

УДК 551.576.1: 551.578

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ ФОРМИРОВАНИЯ ОСАДКОВ В СМЕШАННОМ ОБЛАКЕ

© 2022 г. **В. Н. Пискунов<sup>a</sup>**, **К. Г. Гайнуллин<sup>a, \*</sup>**, **А. М. Петров<sup>a</sup>**,  
**М. А. Затевахин<sup>b, \*\*</sup>**, **Е. Н. Станкова<sup>c, \*\*\*</sup>**

<sup>a</sup>ФГУП “РФЯЦ-ВНИИЭФ”, пр. Мира 37, Саров, Нижегородской обл., 607190 Россия

<sup>b</sup>АО “АТОМПРОЕКТ”, ул. Савушкина, д. 82, Санкт-Петербург, 197183 Россия

<sup>c</sup>Санкт-Петербургский государственный университет,  
Университетская набережная, д. 7–9, Санкт-Петербург, 199034 Россия

\*e-mail: KGGainullin@vniief.ru

\*\*e-mail: m.zatevakhin@gmail.com

\*\*\*e-mail: e.stankova@spbu.ru

Поступила в редакцию 12.05.2021 г.

После доработки 19.02.2022 г.

Принята к публикации 11.04.2022 г.

В работе представлены результаты исследования применимости системы кинетических уравнений, описывающих микрофизические процессы в трехфазной системе пар–вода–лед, для расчета кинетики формирования осадков в смешанном облаке. Для этого используются экспериментальные данные, полученные при наблюдении развития мощного кучевого облака в штате Монтана, США, 19.07.1981. Динамика облака описывается в рамках полуторамерной модели. Приведено сравнение результатов, полученных по кинетической модели, с данными, полученными по модели с параметризованной микрофизикой.

**Ключевые слова:** кинетические уравнения конденсации/коагуляции, трехфазная система, микрофизика смешанных облаков

**DOI:** 10.31857/S0002351522040125

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Кинетика водяных капель и частиц твердой фазы представляет собой центральную проблему формирования осадков в смешанных облаках. В этом случае осадки образуются, в основном, за счет появления ледяной фазы вследствие сублимации водяного пара и замерзания капель воды. Рост образовавшихся ледяных частиц происходит в результате взаимодействия этих частиц как друг с другом, так и с водяными каплями.

Известно большое число моделей, предназначенных для описания этих процессов. Эти модели можно разделить на две большие группы. Первая группа – это модели с параметризованной микрофизикой [1–3, 36]. В них рассматривается эволюция интегральных параметров, таких, как удельное содержание гидрометеоров – капель, ледяных кристаллов, снежных хлопьев, частиц крупы и града. Относительно небольшое число интегральных параметров, и, соответственно, уравнений, описывающих их эволюцию, делают модели с параметризованной микрофизикой вычислительно эффективными и достаточно простыми для анализа.

Однако, использование для параметризации различных полуэмпирических формул ограничивает применимость этих моделей для исследования облачных процессов – в частности, возникают трудности при описании коагуляции частиц различной природы и моделировании перехода облачных капель в дождевые с использованием схемы Кесслера [4–5].

Обычно считается, что модели с детальной микрофизикой [6–14, 33] свободны от этих недостатков. В этих моделях форма спектров гидрометеоров не задается заранее, а рассчитывается путем численного решения системы кинетических уравнений. Однако, использование моделей с детальной микрофизикой также сопряжено с определенными проблемами [15] – например, использование схемы Берри-Рейнхарда [16] для решения кинетических уравнений коагуляции не обеспечивает сохранение суммарной массы коагулирующих частиц [9]. Схема Коветца-Олунда [17] гарантирует выполнение закона сохранения массы, однако приводит к сильному сдвигу спектра в область крупных частиц [37]. Многие методы, используемые для численного решения уравнений кон-

денсационного роста, обладают схемной диффузией, которая может приводить к нереалистичному расширению спектра облачных частиц, и, соответственно, более быстрому процессу формирования осадков [6, 11, 17]. Различные “лагранжевы” подходы или метод характеристик свободны от указанных выше недостатков, однако их использование в динамических моделях облаков связано с необходимостью интерполяции полученного решения на фиксированную сетку. Процедурам интерполяции присущи те же проблемы, что схемам решения уравнения переноса. Это в частности вынудило авторов [18] разработать специальную процедуру интерполяции, существенно снижающую искажение спектра за счет схемных эффектов. Кроме того, при попытках использовать модели с детальной микрофизикой для расчета процессов в смешанных облаках возникают дополнительные проблемы, связанные необходимостью описания многообразия форм и свойств частиц ледяной фазы, механизмов образования первичных ледяных частиц и т.п. (см., например, [12], [19]).

Проведение исследований с помощью моделей с детальной микрофизикой невозможно без тщательной верификации этих моделей на основе сравнения их результатов с данными натурных наблюдений. Однако имеющиеся материалы [12, 20, 21, 38] показывают, что в этой задаче есть свои проблемы. Действительно, наибольшую информативность обеспечивает прямое сравнение параметров в известной точке облака на конкретной минуте его развития. Однако доступные данные такого типа достаточно ограничены. В работе [19] говорится, что самолетные измерения до сих пор остаются случайным отбором в сильно меняющихся в пространстве и времени полях. Поэтому сравнение расчетных и экспериментальных данных ограничивается в основном максимальными значениями некоторых интегральных параметров и вертикальными профилями горизонтально осредненных значений. Типичный пример верификации можно найти в работе [12], где приведены результаты сравнения полученных в расчетах параметров с экспериментальными данными. Сравнение ограничивается сопоставлением средних значений влажности на разных высотах с экспериментальными данными, полученными при пролетах самолета на этой высоте. Очевидно, что этого недостаточно для квалифицированного заключения о возможностях трехмерной нестационарной модели облака.

В связи с этим большой интерес представляет эксперимент CSOPE [22, 23], в котором было осуществлено детальное наблюдение за развитием и распадом изолированного кучево — дождевого облака. Полученные в эксперименте данные дают уникальную возможность для проверки работоспособности численных моделей.

Известны работы [24, 25], посвященные численному моделированию этого эксперимента. В работе [24] расчет проводился с помощью двумерной модели с параметризованным описанием микрофизических процессов. Сравнение полученных результатов с данными натурального эксперимента показали, что модель хорошо воспроизводит общие характеристики облака (скорость роста высоты верхней границы и геометрические размеры), а также эволюцию радиоэха. Однако высота нижней границы моделируемого облака была примерно на 1 км ниже экспериментального значения. Максимальные значения скорости восходящего потока и влажности примерно в два раза превышали значения, наблюдаемые в эксперименте. Осадки на поверхности земли в модельном облаке также появились раньше. Авторы объясняют такие несоответствия за счет параметризованного описания микрофизических процессов, которое приводит к переоценке общей влажности облака.

В работе [25] данные по эксперименту использовались для тестирования нестационарной полуторамерной модели облака с параметризованным описанием микрофизических процессов. Для инициализации развития облака использовалась так называемая “накачка”: на уровне нижней границы облака задавалось постоянное значение скорости, которая выключалась после появления осадков. По мнению авторов, модельное облако в целом хорошо воспроизводило основные характеристики, наблюдаемые в эксперименте: нижнюю и верхнюю границы облака, максимальную скорость восходящего потока.

В этих работах использовалось параметризованное описание микрофизических процессов, а сравнение расчетных и экспериментальных данных проводилось для некоторых экстремальных и характерных значений, а также по распределениям радиолокационной отражаемости. Целью настоящей работы было сопоставления облачных характеристик, полученных по модели с детальной микрофизикой с данными натурального эксперимента в сходственных пространственно—временных точках.

В работе использовалась кинетическая модель [26], откалиброванная на большом числе задач, имеющих аналитическое или надежное численное решение [26, 27, 34]. Для расчетного моделирования эксперимента модель [26] была интегрирована с динамическим блоком полуторамерной модели.

## 2. КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

В общем случае частицы являются композитными (смешанными), то есть одновременно со-

стоящими как из воды, так и изо льда. Характерные времена формирования и роста капель в облаках составляют десятки минут, время замерзания капель гораздо меньше, поэтому процесс промерзания каждой капли можно считать мгновенным, а смешанные частицы не рассматриваются из-за малых времен их существования. В этой модели учитываются только два сорта частиц: водяные капли с концентрацией  $c_w(g, t)$  и чисто ледяные частицы с концентрацией  $c_i(g, t)$ , причем полный спектр  $n = c_w + c_i$ ,  $v_w(g)$  и  $v_i(g)$  — скорости конденсационного роста (испарения) водяных капель и ледяных частиц. Кинетические уравнения, описывающие процессы формирования частиц в таком смешанном облаке, получены в [26]:

$$\begin{aligned} & \partial_t c_w(g, t) + \partial_g [v_w(g) c_w(g)] = \\ & = \frac{1}{2} \int_0^g K(g-s, s) c_w(g-s) c_w(s) ds - \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$- c_w(g) \int_0^\infty K(g, s) n(s) ds + J_w(g, t),$$

$$\partial_t c_i(g, t) + \partial_g [v_i(g) c_i(g)] =$$

$$= \frac{1}{2} \int_0^g K(g-s, s) c_i(g-s) [c_i(s) + 2c_w(s)] ds - \quad (2.2)$$

$$- c_i(g) \int_0^\infty K(g, s) n(s) ds + J_i(g, t).$$

Источники  $J_w$  и  $J_i$  описывают изменение спектров водяных капель и ледяных частиц в результате процессов нуклеации или спонтанного промерзания водяных капель. Ядра коагуляции зависят не только от масс частиц, но и от типа взаимодействий (вода-вода, лед-вода, лед-лед). Во избежание излишней громоздкости в уравнениях (2.1), (2.2) обозначение типов взаимодействий не приводится.

В расчетах используются реальные скорости конденсационного и коагуляционного роста водяных капель и ледяных частиц, описание “перегонки” между льдом и водой и обеспечивается учетом разности давлений насыщенного пара для этих фаз [26, 27, 34]. Для расчета кинетики коагуляции использован и незначительно модифицирован подход, развитый ранее в работах [28, 29] для композитных частиц. Учитываются все основные механизмы коагуляции — броуновская, турбулентная и гравитационная. Замерзание капель учитывается аналогично работе [30].

### 3. УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА SCORE

Эксперимент был проведен в штате Монтана 19 июля 1981 г., когда синоптическая ситуация благоприятствовала образованию одноячейковых (вследствие малого сдвига ветра) внутримас-

совых кучевых облаков. В этот день было детально исследовано развитие изолированного кучево-дождевого облака. Изолированное кучевое облако имело диаметр 6–8 км и примерно к 16<sup>30</sup> местного времени достигло максимума своего развития, после чего оно дало осадки, в основном в виде снега и ледяной крупы. Облако характеризуется значительным перепадом высот: температура и давление на уровне основания облака (3.8–3.9 км) составляли 0.8°C...2°C и 634...636 мбар; вершина облака к 16<sup>30</sup> достигла 10.5 км, где температура и давление были порядка –40 С...–50 С и 250 мбар. Скорость восходящего потока в облаке достигала 10 м/с. Непосредственно через облако проходили два самолета: Aegocommander (A) и King Air (K), а планер (S) большую часть времени провел в зоне основного восходящего потока.

Полученные в наблюдениях данные сравниваются с результатами расчетов, выполненных с использованием в качестве ядер конденсации монодисперсных аэрозольных частиц размером 0.03 мкм с постоянной начальной концентрацией, равной  $1.5 \times 10^{10} \text{ м}^{-3}$ . Тестовые расчеты показали, что учет падения концентрации частиц с высотой не оказывает принципиального влияния на получаемые результаты, поскольку практическое значение имеет лишь концентрация ядер на уровне конденсации.

Отдельную проблему представляет определение концентрации льдообразующих ядер. Ряд зависимостей, дающих значения концентраций льдообразующих ядер в зависимости от температуры и пересыщения, приведен в [35] (см. также [12]). Однако вероятно, эти оценки несколько занижены [35]. При выполнении настоящих расчетов начальная концентрация ядер варьировалась. Удовлетворительное согласие с экспериментальными данными получилось, если брать в качестве льдообразующих ядер частицы Айткена с концентрацией  $N_0 = 10^6 \text{ м}^{-3}$ .

В работе [22] приведены данные радиозондирования, полученные примерно за два часа до наблюдения облака. В настоящей работе эти данные использовались в виде кусочно-линейной аппроксимации по 12-ти точкам, при этом были устранены сухие задерживающие слои.

### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Все приведенные в настоящей работе результаты получены с использованием полуторамерной модели облака. Эта модель представляет собой удобный инструмент для исследования процессов, происходящих в конвективном облаке. Она достаточно проста, но позволяет в первом приближении учитывать влияние эффектов, связанных с вертикальным переносом частиц конденсированной фазы. В модели предполагается, что

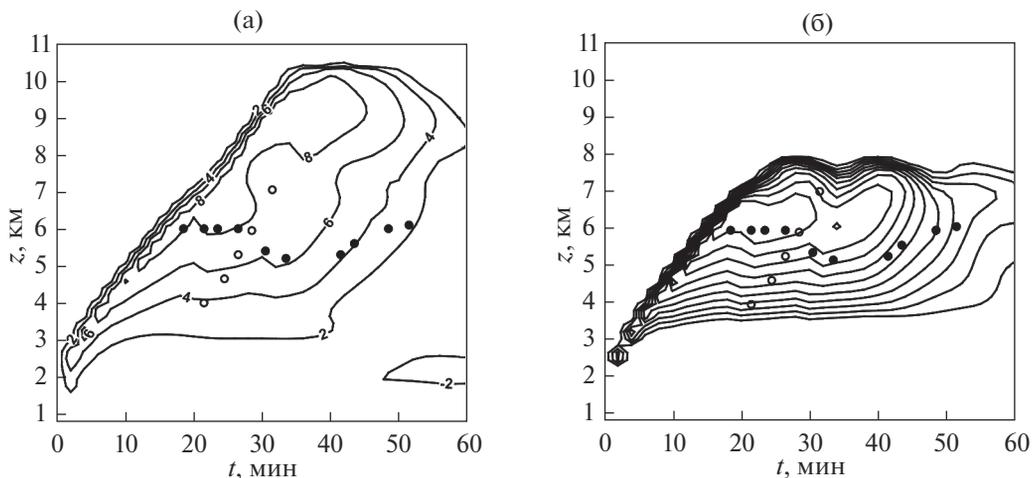


Рис. 1. Поле скорости, м/с, (слева) и влажности (справа), изолинии проведены через  $0.15 \text{ г/м}^3$ .

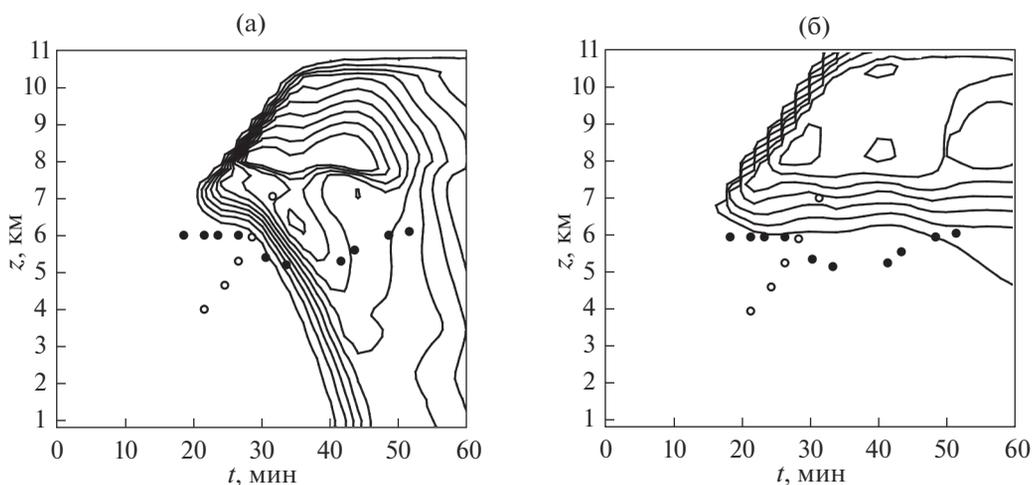


Рис. 2. Поле ледности (слева, изолинии проведены через  $0.15 \text{ г/м}^3$ ) и концентрации кристаллических частиц (справа, линии соответствуют уровням  $10^2, 10^3, 10^4, 10^5, 10^6, 10^7$  и  $10^8 \text{ 1/м}^3$ ).

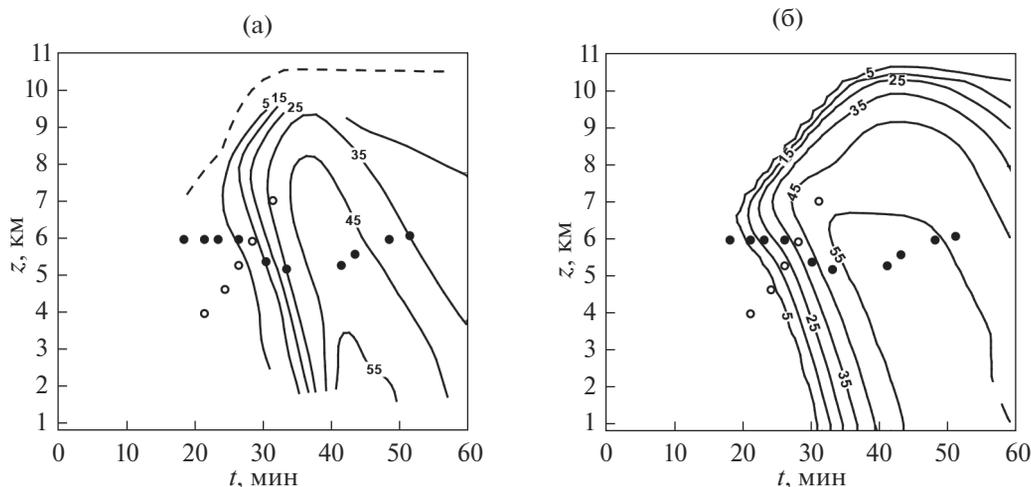
облако имеет форму цилиндра, вертикальные движения развиваются благодаря разрешению энергии неустойчивости и выделению скрытой теплоты конденсации. В системе уравнений термогидродинамики учитывается взаимодействие конвективного облака с окружающей средой посредством турбулентного перемешивания и упорядоченного притока через боковую границу, а также перераспределение различных частиц в пространстве за счет гравитационного осаждения.

Ниже приведены результаты, полученные по модели [13], в которой исходный кинетический блок [13] был заменен описанной выше моделью.

В соответствии с данными наблюдений [22] радиус облака был выбран равным 4 км, высота верхней границы расчетной области была равна 14.8 км, подстилающая поверхность находилась

на высоте 0.8 км над уровнем моря. Шаг сетки по вертикали составлял 189 м, 91 узел в пространстве масс был распределен на размерах частиц от 0.03 до 6000 мкм. Развитие облака инициализировалось начальным импульсом скорости треугольной формы в нижнем двухкилометровом слое (максимальная скорость 1 м/с) и 100% влажностью в слое от 1 до 2 км. При этом динамика облака воспроизводилась без искусственной “накачки”.

На рис. 1, 2 показаны пространственно-временные развертки основных полей. Отчетливо виден процесс формирования облачных капель при переходе через уровень конденсации, на высотах выше 8 км эти капли практически полностью замерзают, заметные концентрации кристаллических частиц появляются начиная с уровня 6.5 км, и на высоте 8 км эти концентрации



**Рис. 3.** Радиолокационная отражаемость, dBZ, данные наблюдений слева, пунктир – видимая верхняя граница облака, результаты расчетов – справа.

достигают величины порядка  $10^8 \text{ м}^{-3}$ . На этой высоте происходит формирование крупных ледяных частиц, которые затем выпадают на поверхность земли. На этих рисунках показаны траектория планера (пустые кружки) и проходы самолета (черные кружки).

Значения высоты нижней и верхней границ облака, полученные в расчетах, соответствуют экспериментальными данными в пределах точности измерений (500 м согласно [22]). Временной ход развития облака в общем соответствует данным наблюдений, хотя стадия диссипации получилась несколько затянутой. По-видимому, это связано с отсутствием в данной реализации полуторамерной модели второго цилиндра конечного радиуса, который моделирует компенсирующий нисходящий поток [31].

Для детального сравнения расчетных и экспериментальных данных необходима их временная синхронизация. В экспериментах [22, 23] время начала формирования облака не наблюдалось. Рисунок 3 работы [22] показывает, что в  $16^{18}$  верхняя кромка радиоэха наблюдалась на высоте 7.2 км. Верхняя граница модельного облака достигает высоты 7.2 км в момент времени 19.5 мин. Использование этого значения позволило построить тра-

екторию полета планера и области отбора проб при пролете самолета, показанные на рис. 1, 2.

Из экспериментальных результатов [22] для детального сравнения были выбраны данные, полученные при пролетах самолета на высотах 5–6 км и полете планера. В табл. 1 и 2 приведено сравнение расчетных и экспериментальных значений скоростей восходящих потоков [22].

При анализе полученных результатов необходимо принять во внимание следующие обстоятельства. Результаты, полученные по полуторамерной модели, представляют собой значения, осредненные по цилиндру, радиус которого составляет в данном случае 4 км. Поэтому их значения необходимо должны быть меньше измеренных величин, которые осреднялись по области размером порядка 1 км. Кроме того, экспериментальные данные по скоростям на траектории планера, приведенные в работе [22], характеризуются большим разбросом.

Расчетные результаты, приведенные в табл. 1, в общем согласуются с результатами измерений самолета King Air на стадии развития облака. Расчетная скорость восходящего потока на траектории планера (табл. 2) хорошо соответствует результатам

**Таблица 1.** Вертикальные скорости на высоте 5.2–6.1 км

$t_{\text{эксп.}}, \text{ Ч}$	16.17	16.20	16.22	16.25	16.29	16.32	16.40	16.42	16.47	16.50
$H, \text{ км}$	6.0	6.0	6.0	6.0	5.4	5.2	5.3	5.6	6.0	6.1
$W_{\text{эксп.}}, \text{ м/с}$	5	3	10	10	9	6	3	0.3	1	–2
$W_{\text{расч.}}, \text{ м/с}$	8.1	8.1	8.2	7.9	6.4	6.3	4.3	4.1	3.2	2.3

**Таблица 2.** Вертикальные скорости на высотах 4.0–7.0 км

Z, км	4.000	4.650	5.300	5.950	7.050
$t_{\text{эксп.}}$ , ч	16.20	16.23	16.25	16.27	16.30
$W_{\text{эксп.}}$ , м/с	4.0	6.0	7.2	9.0	13
$W_{\text{расч.}}$ , м/с	3.8	5.4	6.7	7.6	6.8

**Таблица 3.** Микрофизические параметры облака на высотах 5.2–6.1 км

$t_{\text{эксп.}}$ , ч	16.17	16.20	16.22	16.25	16.29	16.32	16.40	16.42	16.47	16.50
H, км	6.0	6.0	6.0	6.0	5.4	5.2	5.3	5.6	6.0	6.1
$LWC_{\text{эксп.}}$ , г/м <sup>3</sup>	1.37	1.01	1.75	2.19	1.77	0.71	0.34	0.04	0.06	0.04
$N_{\text{imm эксп.}}$ , л <sup>-1</sup>	–	–	0.004	0.05	0.24	0.14	1.48	–	2.71	1.31
$\rho Q_w$ , г/м <sup>3</sup>	1.5	1.6	1.6	1.6	1.3	1.2	1	1	0.75	0.06
$\rho Q_i$ , г/м <sup>3</sup>	~0	~0	0.002	0.006	0.1	0.4	1.1	1	0.9	0.8

измерения почти до 5 км, затем эта скорость падает, чего не наблюдается в экспериментальных данных.

В табл. 3 приведено сравнение расчетных значений микрофизических параметров с данными наблюдений. Здесь введены следующие обозначения: экспериментальные значения водности LWC, концентрации ледяных частиц миллиметрового размера  $N_{\text{imm}}$ . Результаты расчетов обозначены:  $\rho Q_w$  – водность,  $\rho Q_i$  – ледность.

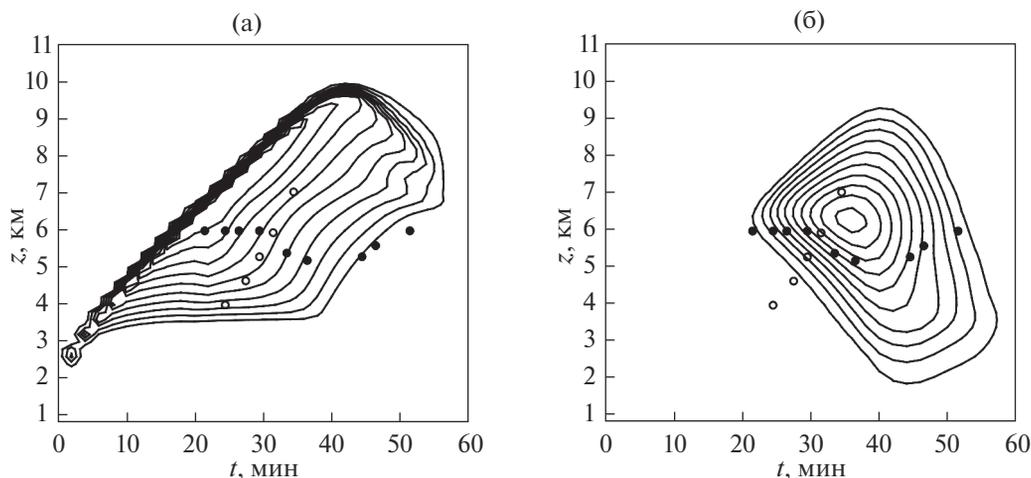
Соответствие приведенных в табл. 3 данных экспериментальным практически такое же, как и в случае скоростей: на стадии развития облака эти данные различаются не более, чем на 40%, что в данном случае можно считать очень хорошим согласием. Полученная в расчетах концентрация крупных (“дождевых”) капель крайне мала (практически не превышает значения 0.1 г/м<sup>3</sup>), что хорошо согласуется с данными наблюдений [22].

Рассмотрим характеристики ледяной фазы. Учитывая, что концентрация частиц миллиметрового размера порядка 1 л<sup>-1</sup> соответствует ледности порядка 0.5 г/м<sup>3</sup>, можно заметить, что полученные в расчетах значения ледности вполне соответствуют данным наблюдений. Отметим, что время появления заметного количества частиц кристаллических осадков (21 мин развития облака) хорошо согласуется с данными наблюдений (16<sup>23</sup>). Однако детальное сравнение данных по концентрации частиц указывает на некоторые расхождения: полная концентрация ледяных частиц, измеренная на этих высотах, намного больше величин, полученных в расчетах. Вероятно, это связано с работой механизмов вторичного льдообразования, не учитываемых

в модели. Эти механизмы начинают эффективно работать именно на этой стадии развития облака, приводя к резкому росту концентрации ледяных частиц [19].

В табл. 4 представлено сопоставление результатов расчетов с данными, полученными в полете планера. Здесь  $N_k$ ,  $N_l$  – счетные концентрации капель и ледяных частиц. Анализ приведенных в табл. 4 данных показывает, что полученные в расчетах значения суммарной водности  $\rho Q_w + \rho Q_i$  вполне соответствуют ходу экспериментальных значений LWC. Это позволяет сделать вывод, что, несмотря на осреднение и учет перемешивания, полуторамерная модель в состоянии воспроизвести ход процессов в восходящем течении, близком к адиабатическому. Однако высоте 7 км расчетные данные демонстрируют падение водности и существенный рост вклада ледяной фазы, в то время как измерения демонстрируют дальнейший рост LWC. Причины такого расхождения не совсем ясны. Возможно это следствие переоценки скорости образования ледяной фазы, либо погрешности измерения (см. например [32]).

Второе отличие наблюдается в эволюции концентрации облачных капель на траектории планера: скорость убывания этого числа в расчетных данных заметно больше. Поскольку величины расчетной и экспериментальной водностей по крайней мере до 6 км достаточно близки, то этого может быть может быть завышение эффективности коагуляции облачных капель. Кроме того, отсутствие в модели растворимых ядер конденсации может приводить к фиктивной перегонке па-



**Рис. 4.** Поле отношения смеси облачных капель (слева) и частиц кристаллических осадков (справа), изолинии проведены через 0.2 г/кг.

ра с мелких капель на крупные по мере падения пересыщения.

Одной из существенных интегральных характеристик облака, которая позволяет локализовать положение основной массы крупных кристаллических частиц, является радиолокационная отражаемость. На рис. 3 представлены пространственно-временные развертки полей радиолокационной отражаемости, полученные в расчете и эксперименте. Данные наблюдений на рисунке синхронизированы с расчетными данными. Соответствие можно признать вполне удовлетворительным.

В заключение представляется интересным привести сравнение с результатами, полученные с использованием полутримерной модели с параметризованной микрофизикой [3, 36]. Эта модель

включает уравнения переноса для водяного пара, облачных, дождевых капель, частиц кристаллических осадков и параметризованное описание следующих микрофизических процессов: конденсации водяного пара на облачных каплях и его сублимации на частицах твердой фазы, автоконверсии и коагуляции дождевых и облачных капель, испарения облачных и дождевых капель и кристаллов, обзёрнения кристаллических частиц, их плавления и испарения растаявших кристаллов, замерзания дождевых капель. В модели [3, 36] не учитывается вертикальное турбулентное перемешивание. Это приводит к уменьшению скорости роста высоты верхней кромки облака. Полученные результаты приведены на рис. 4.

**Таблица 4.** Изменение во времени водности, концентрации капель и ледяных частиц и ледности на высотах 4.0–7.0 км

Z, км	4.000	4.650	5.300	5.950	7.050
$t_{\text{эксп}}, \text{ч}$	16.20	16.23	16.25	16.27	16.30
$LWC_{\text{эксп}}, \text{г/м}^3$	0.1	0.9	1.5	2.0	2.4
$N_{\text{к, эксп}}, \text{см}^{-3}$	930	720	670	720	600
$N_{\text{л, эксп}}, \text{л}^{-1}$	0	0	0	~0	0.3...2*
$\rho Q_w, \text{г/м}^3$	0.56	0.97	1.3	1.5	1.3
$\rho Q_i, \text{г/м}^3$	0	0	~0	0.1	1.2
$N_{\text{к, расч}}, \text{см}^{-3}$	1660	610	390	240	110
$N_{\text{л, расч}}, \text{л}^{-1}$	0	~0	~0	0.03	42

\* – на высотах 7–7.1 км.

Сравнение хода водности, полученного по разным моделям, показывает, что в обоих случаях общий массовый баланс примерно одинаков. Значения суммарной водности на стадии развития облака, полученные по обеим моделям, примерно одинаковы. Однако, эволюция распределений капель и ледяных частиц демонстрирует качественное отличие – в модели с параметризованной микрофизикой присутствие облачных капель наблюдается вплоть до самой верхней границы облака, в то время как в модели с детальной микрофизикой эти капли практически полностью исчезают на высотах более 7 км. Пространственные распределения ледяных частиц, полученные по этим двум моделям, отличаются кардинально, что хорошо видно при сравнении рис. 2 и 4.

### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты валидации кода, предназначенного для расчета кинетики формирования осадков в смешанном облаке. Код разработан на основе кинетических уравнений конденсации/коагуляции для систем с двухфазной дисперсной средой, сформулированных в работе [26]. Динамика облака описывается в рамках полуторамерной модели.

Для валидации модели использовались данные, полученные при наблюдении развития кучевого облака, наблюдавшегося 19.07.1981 в штате Монтана, США. Расчетные и экспериментальные данные были синхронизированы по времени, что позволило провести детальное сравнение этих данных в конкретных пространственно-временных точках. Это сравнение показало, что результаты расчетов правильно отражают качественное поведение основных величин, а в некоторых случаях наблюдается и хорошее количественное согласие.

Проведенный анализ позволил установить конкретные положения модели, уточнение которых может привести к повышению качества моделирования. В частности:

- не учитываемые в модели процессы вторичного льдообразования могут приводить к занижению концентрации ледяных частиц на определенной стадии развития процесса;

- возможно требуется уточнение скоростей замерзания водяных капель при переохлаждении и учет растворимых ядер конденсации.

Представленные в настоящей статье результаты были получены авторами под руководством и при непосредственном участии В.Н. Пискунова. Владимир Николаевич был признанным авторитетом в области физики атмосферы – не только в России, но и за рубежом. Он был главной движущей силой и вдохновителем работ по этому направлению в РФЯЦ-ВНИИЭФ, без его непосред-

ственного участия, руководства и энтузиазма многое из того, что представлено в настоящей статье, осталось бы нереализованным. Его энергичность, работоспособность, кругозор и квалификация потрясли воображение и вдохновляли на саморазвитие. К сожалению, Владимир Николаевич скончался в 2013 г. Эта статья, подводящая своего рода краткий итог работ, является еще одной данью памяти и уважения этому талантливому и неординарному ученому.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Asai T., Kasahara A.A* Theoretical Study of the Compensating Downward Motions Associated with Cumulus Clouds // *J. Atmos. Sci.* 1967. V. 24, P. 487–497.
2. *Shiino J.A.* Numerical Study of Precipitation Development in Cumulus Clouds // *Papers in Meteorology and Geophysics.* 1978. V. 29, N. 4. P. 157–194.
3. *Баранов В.Г., Довгалюк Ю.А., Станкова Е.Н.* К выбору параметров конвективного облака для оценки эффекта воздействия // *Труды ГГО.* 1986. Вып. 497. С. 96–105.
4. *Kessler E.* On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulation // *Met. Monogr.* 1969. V. 10. №. 32. P. 84.
5. *Khain A., Ovtchinnikov M., Pinsky M., Pokrovsky A., Krugliak H.* Notes on the state-of-the-art numerical modeling of cloud microphysics. Review // *Atmospheric Research.* 2000. V. 55. P. 159–224.
6. *Takahashi T.* Warm rain, giant nuclei and chemical balance – a numerical model // *Atmos. Sci.* 1976. V. 33. P. 269–286.
7. *Hall W.D.* A detailed microphysical model within a two-dimensional dynamic framework: model description and preliminary results // *J. Atmos. Sci.* 1980. V. 37. P. 2486–2507.
8. *Хворостьянов В.И., Хаин А.П., Когтева Е.А.* Двумерная численная модель естественного развития конвективного облака и его засева льдообразующим аэрозолем // *Труды ВГИ.* 1989. № 7. С. 68–76.
9. *Kogan Y.L.* The simulation of convective cloud in a 3-D model with explicit microphysics. Part I: Model description and sensitivity experiments // *J. Atmos. Sci.* 1991. V. 48. P. 1160–1189.
10. *Reisin T., Levin Z., Tzzyion S.* Rain production in convective clouds as simulated in an axisymmetric model with detailed microphysics. Part 1: Description of the model // *J. Atmos. Sci.* 1996. V. 53. P. 497–519.
11. *Khairoutdinov M.E., Kogan Y.L.* Large-eddy simulation model with explicit microphysics: Validation against aircraft observations of a stratocumulus-topped boundary layer // *J. Atmos. Sci.* 1999. V. 56. P. 2115–2131.
12. *Ovtchinnikov M., Kogan Y.* An Investigation of Ice Production in Small Cumuliform Clouds Using a 3D

- Model with Explicit Microphysics. Part I: Model Description // *J. Atmos. Sci.* 2000. V. 57. P. 2989–3003.
13. Кароль И.Л., Затевахин М.А., Ожигина Н.А., Озолин Ю.Э., Рамаросон Р., Розанов Е.В., Станкова Е.Н. Численная модель динамических, микрофизических и фотохимических процессов в конвективном облаке // *Изв. АН. Физика атмосферы и океана.* 2000. Т. 36. № 6. С. 1–16. ISSN 0002-3515.
  14. Khain A., Pokrovsky A., Pinsky M. Simulation of Effects of Atmospheric Aerosols on Deep Turbulent Convective Clouds Using a Spectral Microphysics Mixed-Phase Cumulus Cloud Model. Part I: Model Description and Possible Applications // *J. Atm. Sci.* 2004. 1. 61. P. 2963–2982.
  15. Сергеев Б.Н., Смирнов В.И. Численное моделирование микрофизических процессов в капельных конвективных облаках // *Тр. ЦАО.* 1980. Вып. 137. С. 3–26.
  16. Berry E.X., Reinhardt R.L. An analysis of cloud drop growth by collection: Part I. Double distributions // *J. Atmos. Sci.* 1974. V. 31. P. 1814–1824.
  17. Kovetz A., Olund B. The effect of coalescence and condensation on rain formation in a cloud of finite vertical extent // *J. Atmos. Sci.* 1969. V. 26. № 6. P. 1060–1065.
  18. Liu Q.-F., Kogan Y.L., Lilly D.K., Khairoutdinov M.P. Variational Optimization Method for Calculation of Cloud Drop Growth in an Eulerian Drop-Size Framework // *J. Atmos. Sci.* 1997. V. 54. P. 2493–2504.
  19. Ovtchinnikov M., Kogan Y.L., Blyth A.M. An Investigation of Ice Production Mechanisms in Small Cumuliform Clouds Using a 3D Model with Explicit Microphysics. Part II: Case Study of New Mexico Cumulus Clouds // *J. Atm. Sci.* 2000. V. 57. P. 3004–3020.
  20. Connolly P.J., Choulaton T.W., Gallagher M.W., Bower K.N., Flynn M.J., Whiteway J.A. Cloud-resolving simulations of intense tropical Hector thunderstorms: Implications for aerosol–cloud interactions // *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 2006. V. 132. P. 3079–3106. <https://doi.org/10.1256/qj.05.86>
  21. Lawson R.P., Woods S. Morrison H. The microphysics of ice and precipitation development in tropical cumulus clouds // *J. Atmos. Sci.* 2015. V. 72. P. 2429–2445. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-14-0274.1>
  22. Dye J.E., Jones J.J., Winn W.P., Cerni T.A., Gardiner B., Lamb D., Pitter R.L., Hallett J., Saunders C.P.R. Early Electrification and Precipitation Development in a Small, Isolated Montana Cumulonimbus // *J. Geophys. Res.* 1986. V. 91, №. D1, P. 1231–1247.
  23. Gardiner B., Lamb D., Pitter R.L., Hallett J. Saunders C.P.R. Measurements of Initial Potential Gradient and Particle Charges in a Montana Summer Thunderstorm // *J. Geophys. Res.* 1985. V. 90. № D4. P. 6079–6086.
  24. Heldson J.H., Jr., Farley R.D. A numerical modelling study of a Montana thunderstorm. Part I: Model results versus observations // *J. Geophys. Res.* 1987. V. 92. № D5. P. 5645–5660.
  25. Taylor G.R. Sulfate Production and Deposition in Mid-latitude Continental Cumulus Clouds. Part I: Cloud Model Formulation and Base Run Analyses // *J. Atmos. Sci.* 1989. V. 46. P. 1971–1990.
  26. Piskunov V.N., Petrov A.M. Condensation/coagulation kinetic for mixture of liquid and solid particles: analytical solutions // *J. Aerosol Sci.* 2002. V. 33. P. 647–657.
  27. Piskunov V.N., Petrov A.M., Golubev A.I. Modeling particle formation kinetics in mixed-phase clouds // *J. Aerosol Sci.* 2003. V. 34. P. 1555–1580.
  28. Piskunov V.N. Coagulation kinetics of composite particles // *J. Aerosol Sci.* 1997. V. 28. №. 1. P. 647–648.
  29. Golubev A.I., Piskunov V.N., Ismailova N.A. “AERFORM” code for numerical simulation of aerosol formation kinetics // *J. Aerosol Sci.* 1999. V. 30. №. 1. P. 231.
  30. Shiino J. A numerical study of precipitation development in cumulus clouds // *Papers in Meteorology and Geophysics.* 1978. V. 29. № 4. P. 157–194.
  31. Раба Н.О., Станкова Е.Н. Исследование влияния компенсирующего нисходящего потока, сопутствующего конвективным течениям, на жизненный цикл облака с помощью полуторонерной модели с двумя цилиндрами // *Труды ГГО.* 2009. Вып. 559. С. 192–209.
  32. Korolev A.V., Isaac G.A., Strapp J.W., Cober S.G., Barker H.W. In situ measurements of liquid water content profiles in midlatitude stratiform clouds // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2007. V. 133. P. 1693–1699.
  33. Коган Е.Л., Мазин И.П., Сергеев Б.Н., Хворостьянов В.И. Численное моделирование облаков. М.: Гидрометеиздат, 1984. 165 с.
  34. Пискунов В.Н. Динамика аэрозолей. М.: Физматлит. 2009. 296 с.
  35. Pruppacher H.R. and Klett J.D. Microphysics of cloud and precipitation. Dordrecht, Kluwer Academic Press, 1997. 954 p.
  36. Баранов В.Г., Довгалюк Ю.А., Станкова Е.Н. Полуторонерная модель естественной эволюции конвективного облака и воздействий на него // *Вопросы физики облаков: 50 лет отделе физики облаков ГГО: Сборник избранных статей.* СПб.: Астерион, 2008. С. 138–150.
  37. Stankova E.N., Zatevakhin M.A. The modified Kovetz and Olund method for the numerical solution of stochastic coalescence equation. // *Proc. 12th International Conference on Clouds and Precipitation.* Zurich. 1996. P. 921–923.
  38. Дрофа А.С., Иванов В.Н., Данелян Б.Г., Колосков Б.П., Корнеев В.П., Бычков А.А., Частухин А.В. Натурный эксперимент по воздействию на облака солевым порошком // *Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы: Сб. науч. тр. Ч. 1.* 2017. С. 245.

## Modeling the Kinetics of Precipitation Formation in a Mixed-Phased Cloud

V. N. Piskunov<sup>1</sup>, K. G. Gainullin<sup>1, \*</sup>, A. M. Petrov<sup>1</sup>, M. A. Zatevakhin<sup>2, \*\*</sup>, and E. N. Stankova<sup>3, \*\*\*</sup>

<sup>1</sup> Russian Federal Nuclear Center – VNIIEF, Mira av. 37, Sarov, Nizhny Novgorod region, 607190 Russia

<sup>2</sup> JSC “АТОМПРОЕКТ”, Savushkina st., 82, St. Petersburg, 197183 Russia

<sup>3</sup> Saint-Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034 Russia

\*e-mail: KGGainullin@vniief.ru

\*\*e-mail: m.zatevakhin@gmail.com

\*\*\*e-mail: e.stankova@spbu.ru

The paper presents the results of a study of the applicability of a system of kinetic equations describing microphysical processes in a three-phase vapor–water–ice system for calculating the kinetics of precipitation formation in a mixed-phased cloud. Experimental data are used obtained from observing the development of a powerful cumulus cloud in the state of Montana, USA, on 19.07.1981. The cloud dynamics is described in terms of a 1.5-dimensional model. The results obtained by the kinetic model are compared with the data obtained by the model with parametrized microphysics.

**Keywords:** kinetic equation of condensation/coalescence, three-phase system, microphysics of mixed-phased clouds