}^n - K_{i-1,k}^n}{2h_x} \frac{\varphi_{i,k}^{n+1} - \varphi_{i-1,k}^{n+1}}{h_x} + \frac{K_{i,k+1}^n - K_{i,k-1}^n}{2h_z} \frac{\varphi_{i,k}^{n+1} - \varphi_{i,k-1}^{n+1}}{h_z}, \end{aligned} \quad (11)$$

если коэффициенты $u_{i,k}^n, w_{i,k}^n$ положительны в области определения решения или

$$\begin{aligned} & \frac{\varphi_{i,k}^{n+1} - \varphi_{i,k}^n}{\tau} + u_{i,k}^n \frac{\varphi_{i+1,k}^{n+1} - \varphi_{i,k}^{n+1}}{h_x} + w_{i,k}^n \frac{\varphi_{i,k+1}^{n+1} - \varphi_{i,k}^{n+1}}{h_z} = \\ & = K_{i,k}^{n+1} \left(\frac{\varphi_{i-1,k}^{n+1} - 2\varphi_{i,k}^{n+1} + \varphi_{i+1,k}^{n+1}}{h_x^2} + \frac{\varphi_{i,k-1}^{n+1} - 2\varphi_{i,k}^{n+1} + \varphi_{i,k+1}^{n+1}}{h_z^2} \right) + \\ & + \frac{K_{i+1,k}^n - K_{i-1,k}^n}{2h_x} \frac{\varphi_{i+1,k}^{n+1} - \varphi_{i,k}^{n+1}}{h_x} + \frac{K_{i,k+1}^n - K_{i,k-1}^n}{2h_z} \frac{\varphi_{i,k+1}^{n+1} - \varphi_{i,k}^{n+1}}{h_z}, \end{aligned} \quad (12)$$

если $u_{i,k}^n, w_{i,k}^n$ отрицательны

Метод нахождения решения уравнений переноса субстанций основан на методе переменных направлений. Использовалась продольно-поперечная разностная схема, примененная к двумерному

случаю В этой схеме переход от слоя n к слою $n+2/5$ осуществляется в два этапа На первом этапе определяются промежуточные значения $\varphi_{i,k}^{n+1/5}$ из системы уравнений

$$\frac{\varphi_{i,k}^{n+1/5} - \varphi_{i,k}^n}{1/5\tau} = \Lambda_1 \varphi_{i,k}^{n+1/5} + \Lambda_2 \varphi_{i,k}^n \quad (13)$$

На втором этапе, используя в качестве начальных условий найденные в (13) значения $\varphi_{i,k}^{n+1/5}$, находим $\varphi_{i,k}^{n+2/5}$ из системы уравнений

$$\frac{\varphi_{i,k}^{n+2/5} - \varphi_{i,k}^{n+1/5}}{1/5\tau} = \Lambda_2 \varphi_{i,k}^{n+2/5} + \Lambda_1 \varphi_{i,k}^{n+1/5}, \quad (14)$$

где операторы определены следующим образом

$$\begin{aligned} \Lambda_1 \varphi_{i,k}^{n+1} = & \left(\frac{K_{i,k}^n}{h_x^2} + \frac{1}{2} \frac{|u_{i,k}^n| + u_{i,k}^n}{h_x} \left(1 - \frac{K_x^n}{u_{i,k}^n} \right) \right) \varphi_{i-1,k}^{n+1} - \left(2 \frac{K_{i,k}^n}{h_x^2} + \frac{u_{i,k}^n}{h_x} \left(1 - \frac{K_x^n}{|u_{i,k}^n|} \right) \right) \varphi_{i,k}^{n+1} + \\ & + \left(\frac{K_{i,k}^n}{h_x^2} + \frac{1}{2} \frac{|u_{i,k}^n| - u_{i,k}^n}{h_x} \left(\frac{K_x^n}{|u_{i,k}^n|} - 1 \right) \right) \varphi_{i+1,k}^{n+1}, \quad (15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Lambda_3 \varphi_{i,k}^{n+1} = & \left(\frac{K_{i,k}^n}{h_z^2} + \frac{1}{2} \frac{|w_{i,k}^n| + w_{i,k}^n}{h_z} \left(1 - \frac{K_z^n}{w_{i,k}^n} \right) \right) \varphi_{i,k-1}^{n+1} - \left(2 \frac{K_{i,k}^n}{h_z^2} + \frac{w_{i,k}^n}{h_z} \left(1 - \frac{K_z^n}{|w_{i,k}^n|} \right) \right) \varphi_{i,k}^{n+1} + \\ & + \left(\frac{K_{i,k}^n}{h_z^2} + \frac{1}{2} \frac{|w_{i,k}^n| - w_{i,k}^n}{h_z} \left(\frac{K_z^n}{|w_{i,k}^n|} - 1 \right) \right) \varphi_{i,k+1}^{n+1}, \\ K_x^n = & \frac{K_{i+1,k}^n - K_{i-1,k}^n}{2h_x}, \quad K_z^n = \frac{K_{i,k+1}^n - K_{i,k-1}^n}{2h_z} \end{aligned}$$

При построении операторов (15) формально объединили оба случая (11) и (12), что позволяет решить систему (10) последовательным применением одномерных прогонок сначала по направлению x , затем по направлению z

В последнем разделе главы приведены результаты тестовых расчетов по проверке устойчивости и эффективности разработанных алгоритмов

В третьей главе представлены результаты исследования распределения изотопов водорода в нескольких градových облаках. Для десяти градových процессов по данным аэрологического зондирования на основе разработанной модели рассчитаны термодинамические и микроструктурные параметры, а также содержание изотопов в облачных частицах.

Приведены некоторые результаты расчетов эволюции облака от момента образования теплового импульса у поверхности земли до выпадения осадков. На рисунках в главе представлены изолинии вертикальной и горизонтальной скорости, коэффициента турбулентной диффузии, влажности, ледности и других параметров в рассматриваемой пространственной области в различные моменты развития облака.

На основе расчетов с применением уравнений модели, были получены оценочные значения относительных концентраций изотопов (без учета кристаллизационных процессов) в различных точках вертикального разреза облака. Момент времени, за который представлены данные, соответствует стадии развития облака.

В таблицах 1-3 представлены поле влажности, поле температуры, поле концентрации водорода на 35 минуте развития облака.

Таблица 1 Поле влажности (г/кг) в узлах сетки на 35 минуте развития облака (зонд от 04 05 83)

8	0 03	0 12	0 15	0 14	0 12	0 06	0 03	0 01	0 00	0 00
7 5	0 26	0 51	0 55	0 53	0 48	0 36	0 23	0 13	0 07	0 03
7	0 41	0 75	0 69	0 66	0 55	0 44	0 36	0 26	0 15	0 07
6 5	0 34	0 70	0 62	0 57	0 44	0 34	0 29	0 23	0 15	0 08
6	0 28	0 61	0 50	0 40	0 38	0 21	0 17	0 15	0 11	0 06
5 5	0 20	0 47	0 40	0 23	0 11	0 08	0 08	0 08	0 07	0 04
5	0 05	0 29	0 28	0 43	0 04	0 02	0 03	0 04	0 04	0 02
4 5	0 02	0 15	0 16	0 04	0 01	0 01	0 02	0 02	0 02	0 01
Z/x	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Таблица 2 Поле температуры ($^{\circ}\text{C}$) в узлах сетки на 35 минуте развития облака (зонд от 04 05 83)

8	-38 6	-38 7	-38 4	-38 1	-38 0	-38 0	-38 1	-38 2	-38 4	-38 5
7 5	-33 8	-33 7	-33 3	-33 1	-33 0	-33 0	-33 1	-33 2	-33 3	-33 5
7	-28 9	-28 7	-28 4	-28 1	-28 0	-28 1	-28 2	-28 3	-28 4	-28 5
6 5	-24 1	-23 7	-23 5	-23 1	-23 1	-23 2	-23 3	-23 4	-23 5	-23 6
6	-19 2	-18 9	-18 6	-18 2	-18 3	-18 4	-18 6	-18 6	-18 7	-18 8
5 5	-14 3	-14 1	-13 8	-13 4	-13 4	-13 6	-13 8	-13 9	-13 9	-14 0
5	-9 4	-9 2	-9 0	-8 6	-8 6	-8 8	-9 0	-9 1	-9 1	-9 1
4 5	-4 4	-4 3	-4 1	-3 8	-3 7	-4 0	-4 1	-4 2	-4 2	-4 3
Z/ λ	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Таблица 3 Поле концентрации изотопов водорода в узлах сетки на 35 минуте развития облака (зонд от 04 05 83)

8	-156,6	-178,6	-175,6	-171,6	-162,7	-156,3	-152,9	-150	-147,1	-144,5
7 5	-146,4	-167,2	-164,2	-161,2	-152,6	-146,2	-142,8	-139,9	-136,9	-134,5
7	-136,1	-154,4	-151,5	-147,3	-142,3	-136	-132,6	-129,6	-126 7	-124,3
6 5	-124,4	-139,6	-137,6	-135,1	-131,3	-125,4	-121,9	-118,9	-116,2	-114,1
6	-111,9	-123,3	-122,5	-121,2	-117,7	-113,5	-110,5	-107,7	-105,3	-103,6
5 5	-98,7	-106	-106,1	-105,4	-103,4	-100,3	-97,8	-95,7	-93,9	-92,9
5	-89,8	-93 3	-94	-93,7	-92,9	-91,1	-89,5	-88,3	-87 6	-87,3
4 5	-82 3	-83 2	-83 5	-83 4	-83 2	-82 6	-82 3	-82 1	-82 0	-82 0
Z/ X	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Практическая реализация предложенного способа заключается в том, что сначала, используя пузырьковый метод, определяют температурный уровень образования капельного зародыша, а по изотопному методу - содержание изотопов на этом уровне, затем по модели вычисляют распределение изотопов по высоте

Для выбора распределения изотопов по высоте соответствующего зародышу или слою града используют скорость установившегося падения градин.

Для рассматриваемых в работе градовых процессов установившаяся скорость падения градин находится в пределах от 6 м/с до 20 м/с

На рисунке приводятся распределения изотопов водорода на 15-й (1), 25-й (2) и 35-й (3) минутах развития облака, определенные описанным выше методом. Для сравнения приведена кривая распре-

деления изотопов водорода (4), рассчитанная на основе адиабатической модели

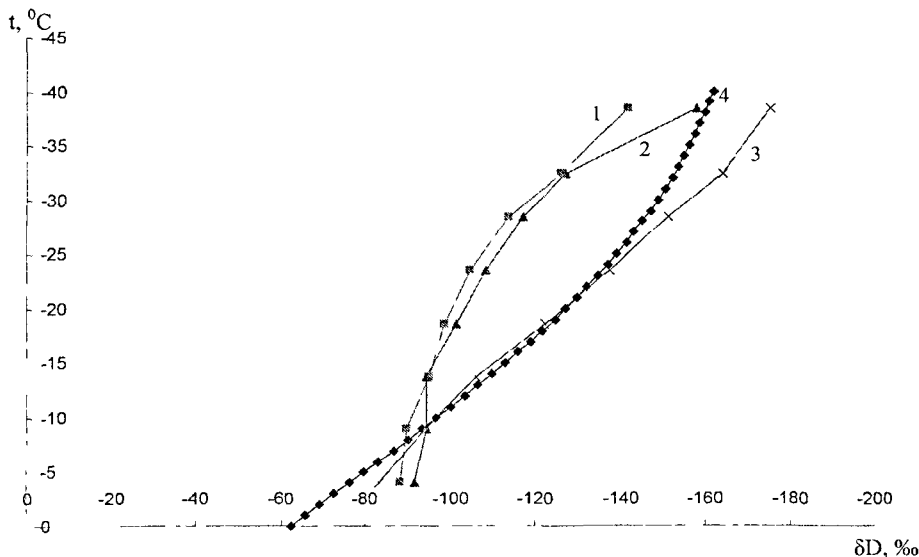


Рис. Распределение изотопов по температурным уровням в облаке 04 05 83г
1 — на 15 минуте развития облака, 2 — на 25 минуте развития, 3 — на 35 минуте развития облака, 4 — распределение изотопов водорода в облаке, рассчитанное на основе адиабатической модели

Как видно из рисунка, кривая распределения изотопов, построенная на основе адиабатической модели, близка к кривой распределения изотопов, полученной на основе предложенного метода на 35 минуте развития облака. Если учесть, что в этой стадии развития облака скорость восходящих потоков достигает 16 м/с, то при таких скоростях воздушного потока могут удерживаться и расти градины с диаметром более 14 мм, т.е. использование адиабатической модели для интерпретации изотопных данных градин корректно только для слоев градин диаметром более 14 мм.

В рассматриваемом градовом процессе 04 05 83 г содержание изотопов изменялось от -81‰ до -102‰, по адиабатической модели температурный диапазон образования градин составил -5 — -13 °C, а по предложенной модели -5 — -24 °C. Диапазон роста градин, полученный на основе адиабатической модели, очень маленький.

Оценка температурного уровня образования зародышей и слоев градин градового процесса 04 05 83 г приведена в таблице 4

Таблица 4 Температурные уровни образования зародышей и слоев градин

№ градины	Типы слоя или зародыша	Температурный уровень по адиабатической модели, °С	Температурный уровень по предложенной модели, °С
1	Крупяной зародыш	-12,5	-24
	Матовый слой	-9	-17
	Прозрачный слой	-10,5	-10,5
2	Капля	-10	-14
	Прозрачный слой	-12	-17
	Матовый слой	-13	-13

Как показывает анализ вышеприведенного материала, предложенная численная модель формирования изотопного состава и метод исследования градообразования более широк, чем существующий метод на основе адиабатической модели облака

Изотопный метод, основанный на адиабатической модели, целесообразно использовать для интерпретации слоев града, которые образуются в более зрелой стадии развития облака, но не корректен при интерпретации изотопного состава градин в начальной стадии их роста

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе получены следующие наиболее важные результаты, имеющие важное научное и практическое значение

- 1 На основе двумерной нестационарной модели конвективного облака с детальным описанием микрофизических процессов создана численная модель формирования изотопного состава облачных частиц В модель включены уравнения, описывающие фракционирование изотопов водорода при конденсационных процессах
- 2 Рассчитаны распределения изотопов водорода для нескольких градовых процессов Получено, что увеличение скорости вос-

- ходящего потока приводит к более быстрому уменьшению концентрации изотопов по высоте
- 3 Показано, что для более точного расчета распределения изотопов по высоте необходимо использовать точку отсчета, которая определяется по совместному использованию пузырькового и изотопного методов анализа капельных зародышей
 4. На основе анализа изменения распределения изотопов с высотой на разных стадиях развития облака показано, что слои и зародыши градин, образованные на разных уровнях, могут иметь одни и те же значения. Для их различия необходимо использовать характеристики градин, в частности, установившуюся скорость падения градин
 5. Разработан метод определения условий зарождения и роста града в облаках на основе численной модели формирования изотопного состава облачных частиц, в котором для нахождения точки отсчета используются совместно пузырьковый и изотопный методы анализа капельных зародышей, при этом для выбора распределения изотопов по высоте используются данные скорости установившегося падения градин
 - 6 Определены уровни образования зародышей и слоев градин градового процесса 04 05 83 г. Получено, что градины образовались в температурном интервале от -5°C до -24°C
 7. Разработанная двумерная нестационарная модель формирования изотопного состава облачных частиц позволяет более детально исследовать распределение изотопов и механизм градообразования в облаке

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах

- 1 Хучунаева С Б Об одном подходе к интерпретации изотопного состава градин // Конференция молодых ученых КБНЦ РАН - Нальчик, 2003 - С 20 – 22
- 2 Хучунаева С Б Некоторые результаты микрофизических и изотопных исследований зародышей градин // Конференция молодых ученых КБНЦ РАН – Нальчик, 2004 - С 46 – 47

- 3 Хучунаева С Б Изотопный метод исследования града // Материалы V конференции молодых ученых КБНЦ РАН – Нальчик, 2005 - С. 49 – 52
- 4 Хучунаева С Б Микрофизические и изотопные исследования града // Материалы V конференции молодых ученых КБНЦ РАН – Нальчик, 2005 - С 52 – 54
- 5 Тлисов М И , Шаповалов А В , Хучунаева С.Б Изотопная модель градового облака // Всероссийская конференция по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, посвященная 70-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции РАН - ВГИ, Нальчик 2005 - С 48 - 49
- 6 Хучунаев Б М , Хучунаева С Б Некоторые аспекты дальнейшего развития наземных методов исследования града // Всероссийская конференция по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, посвященная 70-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции РАН - ВГИ, Нальчик, 2005 - С 54
- 7 Хучунаева С Б Исследование механизма образования града на основе двухмерной изотопной модели облака // Конференция молодых ученых КБНЦ РАН – Нальчик, 2005 - С 38
- 8 Хучунаева С.Б , Тлисов М И , Шаповалов А В Математическая модель распределения изотопов водорода в градовом облаке // X Всероссийская конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и образование» Томский государственный педагогический университет – Томск, 2006 - С 241-245
- 9 Тлисов М И , Шаповалов А В , Хучунаева С Б Некоторые результаты использования изотопной модели для исследования условий зарождения и роста града // Вторая конференция молодых ученых национальных гидрометеослужб государств – участников СНГ, «Новые методы и технологии в гидрометеорологии» – Москва, 2006 - С 22 – 23
- 10 Куповых Г В , Хучунаева С Б , Шаповалов А В Физико-математическая модель формирования изотопного состава градин в мощных конвективных облаках // Известия высших учебных заведений, Северо-Кавказский регион - Ростов –на – Дону, 2006 - Вып 11 - С 39-43
- 11 Куповых Г В , Хучунаева С Б , Шаповалов А В Исследования формирования изотопного состава градин в облаках при их эво-

люции // Известия высших учебных заведений, Северо-Кавказский регион - Ростов – на – Дону, - 2006 – Вып 12 - С 52-57

Лицензия ПД № 00816 от 18 10 2000 г

Сдано в набор 25 04 07 Подписано в печать 26 04 07
Гарнитура Таймс Печать трафаретная Формат 60x84¹/₁₆
Бумага писчая Усл п л 1 Гираж 80 Заказ № 979

Гипография ФГОУ ВПО «Кабардино-Балкарская
государственная сельскохозяйственная академия»
360004 г Нальчик, ул Тарчокова, 1а