



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: «Моделирование электрической структуры кучевых облаков»

Исполнитель Черкашин Даниил Михайлович
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

« 3 » июня 2024 г.

Санкт-Петербург
2024

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	3
1 АТМОСФЕРНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО.....	5
1.1 Ионы в атмосфере	5
1.1.1 Природа возникновения ионов.....	5
1.1.2 Характеристики ионизационного состояния атмосферы	7
1.2 Электрическое поле в атмосфере	10
1.2.1 Характеристики электрического поля	11
1.2.2 Изменчивость электрического поля	12
1.3 Механизмы электризации облаков	13
1.3.1 Механизмы микроэлектризации.....	13
1.3.1.1 Ионная электризация.....	13
1.3.1.2 Контактная электризация	14
1.3.1.3 Коагуляционная электризация	16
1.3.1.4. Индукционная электризация	17
1.3.2 Механизм макроэлектризации.....	17
1.4 Электричество конвективных облаков	18
1.4.1 Эволюция грозовых облаков.....	18
1.4.2 Электрические заряды в грозовых облаках.....	20
2 ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КУЧЕВОГО ОБЛАКА.....	24
2.1 Уравнения, описывающие гидродинамические и термические процессы в кучевом облаке	25

2.2 Уравнения, описывающие микрофизические процессы в кучевом облаке.....	28
2.2.1 Фазовые переходы влаги и коагуляция частиц	29
2.2.2 Процессы электризации	36
2.3 Численное решение системы уравнений.....	37
2.3.1 Численная схема, используемая для решения уравнений	37
2.3.2 Начальные и граничные условия	40
3 ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ.....	42
3.1 Исследуемый случай и описание синоптической обстановки.....	42
3.2 Входные данные	44
3.3 Результаты численных экспериментов и их анализ	45
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	57
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	58
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	60

ВВЕДЕНИЕ

Облака представляют собой сложную систему, от которой зависят очень многие процессы, протекающие как в атмосфере, так и на подстилающей поверхности. Подверженность облачности к естественным и антропогенным воздействиям приводят к изменению теплового и радиационного режима верхней геосферы, как следствие и к изменению климата Земли.

До сих пор неизвестны все процессы, оказывающие влияния на образование облаков, что ставит вопрос о необходимости их тщательного изучения [5,6]. Однако при натуральных и лабораторных экспериментах изучать облака очень трудно из-за сложности их материального воспроизведения. С появлением необходимых вычислительных мощностей и с развитием численного моделирование, изучение облаков стало проще и доступнее, проводя эксперименты численным путем [4].

Впрочем, и сегодня не существует такой модели облака, которая полноценно описывала бы все физические процессы. Это говорит об актуальности моей работы, в рамках которой я разрабатывал гидродинамическую модель конвективного облака.

Целью работы является создание гидродинамической модели кучевого облака с воспроизведением электрической структурой.

В задачи работы входят:

1. Изучить научную литературу по облакообразованию, конвективной деятельности и атмосферному электричеству;
2. Изучить существующие модели кучевых облаков;
3. Разработать модель кучевого облака;
4. Провести численные эксперименты;

5. Провести анализ результатов.

Выпускная квалификационная работа состоит из введения, трёх глав и заключения.

В первой главе описываются основные понятия об атмосферном электричестве. Приведены механизмы, которые приводят к процессу электризации облаков. Рассмотрена эволюция грозových облаков и формирование их электрической структуры.

Во второй главе представлено описание гидродинамической модели кучевого облака. Приведены уравнения, описывающие гидродинамические, термические и микрофизические процессы, а также численное решение этих уравнений.

В третьей главе описывается постановка задачи и представлены результаты численных экспериментов. Кроме того, приведены анализы полученных результатов.

Список использованных источников содержит 14 наименований.

1 АТМОСФЕРНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1.1 Ионы в атмосфере

Ионами называют частицы, имеющие приблизительно молекулярные размеры и несущие положительные и отрицательные заряды, как правило, один элементарный заряд. Вследствие их присутствия атмосфера не может быть идеальным изолятором и поэтому обладает свойством проводить электричество.

1.1.1 Природа возникновения ионов

В атмосфере ионы образуются за счет процесса ионизации газов, которые входят в состав воздуха. Под воздействием ионизатора, которым может быть как излучение радиоактивных веществ, содержащихся в земной коре и атмосфере, так и космические лучи, молекуле или атому газа сообщается некоторое количество энергии, необходимой для того, чтобы исключить один из наружных валентных электронов атома из сферы действия ядра. Таким образом, из первоначального электрически нейтрального атома, положительный заряд ядер которого равен общему заряду наружных электронов, лишившегося одного из них, он становится положительно заряженным. В свою очередь, выделившийся электрон при нормальном условии давления (1013,25 гПа) практически мгновенно, за время равное меньше 10^{-6} с, присоединяется к одному из нейтральных атомов, содержащихся в окружающей среде на дозволённом высшем энергетическом уровне, в результате образуя отрицательно заряженный ион.

Время существования таких первично образовавшихся молекулярных ионов не очень долгое (порядка доли секунды), в силу действия

поляризационных сил к ним присоединяются некое количество молекул из окружающего воздуха, образуя комплексы молекул, называемые легкими ионами и различаемые по структуре на положительный и отрицательные ионы.

На рисунке 1.1 представлена структура положительных и отрицательных легких ионов.

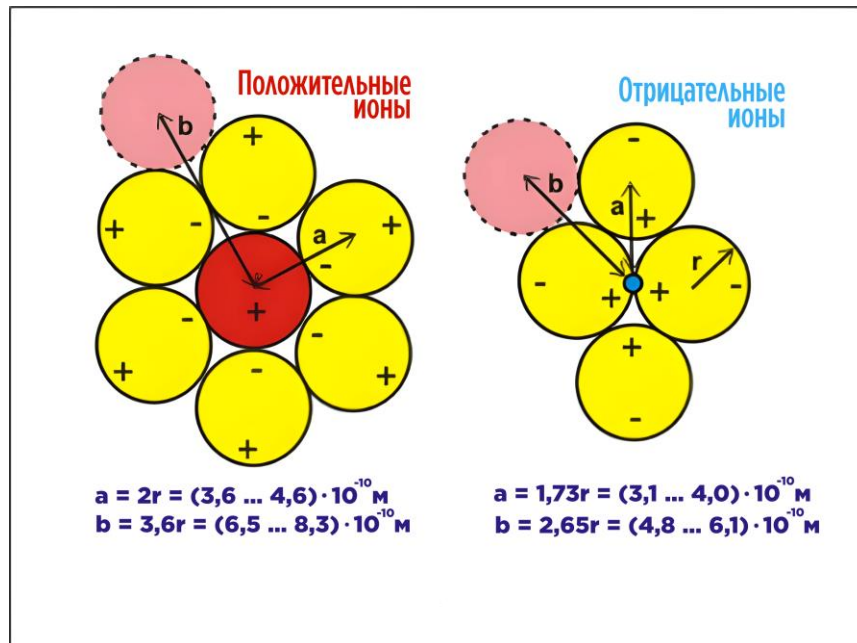


Рисунок 1.1 – Структура положительных и отрицательных легких ионов

[1]

В случае положительного иона положительный заряд находится в центре принадлежащей иону молекулы, около которого могут расположиться со всех сторон в виде мономолекулярного слоя около 12 нейтральных поляризованных молекул. Для отрицательного иона отрицательный заряд (электрон) находится на оболочке молекулы, входящих в состав иона, около которого может разместиться еще одна поляризуемая молекула, в результате образуя пару молекул «ион – поляризуемая молекула».

Легкие ионы, присоединяясь к мельчайшим частицам больших размеров, таким как ядра конденсации и остальным аэрозольным частицам, отдают им свой заряд. В результате такого процесса образуются более крупные по размерам ионы, называемые тяжелые ионы, или ионы Ланжевена. Как правило, иногда в атмосфере возможно обнаружить даже ионы и средних размеров, называемыми средними ионами [1].

1.1.2 Характеристики ионизационного состояния атмосферы

Ионизационное состояние атмосферы обуславливается находящимися в ней ионами, представляющие собой некоторую примесь в атмосферном воздухе, которая обладает отличительной чертой от всех остальных молекул воздуха и взвешенных частиц наличием у них электрических зарядов. Соответственно, на ионы наряду со всеми другими обычно действующими в атмосфере силами также дополнительно оказывают влияние и электрические силы. Благодаря этим силам ионы, находясь во внешнем электрическом поле, приобретают скорость, обратно пропорциональной напряженности поля, с которой они перемещаются вдоль силовых линий этого поля. Скорость этого дрейфа ионов называется подвижностью ионов:

$$k = \frac{u}{E} \quad (1.1)$$

где

k – подвижность иона

u – скорость иона;

E – напряженность электрического поля.

Она зависит от рода ионизируемого газа, а также от его температуры и давления, причем изменяется обратно пропорционально плотности газа.

В зависимости от размеров и величины подвижности ионов можно условно классифицировать ионы на определенные группы, представленные в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Основные группы ионов в атмосфере [1]

Группа ионов	Радиус иона, мкм	Подвижность k , м ² /(В · с)
Легкие	$0,66 \cdot 10^{-3}$	$> 10^{-4}$
Средние:		
Более мелкие	$(0,66 - 8) \cdot 10^{-3}$	$10^{-4} - 10^{-6}$
Более крупные	$(8 - 25) \cdot 10^{-3}$	$10^{-6} - 10^{-7}$
Тяжелые (ионы Ланжевена)	$(2,5 - 5,5) \cdot 10^{-2}$	$10^{-7} - 2,5 \cdot 10^{-8}$
<u>Ультратяжелые</u>	$> 5,5 \cdot 10^{-2}$	$\leq 2,5 \cdot 10^{-8}$

Число ионов, содержащихся в единице объема, или их концентрация в атмосфере характеризует её ионизационное состояние. Поэтому более подробно изучают распределение число ионов в зависимости от подвижностей легких и тяжелых ионов и находят кривую распределения, так называемый спектр ионов по подвижностям.

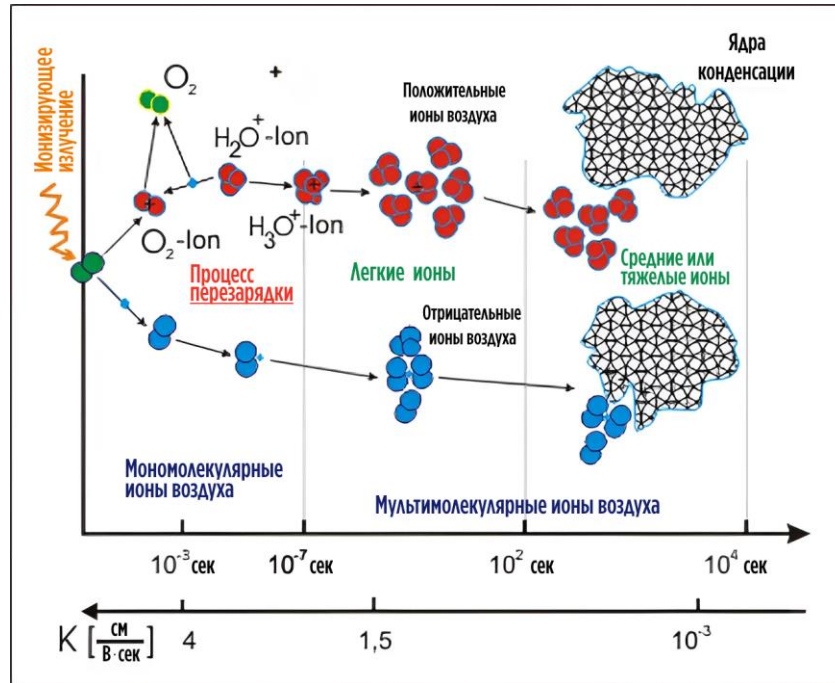


Рисунок 1.2 – Схема изменения структуры атмосферного иона и его подвижности в процессе дрейфа во внешнем электрическом поле [1]

Наличие ионов в атмосфере определяет её проводящую способность или проводимость. Она характеризуется плотностью тока проводимости атмосферы, равному переносимому заряду за счёт атмосферных ионов через каждый 1 м^2 поверхности, перпендикулярной направлению напряженности поля, в единицу времени.

$$i = i_+ + i_- = (n_+ k_+ + n_- k_-) \cdot eE \quad (1.2)$$

где

i – плотность суммарного тока проводимости атмосферы;

$i_{+/-}$ – плотность положительного/отрицательного тока проводимости атмосферы;

$n_{+/-}$ – концентрация положительных/отрицательных ионов;

$k_{+/-}$ – подвижность положительных/отрицательных ионов;

e – заряд ионов;

E – напряженность электрического поля.

По приведенным средним значениям подвижностей в таблице 1 основную роль в проводимости атмосферы в общем количестве обусловлена легкими ионами [1].

1.2 Электрическое поле в атмосфере

Как следствие совокупного действия заряда, находящегося на земной поверхности, и объемных зарядов, содержащихся в атмосфере в ней, всегда существует электрическое поле.

На рисунке 1.3 представлена схема формирования электрического поля атмосферы Земли и электрических токов в атмосфере [1].



Рисунок 1.3 – Схема формирования электрического поля атмосферы Земли и электрических токов в атмосфере [1]

1.2.1 Характеристики электрического поля

В связи с тем, что ориентация силовых линий направлена перпендикулярно относительно земной поверхности, являющейся проводником. Соответственно, в любой точке в атмосфере напряженность электрического поля может обладать различным направлениям и изменяться в достаточно широком пределе.

С помощью значений потенциала V можно в любой точке охарактеризовать электрическое поле атмосферы. Достаточно определить значение V в соответствующей точке пространства, имеющие координаты x , y и z , для составляющих напряженности электрического поля:

$$E_x = -\frac{\partial V}{\partial x}, E_y = -\frac{\partial V}{\partial y}, E_z = -\frac{\partial V}{\partial z} \quad (1.3)$$

где

E_x, E_y – горизонтальная составляющая напряженности электрического поля;

E_z – вертикальная составляющая напряженности электрического поля.

Тогда полная напряженность электрического поля будет равна:

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \quad (1.4)$$

Помимо этого, полную напряженность поля также можно получить, взяв в любой точке эквипотенциальной поверхности производную от потенциала по нормали к ней n :

$$E = -\frac{dV}{dn} = -gradV \quad (1.5)$$

В случае наличия в атмосфере объемных зарядов, тогда в каждой точке атмосферы должно быть выполнено также уравнение Пуассона:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -\frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon} \rho \quad (1.6)$$

В электрическом отношении имея более неоднородную атмосферу в вертикальном направлении, чем в горизонтальном, это дает возможность рассматривать электрическое поле в атмосфере только по вертикали:

$$\frac{d^2 V}{dh^2} = -\frac{dE}{dh} = -\frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon} \rho \quad (1.7)$$

1.2.2 Изменчивость электрического поля

Вблизи земной поверхности напряженность электрического поля имеет наибольшую изменчивость в зависимости от конкретного метеорологического явления, однако от облачности, осадков и гроз – градиент потенциала может колебаться в пределах нескольких десятков В/м и особенно изменять свой знак. Такие колебания связаны с нарушением некоего нормального поля, называемым «хорошей погодой», при котором отсутствуют грозы, туманы, осадки, облачность нижнего яруса, а скорость ветра составляет не более 3 м/с.

Поднимаясь вверх в атмосфере, потенциал возрастает, одновременно с этим градиент потенциала, или напряженность электрического поля, достаточно быстро убывает. Это связано с наличием в атмосфере объемных электрических зарядов, компенсирующие заряд Земли. Образование объемных зарядов в атмосфере обусловлено неодинаковым перемещением ионов различных знаков под действием электрического поля. Также они возникают в случаях процессов электризации разного рода, таких как: трения или распыления воды, во время

которых атмосфера получает заряженные частицы конкретного знака, например, пыль, дым, обломки ледяных кристаллов, а затем по мере интенсивности, они разносятся на значительные расстояния.

Очень значительно уменьшается с высотой напряженность электрического поля вблизи с земной поверхностью. Обусловлено это наличием некоторого слоя, высотой порядка 50-100 м, в котором происходит обогащение слоя атмосферы ионами знака, противоположному знаку заряда Земли [1].

1.3 Механизмы электризации облаков

В зависимости от масштабов процессов электризации, протекающих в облаке, их можно разделить на микроэлектризацию отдельных частиц облака и осадков и макроэлектризацию всего облака.

1.3.1 Механизмы микроэлектризации

На различных стадиях развития облака и при разных взаимодействиях с частицами облаков и осадков происходит различные по своей физике процессы электризации.

1.3.1.1 Ионная электризация

Ионная электризации осуществляется путем взаимодействия атмосферных ионов с частицами облаков, тем самым меняя заряд частиц. Как правило, это характерно для начальной стадии развития облаков и туманов, когда происходит процесс конденсационного роста частиц.

Изменение заряда частицы облака описывается данным выражением:

$$\frac{dq}{dt} = e[n_1\beta_1(\chi, r) - n_2\beta_2(\chi, r)] \quad (1.8)$$

где

$\beta_i(\chi, r)$ – частота захвата легкого иона частицей радиусом r и зарядом χe (в случае $i = 1$, то величина относится к положительным ионам, а если $i = 2$, то к отрицательным);

n_i – концентрация легких ионов.

В случае наличия внешнего электрического поля напряженности, подобное как в грозовых облаках, эффективность ионного заряжения может увеличиваться в зависимости от размера капель в 5-10 раз [2].

1.3.1.2 Контактная электризация

Контактная электризация осуществляется путем взаимодействия облачных гидрометеоров, то есть частиц облака и осадков, между собой, либо в результате их спонтанного разрушения. Такой процесс электризации может возникать в облаках:

1) При столкновении облачных кристаллов с крупинкой или градиной. Как в присутствии переохлаждённых капелек, так и в их отсутствии может происходить процесс электризации.

В зависимости от водности и температуры среды, то есть режима роста градины, будет определяться знак заряда градины. Помимо этого, зона мокрого роста льда градины соответствует положительному заряду, а зона сухого роста – отрицательному заряду.

Величина разделяющегося заряда характеризуется площадью контакта сталкивающихся частиц, соответственно зависит от скорости столкновения и размера кристаллика. Зависимость величины разделяющегося заряда от размера кристаллика выражается следующей формулой:

$$\Delta q_{л-л} = cd_{л}^2 \quad (1.9)$$

где

c – экспериментально установленный коэффициент, равный $c = 5 \cdot 10^{-6}$ Кл · м²;

$d_{л}$ – размер кристаллика, заключенный в интервал $10 \text{ мкм} \leq d_{л} \leq 300 \text{ мкм}$.

2) При разбрызгивании и частичном намерзании переохлажденных капелек на крупной ледяной частице. Капли разбрызгиваются при столкновении с градиной, если она росла в мокром режиме. Вследствие этого процесса возникает разделение зарядов, а знак зарядов определяется составом примесей, содержащихся в воде капли. В случае разбрызгивания переохлажденной каплей чистой воды градина заряжается положительно, а в случае примесей (растворов) по-разному происходит зарядение градины.

Зависимость величины разделяющихся зарядов от размера капли (чистой воды) выражается следующей формулой:

$$\Delta q_{\text{разб}} = b d_K^{1,7} \quad (1.10)$$

где

b – эмпирический коэффициент, равный $c = 5 \cdot 10^{-9}$ Кл · м^{-1,7};

d_K – размер капли.

3) При замерзании, деформации и раскалывании переохлажденных капель. Капли взрываются при столкновении с градиной, если она росла в сухом режиме. В результате чего ледяные осколки, образующиеся вследствие спонтанного взрывания капли, обычно заряжаются положительно, незамерзшая вода – отрицательно, а в случае взрывания за счёт капельки с градиной, то градина заряжается отрицательно.

Зависимость величины разделяющихся зарядов от размеров взрывающихся капель описывается следующей формулой:

$$\Delta q_{\text{вз}} = ad_K^{2,4} \quad (1.11)$$

где

a – эмпирический коэффициент, равный $c = 0,9 \cdot 10^{-5} \text{ Кл} \cdot \text{м}^{-2,4}$;

dd_K – размер взорвавшейся капли [2].

1.3.1.3 Коагуляционная электризация

Коагуляционная электризация происходит путем столкновения заряженных облачных частиц их слиянием таким образом, что частица-коллектор (крупинки, градины и др.) приобретает заряд частиц, с которыми произошло её слияние.

Скорость заряжения такого процесса может быть определена с помощью следующего выражения:

$$\frac{dQ}{dt} = \pi \sum_i E_i F_i (R + r_i)^2 (V - v_i) n_i q_i \quad (1.12)$$

где

Q, R, V – заряд, радиус и скорость падения более крупной частицы-коллектора;

E_i, F_i – вероятность столкновения i -ой облачной частицы и вероятность слияния i -ой облачной частицы с частицей-коллектором;

r_i, v_i, n_i, q_i – радиус, скорость падения, концентрация и заряд i -ой облачной частицы.

При взаимодействии разноименно заряженных частиц вероятности столкновения и слияния частиц возрастают, а в случае одноименно заряженных – убывают. Соответственно, процесс коагуляции в облаке протекает быстрее при наличии большого количества заряженных частиц [2].

1.3.1.4. Индукционная электризация

Индукционная электризация осуществляется за счет воздействия индукционного поля, при котором во внешнем электрическом поле происходит разрыв контакта между взаимодействующими частицами. В результате столкновения проводящие частицы обмениваются зарядами. В случае столкновения крупной ледяной частицы, поляризованной во внешнем электрическом поле, с мелкими частицами, при разрыве контакта между ними, мелкие частицы будут отнимать часть поляризованного заряда у крупной частицы.

Величина разделяющегося заряда может быть описана следующим выражением:

$$\Delta q_{\text{инд}} = \alpha \varepsilon_0 E r_{\text{ч}}^2 \quad (1.13)$$

где

α – коэффициент, зависящий от размера частиц;

ε_0 – электрическая постоянная;

E – напряженность внешнего электрического поля;

$r_{\text{ч}}$ – размер облачной частицы (капельки или кристаллика) [1].

1.3.2 Механизм макроэлектризации

В процессе макроэлектризации происходит разделения разноименно заряженных частиц в пространстве, тем самым приводит к преимущественному накоплению положительных или отрицательных зарядов в больших объемах облака, формируя его электрическую структуру.

Под влиянием силы тяжести происходит макроразделение зарядов в облаке в том случае, если заряды разных знаков связаны с гидрометеорами разных размеров и разной массы. Иными словами, происходит преобладающая положительная или отрицательная микроэлектризация частиц при том или ином

размере и их дальнейшее разделение на разноименно заряженные частицы. Таким образом, устойчивая поляризация облака достигается при наличии восходящих потоков в облаке, превышающая скорость падения облачных частиц и не превосходящая скорость падения частиц осадков [2].

1.4 Электричество конвективных облаков

1.4.1 Эволюция грозовых облаков

Грозным облаком принято называть кучево-дождевое (Cb) облако, в процессе развития которого возникают грозы (грозные явления). Как правило кучево-дождевые облака состоят из одной или нескольких конвективных ячеек, проходящие за период своей жизни через три стадии эволюции [1].

Начальная стадия развития начинается с момента зарождения облака и заканчивается выпадением первых капель дождя [3]. Она характеризуется преобладанием во всей толще ячейки восходящих движений, принимающих активное участие в формировании частиц осадков. По мере своего роста ячейка приобретает форму лысого кучево-дождевого (Cb calv) облака. В этих облаках напряженность электрического поля достаточно велика, однако недостаточна для того, чтобы перейти им в грозные [1].

На рисунке 1.4 представлена схематическое изображение начальной стадии развития облака.



Рисунок 1.4 – Схематическое изображение начальной стадии развития облака [10]

Далее наступает стадия зрелого облака, с которой связан момент выпадение первых капель дождя и появление кристаллов в облаке, а также наибольшие вертикальные и горизонтальные размеры [3]. Она характеризуется уже сформированной зоной осадков. Помимо этого, с относительно теплым восходящим потоком отмечается возникновение холодного нисходящего, появление которого обусловлено увлечением воздуха частицами осадков. К этому моменту времени кучево-дождевое облако уже приобретает форму с вершиной в виде кристаллической «наковальни» – *Cb inc.* У вершины облаков температура воздуха может понижаться ниже -22°C . В зоне зрелых облаков скорость вертикальных потоков, а также амплитуда и линейные размеры возмущений полей температуры и ветра – максимальны, а их изменение во времени – наименьшее [1].

На рисунке 1.5 представлена схематическое изображение зрелой стадии развития облака.



Рисунок 1.5 – Схематическое изображение зрелой стадии развития облака [10]

В заключении облако достигает своей окончательной стадии – диссипации или разрушения. Её продолжительность длится от момента начала разрушения облака до его трансформации в облако других форм. В процессе разрушения сначала исчезает нижняя часть облака, а затем уменьшается его высота верхней кромки. По итогу, как следствие возникают облака различных ярусов с небольшой вертикальной мощностью [3].

На рисунке 1.5 представлена схематическое изображение стадии диссипации облака.

1.4.2 Электрические заряды в грозовых облаках

Наличие больших электрических зарядов в грозовых облаках свидетельствуют молнии и другие наблюдаемые в них электрические явления. Расположение зарядов в облаке устроено определенным образом так, что заряды одного знака концентрируются над зарядами другого знака. В таком случае такое облако называют «биполярным» и различают его по положительной полярности,

если наверху находятся положительные заряды, и по отрицательной, если ситуация имеет противоположный характер.



Рисунок 1.6 – Схематическое изображение стадии диссипации облака [10]

Как правило, в зрелых грозовых облаках структура распределения электрических зарядов предстает собой триполь. Он состоит из определяющей области избыточного отрицательного заряда, расположенного в центральной части облака между изотермами $-5 \div -25$ °C, и областью избыточного положительного заряда, которая располагается в верхней части облака. Помимо этого, вторая область положительного избыточного заряда располагается в нижней части облака.

Схематическое изображение триполя представлено на Рисунке 1.7.

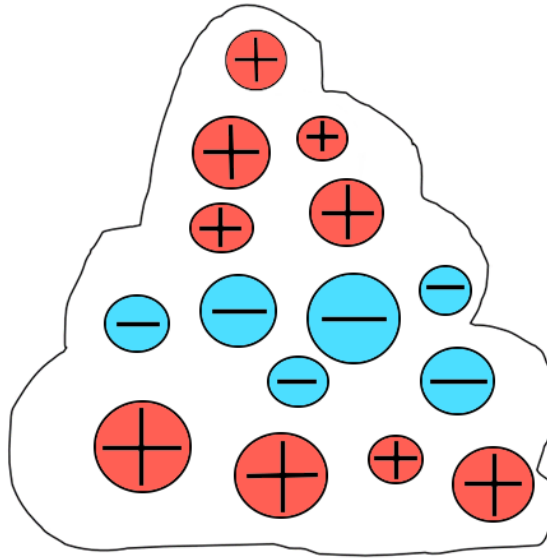


Рисунок 1.7 – Схематическое изображение триполя [1]

В довольно редких случаях бывает обратная ситуация, когда верхняя часть облака несет избыточный отрицательный заряд, а центральная – положительный заряд.

Основным локализатором заряда облака являются отдельные многочисленные гидрометеоры. В процессе переходов в различные агрегатные состояния, а также за счёт коронирования, соударения, дробления и слияния гидрометеоров происходит их заряджение. После этого в объеме облака происходит разделение гидрометеоров с зарядами различных знаков за счёт различной скорости их движения в гравитационном поле Земли. Как следствие это приводит к скапливанию зарядов противоположных знаков в различных частях облака и возникновению между ними электрического поля, способное усилить процесс его заряджения. Это обусловлено явлением поляризации гидрометеоров в электрическом поле, степень которой пропорционально напряженности поля.

Ввиду мощного вертикального развития активная часть грозового облака расположена выше 0 °С изотермы, в которой существуют гидрометеоры различных агрегатных состояний. К тому же, основные заряженные области имеют размеры порядка километров. Например, центр отрицательных зарядов в умеренных широтах расположен на высоте около 2-3 км, а центр положительных зарядов – на высоте 4-6 км.

В зависимости от структуры зарядов в грозовом облаке и его окрестностях варьируется напряженность электрического поля. Как правило, средняя напряженность электрического поля для облаков со средними параметрами в промежутке облако-земля превышает 10^4 В/м. Такой напряженности электрического поля вполне достаточно для продвижения уже возникшего лидера нисходящей молнии, а также и возможное развитие лидеров восходящих молний [1].

2 ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КУЧЕВОГО ОБЛАКА

Благодаря стремительному развитию ЭВМ за последние несколько десятилетий, позволило развиваться и совершенствоваться численным методам исследований физических процессов. Помимо этого, по экономическим причинам экспериментальные исследования оказывались весьма дорогими, и поэтому проводились в значительно меньшем объеме, чем это требовало для исследований. В области физике облаков это не стало исключением. По этим причинам к концу XX века это поспособствовало к появлению весьма большому количеству моделей с различными конфигурациями, с целью решения прикладных задач и научно-фундаментальных проблем, стоящими перед физикой облаков.

Одной из таких моделей является полная нестационарная численная модель конвективного облака, разработанная Главной геофизической обсерваторией им. А.И. Воейкова под руководством Довгалюк Ю. А., которая и была взята за основу для создания собственной соответственно.

Численная модель относится к полуторамерной размерности. Это значит, что в качестве варьируемого параметра в ней выступает горизонтальный размер облака, а оно само моделируется в форме цилиндра. Собственно, численной моделью конвективного облака учитываются гидродинамические, термические, микрофизические и электрические процессы. Для описания процессов фазовых переходов влаги и коагуляции частиц в облаке используется упрощенные параметрические выражения, благодаря которым удастся облегчить расчеты и сократить на них время [4].

2.1 Уравнения, описывающие гидродинамические и термические процессы в кучевом облаке

Гидродинамические и термические процессы описываются с помощью системы уравнений, состоящая из:

1). Уравнение движения

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -w \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2\alpha^2}{R} w |w| + \frac{2u_R}{R} (w - w_R) + g \frac{T_v - T_{v0}}{T_{v0}} - g(Q_c + Q_r + Q_i) \quad (2.1)$$

где

w – скорость восходящего потока;

α – коэффициент турбулентного перемешивания на боковой границе;

R – радиус облака;

u_R – радиальная составляющая скорости;

w_R – скорость восходящего потока на границе цилиндра;

g – ускорение свободного падения;

T_v и T_{v0} – виртуальная температура внутри облака и во внешней среде;

Q_c, Q_r, Q_i – отношение смеси облачных капель, дождевых капель и градин.

2). Уравнение неразрывности

$$\frac{2u_R}{R} + \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial}{\partial z} (\rho_a w) = 0 \quad (2.2)$$

где

ρ_a – плотность воздуха;

3). Уравнение сохранения энергии

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -w \left(\frac{\partial T}{\partial z} + \gamma_a \right) - \frac{2\alpha^2}{R} |w| (T - T_0) + \frac{2u_R}{R} (T - T_R) + F_T \quad (2.3)$$

где

T, T_0, T_R – температура воздуха внутри облака, во внешней среде и на боковой границе;

γ_a – сухоадиабатический градиент температуры;

F_T – источник-сток температуры.

4). Уравнение баланса отношения смеси водяного пара

$$\frac{\partial Q_v}{\partial t} = -w \frac{\partial Q_v}{\partial z} - \frac{2\alpha^2}{R} |w| (Q_v - Q_{v0}) + \frac{2u_R}{R} (Q_v - Q_{vR}) + F_v \quad (2.4)$$

где

Q_v, Q_{v0}, Q_{vR} – отношение смеси водяного пара внутри облака, во внешней среде и на боковой границе;

F_v – источник-сток водяного пара.

5). Уравнение баланса отношения смеси облачных капель

$$\frac{\partial Q_c}{\partial t} = -w \frac{\partial Q_c}{\partial z} - \frac{2\alpha^2}{R} |w| (Q_c - Q_{c0}) + \frac{2u_R}{R} (Q_c - Q_{cR}) + F_c \quad (2.5)$$

где

Q_c, Q_{c0}, Q_{cR} – отношение смеси облачных капель внутри облака, во внешней среде и на боковой границе;

F_c – источник-сток облачных капель.

6). Уравнение баланса отношения смеси дождевых капель

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_r}{\partial t} = & -(w - V_r) \frac{\partial Q_r}{\partial z} - \frac{2\alpha^2}{R} |w| (Q_r - Q_{r0}) + \\ & + \frac{2u_R}{R} (Q_r - Q_{rR}) + \frac{Q_r}{\rho_a} \frac{\partial}{\partial z} (\rho_a V_r) + F_r \end{aligned} \quad (2.6)$$

где

Q_r, Q_{r0}, Q_{rR} – отношение смеси дождевых капель внутри облака, во внешней среде и на боковой границе;

V_r – скорость седиментации дождевых-капель;

F_r – источник-сток дождевых капель.

7). Уравнение баланса отношения смеси частиц кристаллических осадков

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_i}{\partial t} = & -(w - V_i) \frac{\partial Q_i}{\partial z} - \frac{2\alpha^2}{R} |w| (Q_i - Q_{i0}) + \\ & + \frac{2u_R}{R} (Q_i - Q_{iR}) + \frac{Q_i}{\rho_a} \frac{\partial}{\partial z} (\rho_a V_i) + F_i \end{aligned} \quad (2.7)$$

где

Q_i, Q_{i0}, Q_{iR} – отношение смеси частиц кристаллических осадков внутри облака, во внешней среде и на боковой границе;

V_i – скорость седиментации градин;

F_i – источник-сток дождевых капель.

С целью замыкания системы дополнительно включаются следующие уравнения:

1). Уравнение состояния

$$p = \rho_a R_a T \quad (2.8)$$

где

p – давление воздуха;

R_a – газовая постоянная сухого воздуха.

2). Уравнение гидростатики

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho_a g \quad (2.9)$$

3). Выражение для насыщающего значения отношения смеси водяного пара над плоской поверхностью воды Q_{ws}

$$Q_{ws} = 3,8 \cdot \exp \left[\frac{17,27(T-T_0^*)}{T-35,86} \right] \frac{1}{p} \quad (2.10)$$

где

$$T_0^* = 273,15 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

4). Выражение для насыщающего значения отношения смеси водяного пара над плоской поверхностью льда Q_{is}

$$Q_{is} = 3,8 \cdot \exp \left[\frac{21,87(T-T_0^*)}{T-8} \right] \frac{1}{p} \quad (2.11)$$

2.2 Уравнения, описывающие микрофизические процессы в кучевом облаке

Микрофизические процессы – процессы, характерный пространственный масштаб которых не более 10^{-1} м. К таким процессам относят фазовые переходы влаги, коагуляция облачных частиц и частиц осадков, помимо этого, также

заряжение частиц разных фракций и обмен между ними электрическими зарядами [7]. Для описание указанных процессов используется параметризация, суть которой заключается в приближенном описании эволюции интегральных характеристик.

2.2.1 Фазовые переходы влаги и коагуляция частиц

Источник-сток субстанций (водяного пара, облачных капель, дождевых капель, ледяных частиц) определяются с помощью уравнений, которые представляют собой сумму и/или разность интенсивностей, составляющих его физических процессов. Эти уравнения характеризуют приращение массы субстанции на единицу массы среды за единицу времени и имеют размерность c^{-1} .

1). Источник-сток водяного пара

$$F_v = -P_{\text{конд}} - P_{\text{субл}} + P_{\text{с,исп}} + P_{\text{r,исп}} + P_{\text{i,исп}} + P_{\text{i тающ,исп}} \quad (2.12)$$

где

$P_{\text{конд}}$ – интенсивность конденсации водяного пара;

$P_{\text{субл}}$ – интенсивность сублимации водяного пара на градинах;

$P_{\text{с,исп}}$ – интенсивность испарения облачных капель;

$P_{\text{r,исп}}$ – интенсивность испарения дождевых капель;

$P_{\text{i,исп}}$ – интенсивность испарения градин;

$P_{\text{i тающ,исп}}$ – интенсивность испарения тающих градин;

2). Источник-сток облачных капель

$$F_c = P_{\text{конд}} - P_{\text{автоконв}} - P_{\text{коаг,с-r}} - P_{\text{с,исп}} - P_{\text{обзерн}} - P_{\text{замерз,с}} - P_{\text{перегон}} \quad (2.13)$$

где

$P_{\text{автоконв}}$ – интенсивность автоконверсии;

$P_{\text{коаг,с-r}}$ – интенсивность коагуляции облачных и дождевых капель;

$P_{\text{обзерн}}$ – интенсивность обзрения градин;

$P_{\text{замерз,с}}$ – интенсивность гомогенного замерзания облачных капель;

$P_{\text{перегон}}$ – интенсивность сублимации водяного пара на естественных льдообразующих ядрах при перегонке пара с облачных капель на облачные ледяные кристаллы.

3). Источник-сток дождевых капель

$$F_r = P_{\text{автоконв}} + P_{\text{коаг,с-r}} - P_{\text{замерз,r}} + P_{\text{таян}} - P_{\text{г,исп}} - P_{\text{коаг,r-i}} - P_{\text{коаг,r-ic,r}} \quad (2.14)$$

где

$P_{\text{замерз,r}}$ – интенсивность гетерогенного замерзания дождевых капель;

$P_{\text{таян}}$ – интенсивность таяния градин;

$P_{\text{коаг,r-i}}$ – интенсивность коагуляции градин и дождевых капель;

$P_{\text{коаг,r-ic,r}}$ – интенсивность интенсивность перехода дождевых капель в градины при коагуляции облачных ледяных кристаллов с дождевыми каплями.

3). Источник-сток облачных ледяных кристаллов

$$F_{ic} = P_{\text{замерз,с}} + P_{\text{перегон}} + P_{\text{х.м.}} - P_{\text{коаг,r-ic,ic}} - P_{\text{рост,ic}} \quad (2.15)$$

где

$P_{Х.М.}$ – интенсивность выброса ледяных частиц в результате действия механизма Халлетта-Моссоба;

$P_{\text{коаг},r-ic,ic}$ – интенсивность перехода облачных ледяных кристаллов в градины при коагуляции с дождевыми каплями;

$P_{\text{рост},ic}$ – интенсивность перехода облачных ледяных кристаллов в градины в результате сублимационного роста.

5). Источник-сток ледяных частиц осадков

$$F_i = P_{\text{замерз},r} + P_{\text{субл}} - P_{\text{таян}} - P_{i,\text{исп}} - P_{i\text{ таяющ},\text{исп}} + P_{\text{обзерн}} - P_{Х.М.} + P_{\text{рост},ic} + P_{\text{коаг},r-i} + P_{\text{коаг},r-ic,r} + P_{\text{коаг},r-ic,ic} \quad (2.16)$$

Подробные выражения слагаемых, которые входят в источники-стоки соответствующих субстанций.

$$P_{\text{конд}} = \begin{cases} \frac{Q_v - Q_{ws}}{\Delta t} \cdot \left(1 + \frac{L_v}{c_p} \frac{dQ_{ws}}{dT}\right)^{-1} & \text{при } Q_v \leq Q_{ws} \\ 0 & \text{при } Q_v > Q_{ws} \end{cases} \quad (2.17)$$

где

Q_v – отношение смеси водяного пара;

Q_{ws} – насыщающее значение Q_v над плоской поверхностью воды;

Δt – шаг по времени;

L_v – удельная теплота фазового перехода вода-пар.

$$P_{\text{с исп}} = \begin{cases} -\frac{Q_v - Q_{ws}}{\Delta t} \cdot \left(1 + \frac{L_v}{c_p} \frac{dQ_{ws}}{dT}\right)^{-1} & \text{при } Q_v < Q_{ws} \\ 0 & \text{при } Q_v \geq Q_{ws} \end{cases} \quad (2.18)$$

Пока в модели используется описание только выше приведённых процессов (все остальные слагаемые интенсивностей в уравнениях обнуляются). В дальнейшем для уточнения модели облака в неё будут добавлены и остальные процессы, которые описаны ниже.

$$P_{\text{субл}} = \begin{cases} \frac{N_{0i}}{\rho_a} \cdot 2\pi \cdot \left(\frac{Q_v}{Q_{is}} - 1\right) \cdot \left(\frac{L_s^2}{k_a R_v T^2} + \frac{1}{\rho_a Q_{is} D_v}\right)^{-1} \cdot \\ \cdot \int_0^\infty D_i C_{vi}(D_i) \cdot \exp(-\Lambda_i D_i) dD_i & \text{при } Q_v > Q_{ws} \\ 0 & \text{при } Q_v \leq Q_{ws} \end{cases} \quad (2.19)$$

где

D_i – диаметр градин;

N_{0i} и Λ_i – параметры функции распределения Маршалла-Пальмера для градин;

Q_{is} – насыщающее значение Q_v над плоской поверхностью льда;

$C_{vi}(D_i)$ – коэффициент вентиляции для градин;

L_s – удельная теплота фазового перехода лед-пар;

R_v – газовая постоянная водяного пара;

D_v – коэффициент диффузии водяного пара;

k_a – коэффициент теплопроводности воздуха;

$$P_{r,\text{исп}} = \begin{cases} -\frac{N_{0r}}{\rho_a} \cdot 2\pi \cdot \left(\frac{Q_v}{Q_{ws}} - 1\right) \cdot \left(\frac{L_v^2}{k_a R_v T^2} + \frac{1}{\rho_a Q_{ws} D_v}\right)^{-1} \cdot \\ \cdot \int_0^\infty D_r C_{vr}(D_r) \cdot \exp(-\Lambda_r D_r) dD_r & \text{при } Q_v > Q_{ws} \\ 0 & \text{при } Q_v \leq Q_{ws} \end{cases} \quad (2.20)$$

где

$C_{vr}(D_r)$ – коэффициент вентиляции для дождевых капель;

N_{0r} и Λ_r – параметры функции распределения Маршалла-Пальмера для градин;

D_r – диаметр дождевых капель;

$$P_{i, \text{исп}} = \begin{cases} -\frac{N_{0i}}{\rho_a} \cdot 2\pi \cdot \left(\frac{Q_v}{Q_{is}} - 1\right) \cdot \left(\frac{L_s^2}{k_a R_v T^2} + \frac{1}{\rho_a Q_{is} D_v}\right)^{-1} \cdot \\ \cdot \int_0^\infty D_i C_{vi}(D_i) \cdot \exp(-\Lambda_i D_i) dD_i & \text{при } Q_v < Q_{is} \\ 0 & \text{при } Q_v \geq Q_{ws} \end{cases} \quad (2.21)$$

$$P_{i \text{ тающ, исп}} = \begin{cases} -\frac{N_{0i}}{\rho_a} \cdot 2\pi \cdot \left(\frac{Q_v}{Q_{ws}} - 1\right) \cdot \left(\frac{L_v^2}{k_a R_v T^2} + \frac{1}{\rho_a Q_{ws} D_v}\right)^{-1} \cdot \\ \cdot \int_0^\infty D_i C_{vi}(D_i) \cdot \exp(-\Lambda_i D_i) dD_i & \text{при } Q_v < Q_{ws} \\ 0 & \text{при } Q_v \geq Q_{ws} \end{cases} \quad (2.22)$$

$$P_{\text{автоконв}} = K_1 \cdot \left(Q_c - \frac{K_1}{\rho_a}\right) \quad (2.23)$$

где

Q_c – отношение смеси облачных капель;

K_1 и K_2 – константы, варьируемые в зависимости от физико-географических условий.

$$P_{\text{коаг, c-r}} = \frac{\pi}{4} Q_c N_{0r} \int_0^\infty E_{r,c} \cdot (1 - S_{r,c}) (D_r + D_c)^2 \cdot \\ \cdot |V_r + V_c| \cdot \exp(-\Lambda_r D_r) dD_r \quad (2.24)$$

где

$E_{r,c}$ и $S_{r,c}$ – коэффициенты столкновения и не слияния при взаимодействии облачных капель с дождевыми;

D_c – диаметр облачных капель;

V_r и V_c – собственная скорость падения дождевых и облачных капель.

$$P_{\text{обзерн}} = \frac{\pi}{4} Q_c N_{0i} \int_0^{\infty} E_{i,c} \cdot (1 - S_{i,c}) (D_i + D_c)^2 \cdot |V_i + V_c| \cdot \exp(-\Lambda_i D_i) dD_i \quad (2.25)$$

где

$E_{i,c}$ и $S_{i,c}$ – коэффициенты столкновения и не слияния при взаимодействии облачных капель с градинами;

V_i – собственная скорость падения градин.

$$P_{\text{замерз, c}} = \begin{cases} K_{fc} \cdot Q_c & \text{при } T \leq T^{***} \\ 0 & \text{при } T > T^{***} \end{cases} \quad (2.26)$$

где

K_{fc} – коэффициенты пропорциональности;

T^{***} – пороговая температура, составляющая порядка -40°C .

$$P_{\text{перегон}} = \frac{N_{\text{ЛОЯ}}}{\rho_a} \cdot a \cdot m_{\text{ЛОЯ}}^b \quad (2.27)$$

где

$N_{\text{ЛОЯ}}$ и $m_{\text{ЛОЯ}}$ – счетная концентрация и масса льдообразующих ядер;

a и b – эмпирические коэффициенты.

$$P_{\text{замерз, r}} = \begin{cases} \frac{\pi^2 \rho_{\text{wat}}}{36 \rho_a} \cdot J_n(T) \cdot N_{0r} \int_0^{\infty} D_r^6 \cdot \exp(-\Lambda_r D_r) dD_r & \text{при } T \leq T^{**} \\ 0 & \text{при } T > T^{**} \end{cases} \quad (2.28)$$

где

J_n – скорость нуклеации льда, экспоненциально зависящая от T ;

ρ_{wat} – ПЛОТНОСТЬ ВОДЫ;

T^{**} – пороговая температура замерзания, варьируемая в зависимости от условий.

$$P_{\text{таян}} = \begin{cases} \frac{N_{0i}}{\rho_a} \frac{2\pi k_a (T - T^{**})}{L_f} \int_0^{\infty} D_i C_{vi}(D_i) \cdot \exp(-\Lambda_i D_i) dD_i & \text{при } T > 0^\circ\text{C} \\ 0 & \text{при } T \leq 0^\circ\text{C} \end{cases} \quad (2.29)$$

где

$T^* = 0^\circ\text{C}$;

L_f – удельная теплота фазового перехода лед-вода.

$$P_{\text{коаг},r-i} = N_{0i} N_{0r} \frac{\pi}{4} \rho_{wat} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} (D_r + D_i)^2 \cdot |V_r + V_i| \cdot D_r^3 \cdot \exp(-\Lambda_r D_r) \exp(-\Lambda_i D_i) dD_r dD_i \quad (2.30)$$

$$P_{\text{коаг},r-ic,ic} = \frac{\pi}{4} Q_{ic} N_{0r} \int_0^{\infty} E_{r,ic} (1 - S_{r,ic}) (D_r + D_{ic})^2 \cdot |V_r + V_{ic}| \cdot \exp(-\Lambda_r D_r) dD_r \quad (2.33)$$

где

D_{ic} – диаметр облачных ледяных кристаллов;

V_{ic} – собственная скорость падения облачных ледяных кристаллов;

$E_{r,ic}$ и $S_{r,ic}$ – коэффициенты столкновения и не слияния при взаимодействии облачных ледяных кристаллов с дождевыми каплями;

$$P_{\text{коаг},r-ic,r} = \frac{\pi}{6} \frac{\rho_{wat}}{\rho_a} N_{0r} \int_0^{\infty} P(D_r) \cdot D_r^3 \cdot \exp(-\Lambda_r D_r) dD_r \quad (2.33)$$

где

$P(D_r)$ – количество столкновений отдельно взятой дождевой капли диаметра D_r с ледяными кристаллами за единицу времени:

$$P(D_r) = \frac{\pi}{4} (D_r - D_{ic})^2 \cdot E_{r,ic} (1 - S_{r,ic}) \cdot |V_r + V_i| \cdot N_{ic} \quad (2.34)$$

2.2.2 Процессы электризации

Для описания процессов электризации используются уравнения баланса концентрации положительных ионов и отрицательных соответственно. На данный момент в них учитывается только первые два слагаемых. По мере усовершенствования модели будет рассмотрен вклад и остальных слагаемых и физических процессов в формирования электрической структуры облака.

1. Уравнение баланса концентрации положительных ионов N_p

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_p}{\partial t} = & q - \gamma N_p N_n - (w - E_z \mu_p) \cdot \frac{\partial N_p}{\partial z} + \frac{N_p w}{\rho_a} \frac{\partial \rho_a}{\partial z} - \\ & - \frac{2}{R} (u_R - E_R \mu_p) (N_{pR} - N_p) + \frac{2\alpha^2}{R} |w - E_z \mu_p| (N_{p0} - N_p) + \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial N_p}{\partial z} \right) + S_p \end{aligned} \quad (2.35)$$

где

q – интенсивность ионообразования;

γ – коэффициент рекомбинации ионов;

N_p и N_n – концентрация положительных и отрицательных ионов;

E_z и E_R – вертикальная и горизонтальная составляющая напряженности электрического поля;

μ_p и S_p – подвижность и источник-сток положительных ионов.

2. Уравнение баланса концентрации отрицательных ионов N_n

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_n}{\partial t} = & q - \gamma N_p N_n - (w - E_z \mu_n) \cdot \frac{\partial N_n}{\partial z} + \frac{N_n w}{\rho_a} \frac{\partial \rho_a}{\partial z} - \\ & - \frac{2}{R} (u_R - E_R \mu_n) (N_{nR} - N_n) + \frac{2\alpha^2}{R} |w + E_z \mu_n| (N_{n0} - N_n) + \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial N_n}{\partial z} \right) + S_n \end{aligned} \quad (2.36)$$

где

μ_n и S_n – подвижность и источник-сток отрицательных ионов.

2.3 Численное решение системы уравнений

2.3.1 Численная схема, используемая для решения уравнений

Ввиду решения системы уравнений методом сеток, производные в дифференциальных уравнениях аппроксимируются с помощью конечно-разностных аналогов [10]. В случае производной по времени было решено использовать направленные разности вперед, а для производной по пространству – центральные разности.

$$\frac{\partial f}{\partial t} \approx \frac{1}{\Delta t} (f_q^{s+1} - f_q^s) \quad (2.37)$$

$$\frac{\partial f}{\partial z} \approx \frac{1}{2\Delta z} (f_{q+1}^s - f_{q-1}^s) \quad (2.38)$$

где

s – номер шага по времени;

q – номер шага по пространству;

Δt – шаг по времени;

Δz – шаг по пространству.

В результате аппроксимации на сетке получена система конечно-разностных уравнений. Для моделирования эволюции облака использовался метод шагов по времени – двухуровневая схема Эйлера. С учетом численной схемы уравнения имеют следующий вид:

1). Уравнение движение

$$w_q^{s+1} = w_q^s - \Delta t \left(-\frac{w_q^s}{2\Delta x} (w_{q+1}^s - w_{q-1}^s) - \frac{2\alpha^2}{R} w_q^s |w_q^s| + \right. \\ \left. + \frac{u_{rq}^s}{R} (w_q^s - w_r) + g \frac{T_{vq}^s - T_{v0}}{T_{v0}} - g(Q_{cq}^s + Q_{rq}^s + Q_{iq}^s) \right) \quad (2.39)$$

2). Уравнение неразрывности

$$u_{Rq}^{s+1} = -\frac{R}{2} \left(\frac{1}{2\Delta x \cdot \rho_a^s} (w_{q+1}^s \cdot \rho_a^s - w_{q-1}^s \cdot \rho_a^s) \right) \quad (2.40)$$

3). Уравнение сохранения энергии

$$T_q^{s+1} = T_q^s - \Delta t \left(-w_q^s \left(\frac{1}{2\Delta x} (T_{q+1}^s - T_{q-1}^s) + \gamma_a \right) - \right. \\ \left. - \frac{2\alpha^2}{R} |w_q^s| (T_q^s - T_0) + \frac{2u_R}{R} (T_q^s - T_R) + F_T \right) \quad (2.41)$$

4). Уравнение отношение смеси баланса отношения смеси водяного пара

$$Q_{vq}^{s+1} = Q_{vq}^s - \Delta t \left(-w_q^s \left(\frac{1}{2\Delta x} (Q_{vq+1}^s - Q_{vq-1}^s) \right) \right) - \\ - \frac{2\alpha^2}{R} |w_q^s| (Q_{vq}^s - Q_{v0}) + \frac{2u_R}{R} (Q_{vq}^s - Q_{vR}) + F_v \quad (2.42)$$

5). Уравнение отношение смеси баланса отношения смеси облачных капель

$$Q_{cq}^{s+1} = Q_{cq}^s - \Delta t \left(-w_q^s \left(\frac{1}{2\Delta x} (Q_{cq+1}^s - Q_{cq-1}^s) \right) \right) - \\ - \frac{2\alpha^2}{R} |w_q^s| (Q_{cq}^s - Q_{c0}) + \frac{2u_R}{R} (Q_{cq}^s - Q_{cR}) + F_c \quad (2.43)$$

6). Уравнение отношение смеси баланса отношения смеси дождевых капель

$$Q_{rq}^{s+1} = Q_{rq}^s - \Delta t \left(-(w_q^s - V_r) \left(\frac{1}{2\Delta x} (Q_{rq+1}^s - Q_{rq-1}^s) \right) \right) - \\ - \frac{2\alpha^2}{R} |w_q^s| (Q_{rq}^s - Q_{r0}) + \frac{2u_R}{R} (Q_{rq}^s - Q_{rR}) + F_r \quad (2.44)$$

7). Уравнение отношение смеси баланса отношения смеси частиц кристаллических осадков

$$Q_{iq}^{s+1} = Q_{iq}^s - \Delta t \left(-(w_q^s - V_i) \left(\frac{1}{2\Delta x} (Q_{iq+1}^s - Q_{iq-1}^s) \right) \right) - \\ - \frac{2\alpha^2}{R} |w_q^s| (Q_{iq}^s - Q_{i0}) + \frac{2u_R}{R} (Q_{iq}^s - Q_{iR}) + F_i \quad (2.45)$$

8). Уравнение баланса концентрации положительных и отрицательных ионов

$$N_{p(n)_q}^{s+1} = N_{p(n)_q}^s - \Delta t (q_q^s - \gamma N_{Pq}^s \cdot N_{nq}^s) \quad (2.46)$$

2.3.2 Начальные и граничные условия

Для начального момента времени в узлах пространственной сетки точек задавались начальные условия, то есть следующее начальное состояние атмосферы:

1). Температура воздуха (T) задавалась следующим образом: у поверхности подстилающей поверхности она равна $+20,0$ °C, дальнейшее её изменение до уровня конденсации (подоблачного слоя) происходит по сухоадиабатическому закону ($\gamma_a = 1,0 \frac{^\circ\text{C}}{100 \text{ м}}$), выше данного слоя $\gamma = 0,7 \frac{^\circ\text{C}}{100 \text{ м}}$ и так до 6 км, после чего следует слой изотермии, где $\gamma = \text{const}$;

2). Вертикальный восходящий поток – $w = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$;

3). Относительная влажность – $f(z) = 80\%$;

4). Баланс отношения смесей различных субстанций – $Q_v = 0, Q_c = 0, Q_r = 0$.

Для пространственной сетки точек, находящихся на границе, то есть на поверхности, которая ограничивает область решения, в нашем случае на нижней и верхней границе цилиндра ставились следующие граничные условия:

1). Температура воздуха (T), баланс отношения смесей различных субстанций (Q_v, Q_c, Q_r) постоянны и равны значениям этих же величин в окружающей среде:

$$\left. \begin{array}{l} T = T_0 = const \\ Q_v = Q_{v0} = const \end{array} \right\} \text{ при } z \rightarrow \infty \text{ и } z \rightarrow 0$$

$$\left. \begin{array}{l} Q_c = Q_{c0} = 0 \\ Q_r = Q_{r0} = 0 \end{array} \right\} \text{ при } z \rightarrow \infty \text{ и } z \rightarrow 0$$

2). Вертикальный восходящий поток (w), радиальная составляющая скорости (u_R) постоянны:

$$w = u_R = 0 \text{ при } z \rightarrow \infty \text{ и } z \rightarrow 0$$

На рисунке 2.1 представлена блок-схема созданной модели.



Рисунок 2.1 – Блок-схема гидродинамической модели облака

3 ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1 Исследуемый случай и описание синоптической обстановки

Для проведения исследования был выбран случай грозы, наблюдаемый в г. Туапсе 24 июня 2022 г., где на протяжении суток над пунктом была кучево-дождевая облачность, а также была гроза в срок и/или между сроками. Данные получены из архива погоды сайта rf5.ru.

На рисунке 3.1 представлена информация о наблюдаемой погоде в г. Туапсе 24.06.2022 г. [10].

Местное время	T	U	DD	WW	W1	W2	CI
24.06.2022 21:00	17.6	83	Ветер, дующий с востока	Состояние неба в целом не изменилось.	Ливень (ливни).	Облака покрывали более половины неба в течение всего соответствующего периода.	Кучево-дождевые волокнистые (часто с наковальной), либо с кучево-дождевыми льсыми, кучевыми, слоистыми, разорванно-дождевыми, либо без них.
24.06.2022 18:00	17.3	93	Ветер, дующий с юга	Ливневый(ые) дождь(и) слабый(ые) в срок наблюдения или за последний час.	Ливень (ливни).	Облака покрывали более половины неба в течение всего соответствующего периода.	Кучево-дождевые волокнистые (часто с наковальной), либо с кучево-дождевыми льсыми, кучевыми, слоистыми, разорванно-дождевыми, либо без них.
24.06.2022 15:00	18.9	75	Ветер, дующий с юга	Ливневый(ые) дождь(и).	Гроза (грозы) с осадками или без них.	Ливень (ливни).	Кучево-дождевые волокнистые (часто с наковальной), либо с кучево-дождевыми льсыми, кучевыми, слоистыми, разорванно-дождевыми, либо без них.
24.06.2022 12:00	20.1	63	Ветер, дующий с юго-востока	Облака в целом рассеиваются или становятся менее развитыми.	Гроза (грозы) с осадками или без них.	Ливень (ливни).	Кучево-дождевые волокнистые (часто с наковальной), либо с кучево-дождевыми льсыми, кучевыми, слоистыми, разорванно-дождевыми, либо без них.
24.06.2022 09:00	18.4	89	Ветер, дующий с юго-юго-запада	Ливневый(ые) дождь(и) слабый(ые) в срок наблюдения или за последний час.	Ливень (ливни).	Облака покрывали более половины неба в течение всего соответствующего периода.	Кучево-дождевые волокнистые (часто с наковальной), либо с кучево-дождевыми льсыми, кучевыми, слоистыми, разорванно-дождевыми, либо без них.
24.06.2022 06:00	17.5	93	Ветер, дующий с юго-запада	Ливневый(ые) дождь(и).	Ливень (ливни).	Облака покрывали более половины неба в течение всего соответствующего периода.	Кучево-дождевые волокнистые (часто с наковальной), либо с кучево-дождевыми льсыми, кучевыми, слоистыми, разорванно-дождевыми, либо без них.
24.06.2022 03:00	18.3	83	Ветер, дующий с юго-запада	Гроза (с осадками или без них).	Гроза (грозы) с осадками или без них.	Облака покрывали более половины неба в течение всего соответствующего периода.	Кучево-дождевые волокнистые (часто с наковальной), либо с кучево-дождевыми льсыми, кучевыми, слоистыми, разорванно-дождевыми, либо без них.
24.06.2022 00:00	17.7	85	Ветер, дующий с юга	Ливневый(ые) дождь(и) слабый(ые) в срок наблюдения или за последний час.	Ливень (ливни).	Облака покрывали более половины неба в течение всего соответствующего периода.	Кучево-дождевые волокнистые (часто с наковальной), либо с кучево-дождевыми льсыми, кучевыми, слоистыми, разорванно-дождевыми, либо без них.

Рисунок 3.1 – Наземные наблюдения в г. Туапсе – 24.06.2022 г.

Синоптическая обстановка в г. Туапсе 24.06.2024 г. определялась южной периферией заполняющегося циклона, центр которого располагался над Азовским морем. Туапсе находился под влиянием фронта окклюзии, благодаря

чему наблюдалась кучево-дождевая облачность, сопровождаемая грозами, ливнями, сильным ветром. Об этом свидетельствуют наземные наблюдения, а также приземные прогностические карты и спутниковые снимки.

На рисунках 3.3-3.8 представлена даннные о синоптической обстановке [11] в период 23.06-25.06.2022 года и спутниковые снимки Южной территории России [12].

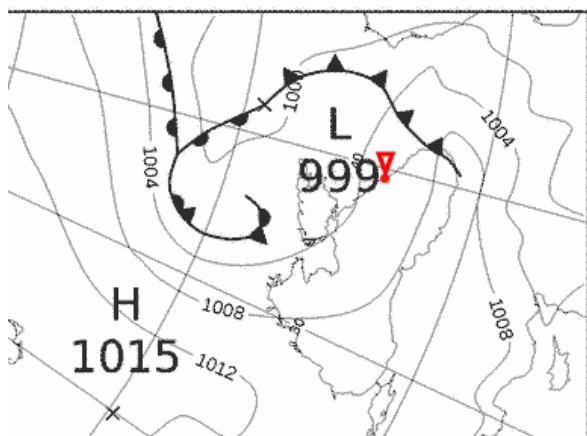


Рисунок 3.3 – Синоптическая карта - 23.06.2022 года 00:00 UTC



Рисунок 3.4 – Спутниковый снимок - 23.06.2022 года 12:00 UTC

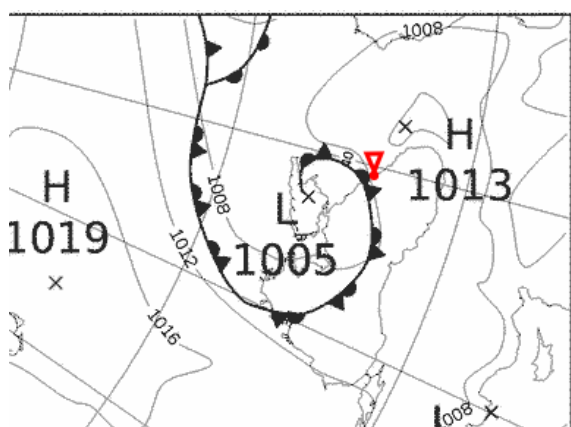


Рисунок 3.5 - Синоптическая карта - 24.06.2022 года 00:00 UTC

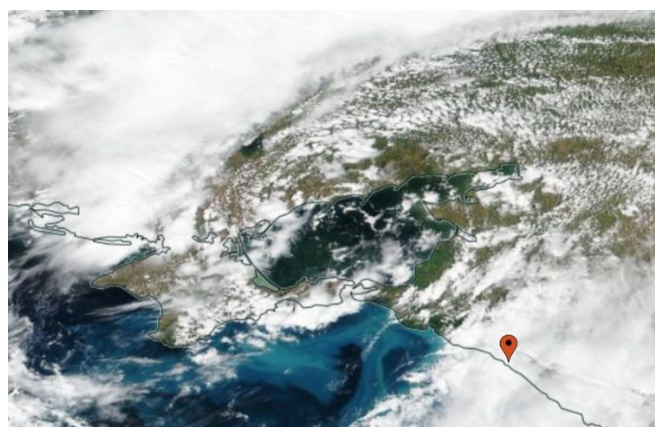


Рисунок 3.6 – Спутниковый снимок - 24.06.2022 года 12:00 UTC

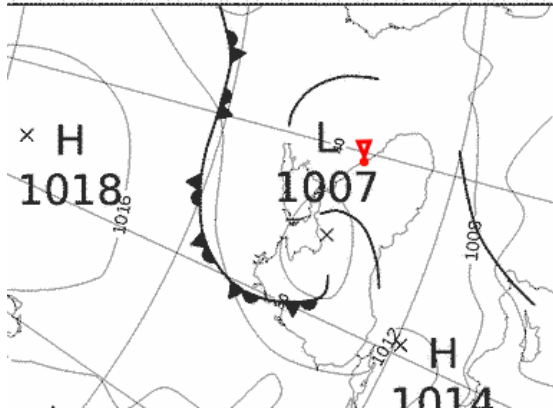


Рисунок 3.1 – Синоптическая карта -
25.06.2022 года 00:00 UTC

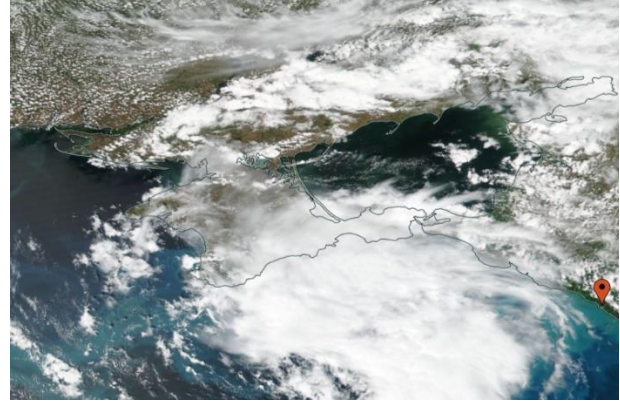


Рисунок 3.2 – Спутниковый снимок -
25.06.2022 года 12:00 UTC

3.2 Входные данные

Для того, чтобы произвести расчеты характеристик облака по рассматриваемому случаю с помощью созданной модели кучевого облака, необходимы начальные данные. Таковыми послужили данные аэрологического зондирования атмосферы, взятые из архива Вайоминского университета [14]. Обычно аэрологическое зондирование проводят дважды в течение суток, а именно в 12:00 и 00:00 по Гринвичу. Результаты зондирования представляют собой информацию о распределении по высоте температуры, влажности, давления воздуха, направления и скорости ветра. Также по этой информации строится аэрологическая диаграмма, с помощью которой визуально представляется стратификация этих величин по высоте.

В рассматриваемом случае отсутствуют данные аэрологического зондирования за 00:00 по Гринвичу, из-за не проводимых измерений по техническим причинам в этот срок. По этой причине будет рассматриваться и проводится расчеты только по данным за 12:00 по Гринвичу.

На рисунке 3.10 представлен фрагмент данных аэрологического зондирования [14].

37011 Tuapse Observations at 12Z 24 Jun 2022										
PRES	HGHT	TEMP	DWPT	RELH	MIXR	DRCT	SKNT	THTA	THTE	THTV
hPa	m	C	C	%	g/kg	deg	knot	K	K	K
1000.0	78									
998.0	41	19.6	15.4	77	11.14	140	6	292.9	324.8	294.9
985.0	162	18.5	14.6	78	10.69	185	10	292.9	323.5	294.8
925.0	741	13.0	10.6	85	8.75	175	16	292.6	317.8	294.1
850.0	1447	7.8	5.3	84	6.61	190	23	294.3	313.7	295.5
830.0	1642	6.5	4.1	85	6.23	200	25	294.9	313.3	296.0
797.0	1975	4.2	2.1	86	5.62	199	26	295.9	312.6	296.9
738.0	2598	0.4	-0.4	94	5.06	197	27	298.4	313.6	299.3
700.0	3021	-1.1	-2.7	89	4.50	195	27	301.2	315.1	302.1
643.0	3682	-4.6	-7.5	80	3.39	220	29	304.7	315.4	305.3
500.0	5640	-14.9	-21.9	55	1.33	215	23	314.8	319.4	315.1

Рисунок 3.10 – фрагмент данных аэрологического зондирования

3.3 Результаты численных экспериментов и их анализ

1). В первом численном эксперименте не рассматривался исследуемый случай. Необходимо было оценить, как модель воспроизводит физические процессы с учетом начальных и граничных условий, а также выбрать подходящий шаг по времени и по пространству и определить максимально возможное их количество, с которым удастся как можно точнее и с большей заблаговременностью получать характеристики облака.

Ввиду применяемой численной схемы для решения уравнений и рассматриваемых начальных и граничных условий, приведенных в 2.3.2, было принято, что шаг по времени будет выбран - 1 секунда, а шаг по пространству – 200 м. Радиус облака задавался равным 1,0 км. Произведя несколько численных расчетов при разных количествах шагов по времени и по пространству, удалось определить, что при шаге 30 по времени и при шаге 50 по пространству

получаются удовлетворяющие результаты. При дальнейшем увеличении количества шагов по времени – растет математическая неустойчивость, что можно наблюдать по штрихпунктирной линии на графиках, представленных на рисунках 3.11-3.14.

На рисунках 3.11-3.14 представлены результаты расчетов для скорости восходящего потока, температуры воздуха, отношения смеси водяного пара и радиальной составляющей скорости в разные моменты времени.

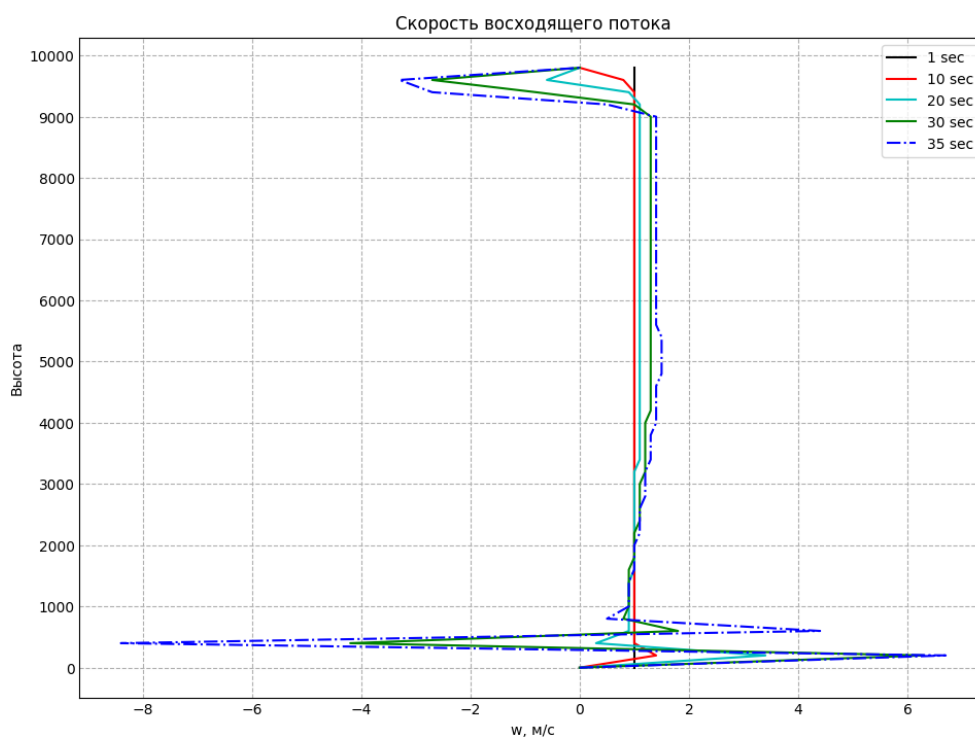


Рисунок 3.11 – Вертикальный профиль скорости восходящего потока в разные моменты по времени

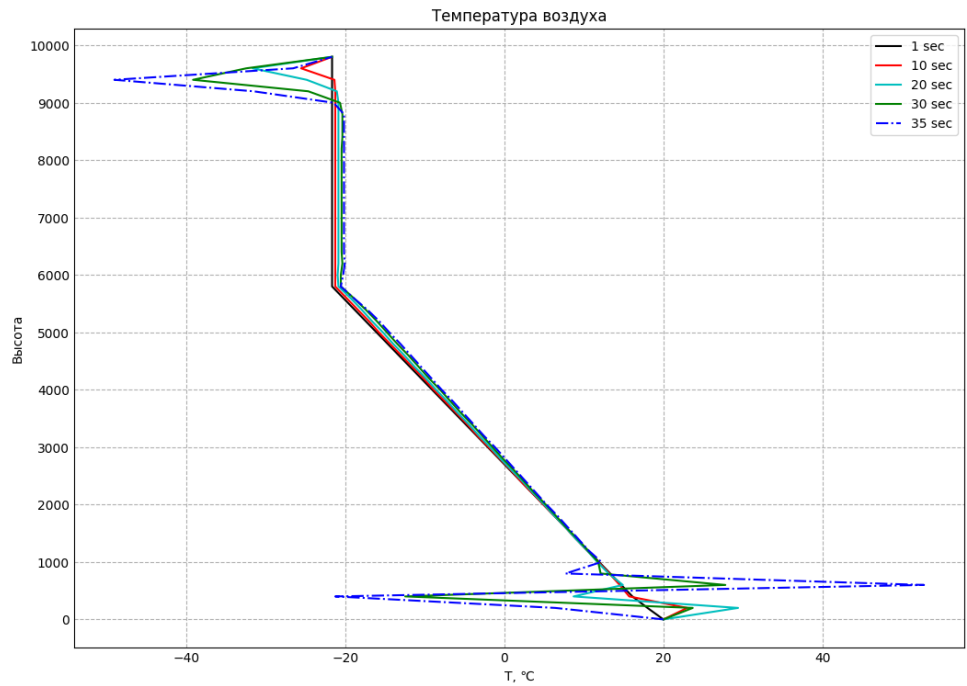


Рисунок 3.12 – Вертикальный профиль температуры воздуха в разные моменты по времени

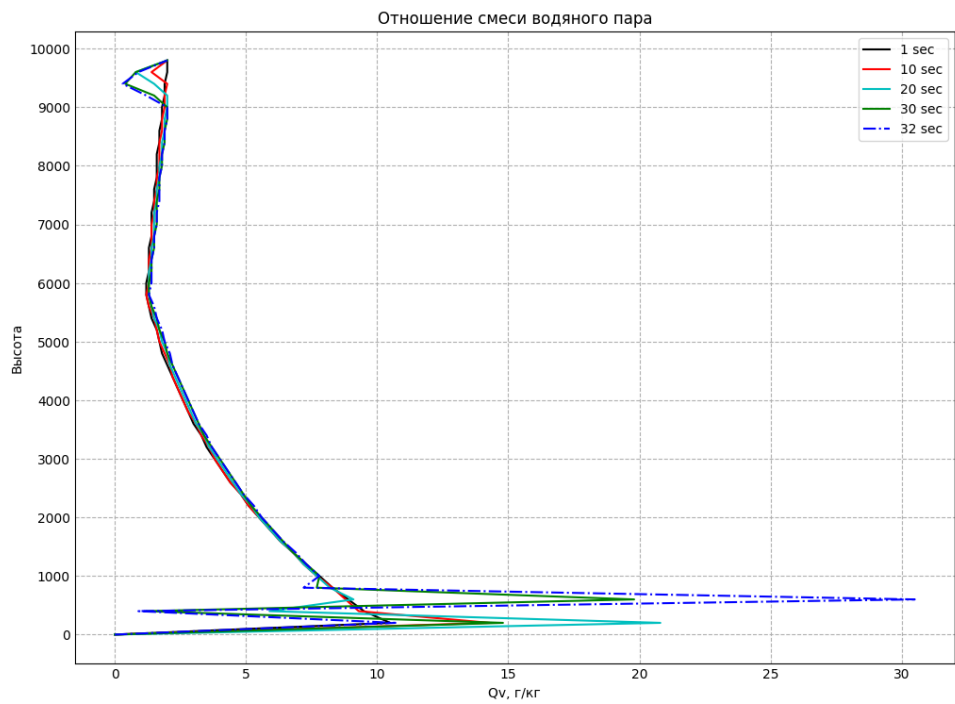


Рисунок 3.13 – Вертикальный профиль отношения смеси водяного пара в разные моменты по времени

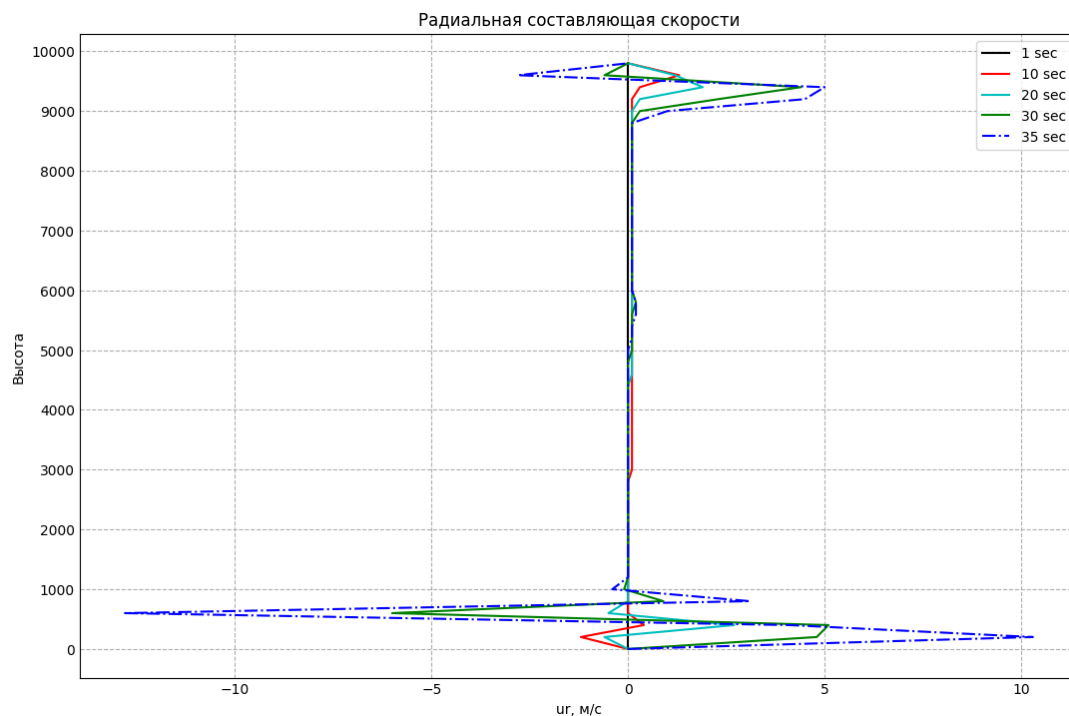


Рисунок 3.14 – Вертикальный профиль радиальной составляющей скорости в разные моменты по времени

Далее путем аппроксимации граничных условий направленными конечными разностями удалось увеличить количество шагов по времени до 60, при которых удастся получать удовлетворяющий результат. Начальные условия и количество шагов по пространству оставались без изменений.

На рисунках 3.15-3.18 представлены новые результаты расчетов для скорости восходящего потока, температуры воздуха, отношения смеси водяного пара и радиальной составляющей скорости в разные моменты времени.

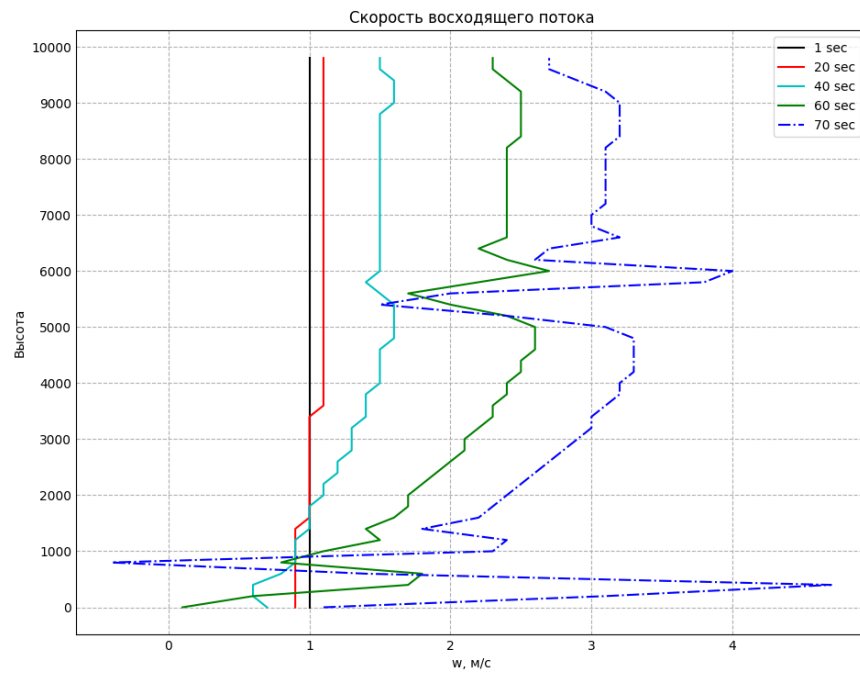


Рисунок 3.15 – Вертикальный профиль скорости восходящего потока в разные моменты по времени

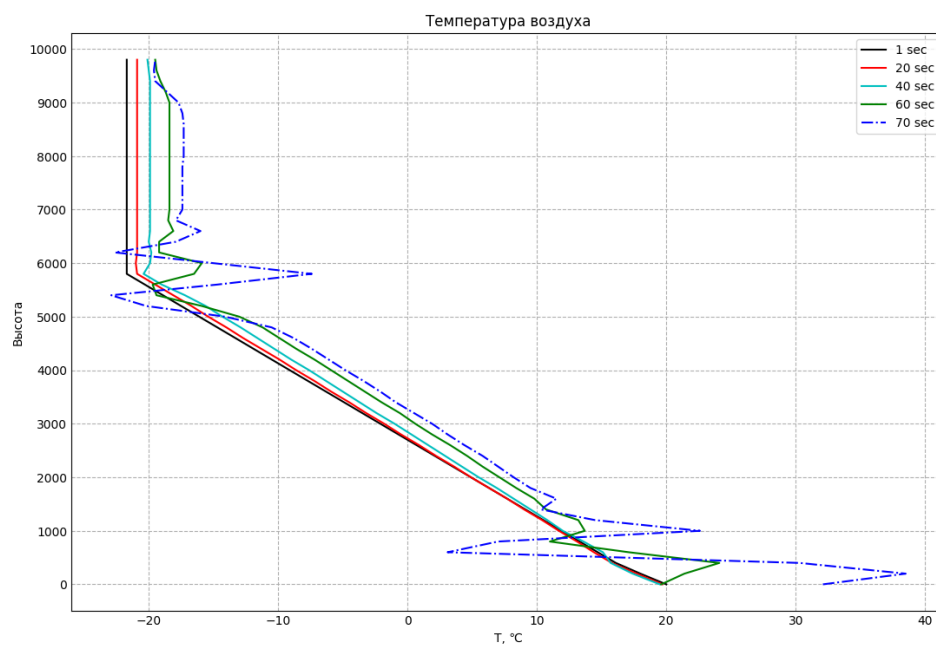


Рисунок 3.16 – Вертикальный профиль температуры воздуха в разные моменты по времени

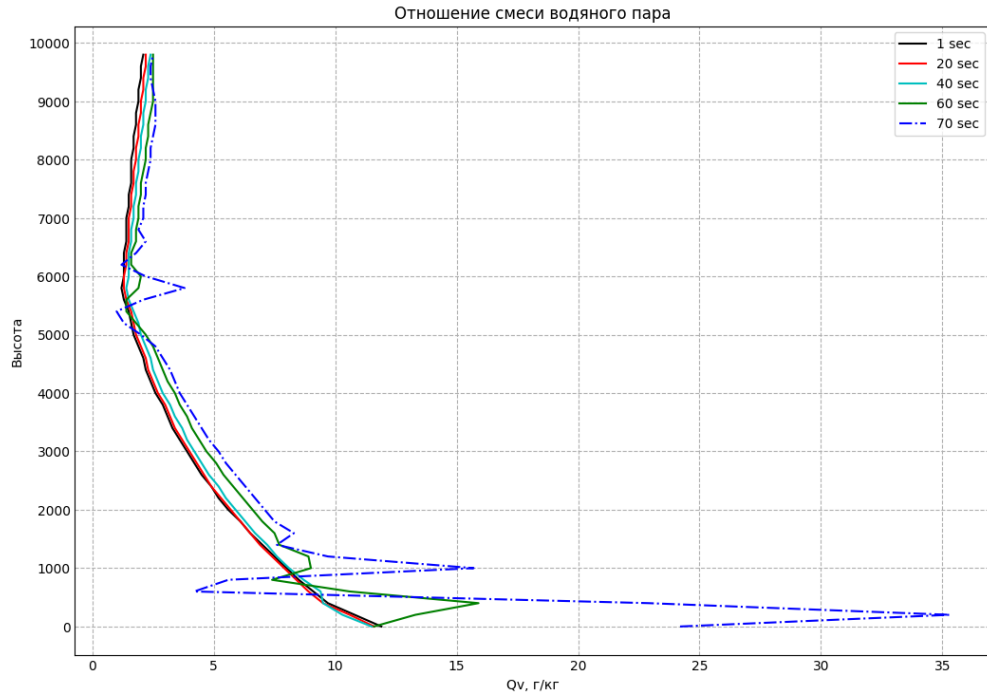


Рисунок 3.17 – Вертикальный профиль отношение смеси в разные моменты по времени

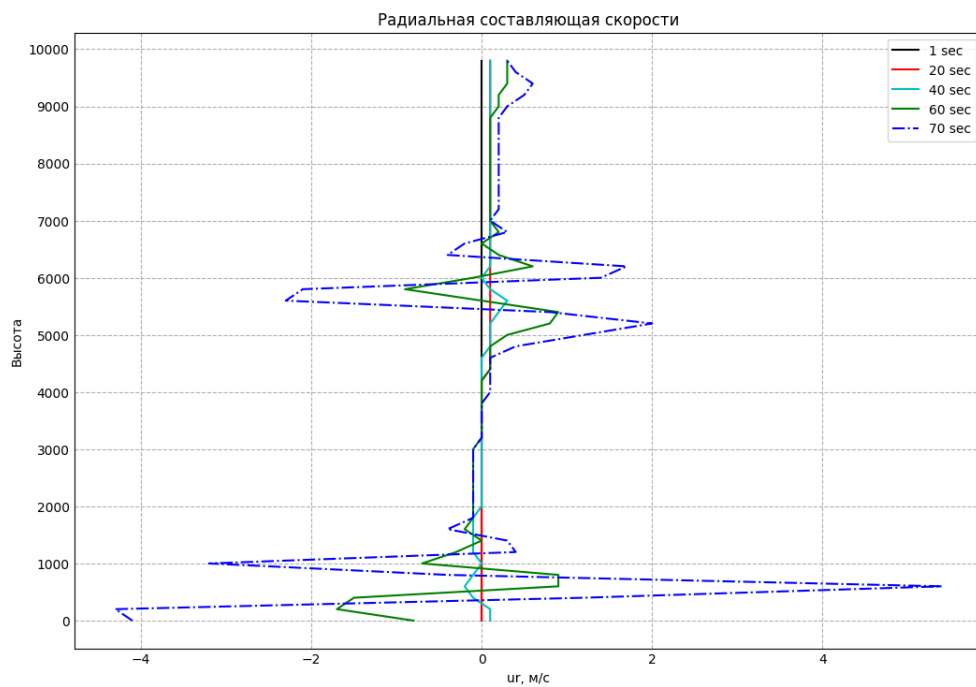


Рисунок 3.18 – Вертикальный профиль радиальной составляющей скорости в разные моменты по времени

Анализируя полученные вертикальные профили характеристик облака, можно отметить, что в процессе 1-минутного развития наблюдается рост скорости восходящего потока, температуры воздуха и отношение смеси водяного пара, что согласуется с физикой процессов. Насчет радиальной составляющей скорости трудно дать качественную оценку её изменениям, поскольку их характер не имеет четкой закономерности в отличие от остальных характеристик.

В результате, убедились, что модель воспроизводит соответствующие физические процессы, и, определили пороговое значение количества шагов по времени и по пространству.

Отдельно от основных проводились расчеты баланса положительных и отрицательных ионов, с учетом теоретического распределения их концентрации и интенсивности электризации с высотой [10], с целью оценки электрической структуры облака. В результате произведенных расчетов, были получены результаты, представленные на рисунках 3.19 и 3.20.

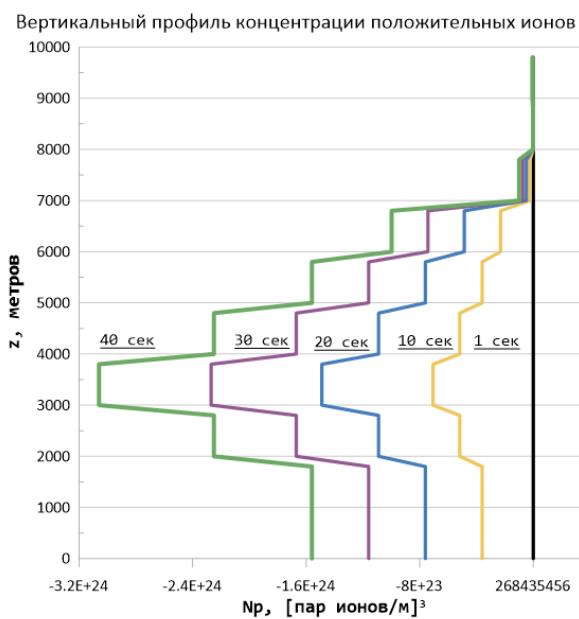


Рисунок 3.19 – Вертикальный профиль концентрации положительных ионов в разные моменты времени

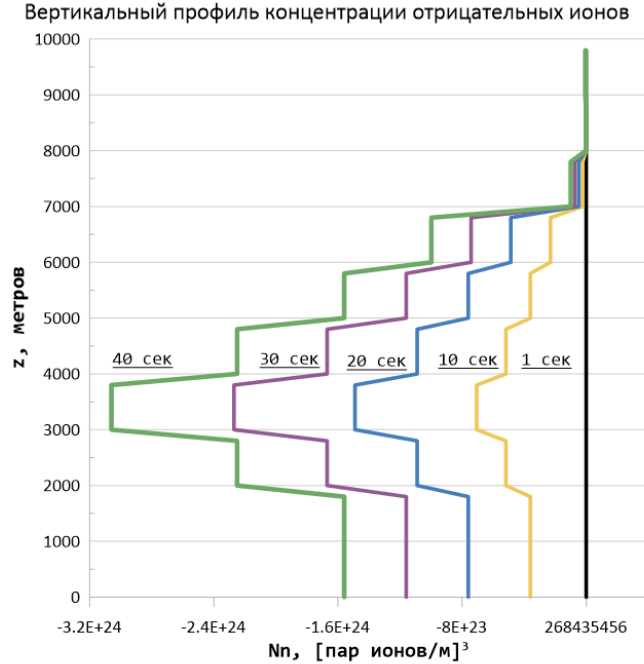


Рисунок 3.20 – Вертикальный профиль концентрации отрицательных ионов

Анализируя модельные изменения по вертикале, можно отметить, что до определенной высоты концентрация как положительных, так и отрицательных ионов уменьшается, поскольку с отдалением от подстилающей поверхности ослабляется активность ионизатора – радиоактивность почвы. Затем концентрация ионов начинают расти, что обусловлено влиянием космических лучей, которые выступают на больших высотах в роли ионизатора.

2). Во втором численном эксперименте опыт проводился с использованием данных аэрологического зондирования, описанного выше случая грозы в г.Туапсе, послужившие входными данными для модели на начальном шаге по времени. Шаг по времени и по пространству остался прежним, то есть $\Delta t = 1$ сек и $\Delta x = 200$ м.

На рисунках 3.21-3.24 приведены результаты численных экспериментов с моделью – вертикальное распределения скорости восходящего потока, температуры воздуха, отношения смеси водяного пара и радиальной составляющей скорости в разные моменты времени.

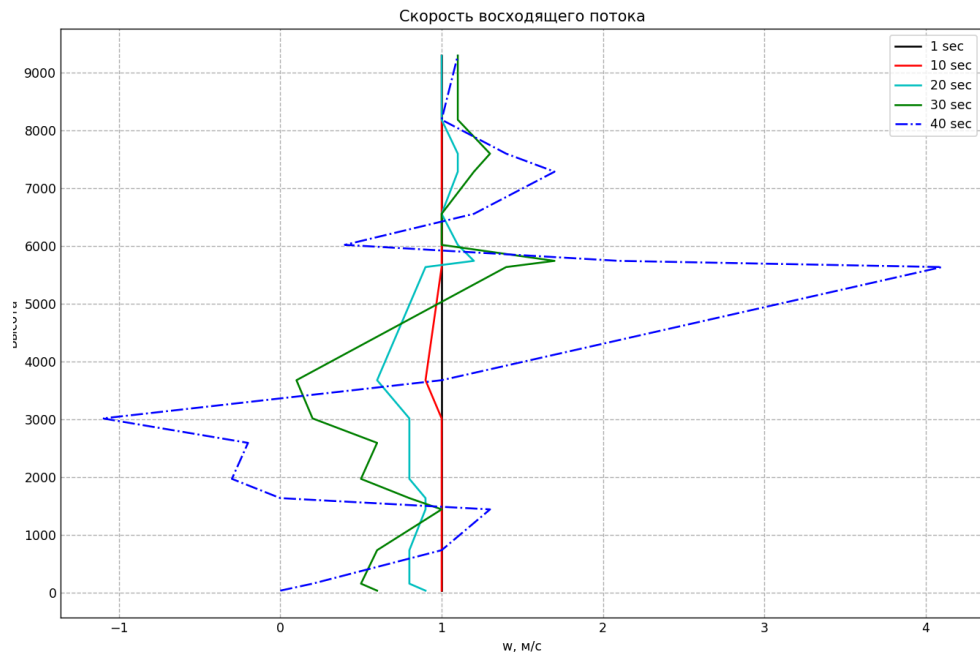


Рисунок 3.21 – Вертикальный профиль скорости восходящего потока в разные моменты по времени

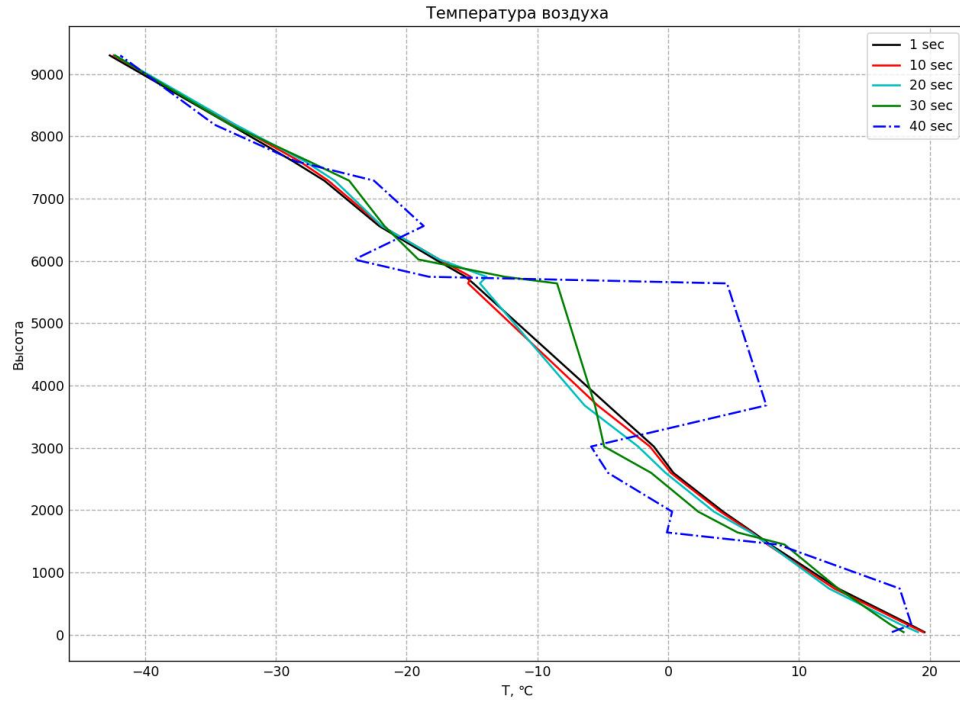


Рисунок 3.22 – Вертикальный профиль температуры воздуха в разные моменты по времени

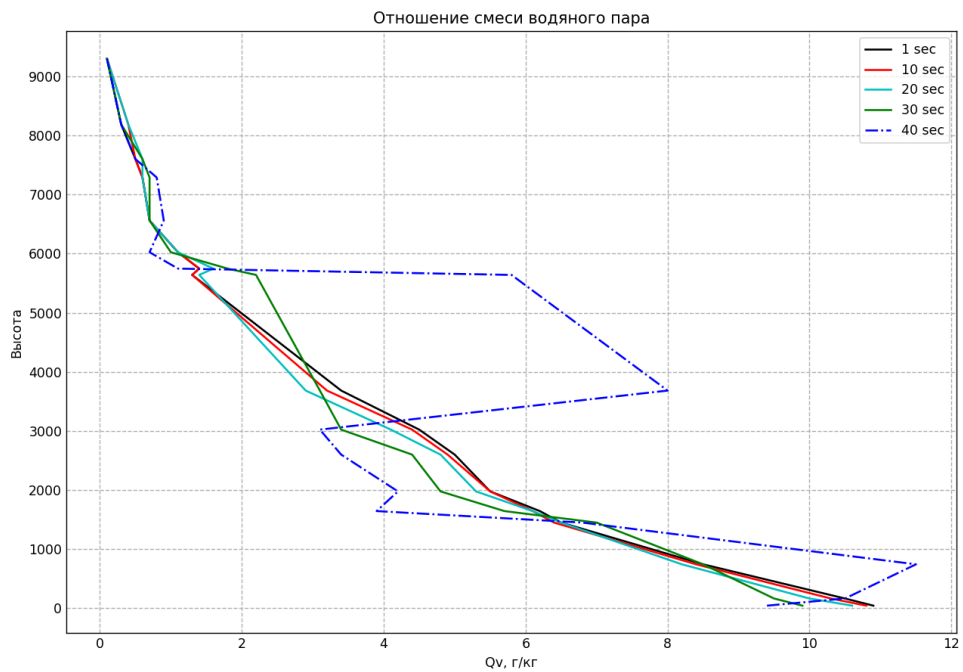


Рисунок 3.23 – Вертикальный профиль отношение смеси в разные моменты по времени

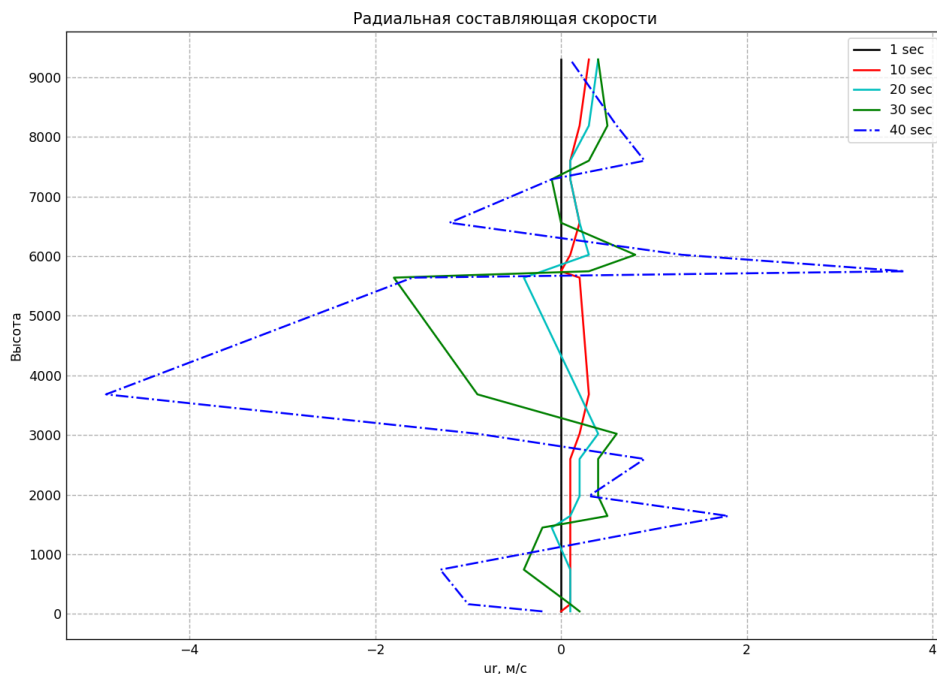


Рисунок 3.24 – Вертикальный профиль радиальной составляющей скорости в разные моменты по времени

В ходе численных расчетов не удалось сохранить тоже самое количество шагов по времени в связи с появлением вычислительной неустойчивости после 30 шага, что можно наблюдать на графиках по штрихпунктирной линии. Помимо этого, уменьшилось и количество шагов по пространству до 18, поскольку данное значение соответствует количеству имеющихся аэрологических данных о метеорологических величинах до высоты 10 км.

Анализируя полученные вертикальные профили характеристик облака во втором численном эксперименте, возможно сказать о том, что изменение полученных величин с высотой имеет схожий характер с результатами предыдущего эксперимента. За исключением скорости восходящего потока, которая на начальных шагах по времени и на низких высотах вместо того, чтобы увеличиваться по значению, как в предыдущем опыте, ситуация имеет обратный

характер. Также можно отметить, что в отличие от предыдущего опыта остальные характеристики не всегда растут по значению с высотой от начального состояния, которой соответствует черная линия на графиках. Кроме того, как упоминалась ранее при условиях, с помощью которых удалось достигнуть двойного увеличения количества шагов по времени, в данном случае получить такой результат не вышло.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью бакалаврской работы являлось создание гидродинамической модели кучевого облака с электрической структурой. В целях достижения поставленной цели в рамках данной работы были выполнены следующие задачи:

1. Изучена научная литература, касающиеся физики облаков, моделированию облаков, атмосферного электричества;
2. Изучены существующие к данному моменты модели кучевого облака;
3. Разработана собственная модель кучевого облака;
4. Проведены численных экспериментов с разными условиями;
5. Проанализированы получившиеся результаты в ходе численных экспериментов.

В результате проделанной работы удалось создать полутаромерную нестационарную модель кучевого облака, учитывающую гидродинамические, термические и микрофизические процессы, включающие в себя фазовые переходы влаги и электрические процессы. Однако пока в модели облака не включены в полном объеме микрофизические процессы, что требует в дальнейшем её уточнения.

Численные эксперименты показали, что модель кучевого облака способна описывать те физические процессы, которые в неё включены, но на очень небольшом интервале времени, поскольку возникает математическая неустойчивость, вносящая ошибки в дальнейшие расчеты. По этой причине необходима такая численная схема, с помощью которой удалось бы решить данную проблему.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кашлева Л.В., Михайловский Ю.П. Атмосферное электричество. Учебное пособие. – СПб.: РГГМУ, 2019. – 226 с.
2. Кашлева Л. В., Михайловский Ю. П., Михайловский В. Ю. Механизмы электризации облачных гидрометеоров в грозовых облаках. Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета, 2016. – № 45. – стр. 119-131.
3. Богаткин О.Г. Основы авиационной метеорологии. Учебник. – СПб.: Изд. РГГМУ, 2009. – 339 с.
4. Довгалюк Юлия Александровна, Веремей Николай Евгеньевич, Синькевич Андрей Александрович. Применение полуторамерной модели для решения фундаментальных и прикладных задач физики облаков – Санкт-Петербург: «Типография Моби Дик», 2013. – 220 с.
5. Ашабоков Б. А., Федченко Л. М., Куповых Г. В., Шаповалов А. В., Скорбеж Н. Н., Шаповалов В. А. (2012). Модель конвективного облака с учетом влияния физических процессов на его характеристики. Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки, (6), 58-62.
6. Шаповалов В. А. Закономерности формирования макро- и микроструктурных характеристик грозоградовых облаков с учетом взаимодействия термогидродинамических, микрофизических и электрических процессов: специальность 25.00.30 "Метеорология, климатология, агрометеорология»: диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / Шаповалов Виталий Александрович, 2020. – 335 с.

7. Веремей Н. О параметризации микрофизических процессов в численных моделях грозных облаков / Веремей Н., Ю.А. Довгалюк Ю.А., Морозов В.Н.// Метеорология и гидрология. — 2006.— №11.— С. 5-18.
8. Белов П.Н., Борисенков Е.П., Панин Б.Д. Численные методы прогноза погоды, 1989.
9. MetEd [Электронный ресурс]. – <https://www.meted.ucar.edu/index.php>, свободный (дата обращения: 20.05.2024)
10. Мучник В.М., Фишман Б.Е. Электризация грубодисперсных аэрозолей в атмосфере, 1982
11. Расписание погоды [Электронный ресурс]. – <https://rp5.ru/>, свободный (дата обращения: 25.05.2024)
12. Wetterzentrale [Электронный ресурс]. – <https://www.wetterzentrale.de/>, свободный (дата обращения: 25.05.2024)
13. EOSDIS WorldView [Электронный ресурс]. – <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>, свободный (дата обращения: 25.05.2024)
14. University of Wyoming [Электронный ресурс]. – <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html/>, свободный (дата обращения: 26.05.2024)

ПРИЛОЖЕНИЕ

Приложение А. Программа гидродинамической модели кучевого облака.

```
program test

! [INTRODUCTION]
integer,parameter:: x=50,tt=40
real, dimension (x,tt):: p,w,T,Tv,pa,k,ss,Qv,Qc,Qr,Qi,Vi, &
Qws,Qis,dqws,Fmv, Ur, Np, Nn,qq,nnp, nnn
real,dimension(x):: tv0, ss0, Qv0
real :: Vr

integer:: i, s
real:: f1,f2,f3,f4,f5,f6,dz=200,dt=1, & ![вспомогательные переменные]
a,r,wr,g, &
ya,Tr,Ft, &
Qc0,Qr0,Qi0,Qcr,Qvr,Qrr,Qir, &
Fc=0,Fr=0, &
z,zm=6e+3,zk,e,f=0.8,Td,Ra,p0=1000, & ![T(s=1)]
Pcond,Pcybl,Pcevp,Prevp,Pievp,Pitevp, &
Lv = 2.5e+6; cp=1006; Rp = 462.; &
qq = 10e+7; aa = 1.6e+3

! [INITIALIZATION]
a = 1.0 ;R = 1000. ;wr = 1.0 ;g = 9.81 ;Ra=287 ;pa = 1.0 ;k (:,:) =0.
ya=0.98e-2 ;Tr = 0.; Ft = 0
Qv0=0 ;Qc0=0 ;Qr0=0 ;Qi0=0 ;Qcr=0 ;Qvr=0 ;Qrr=0 ;Qir=0

Vi (:,:) =0; Vr=1.0

! [START CONDITION]
Qc(:,1) =0. ; Qr (:,1)= 0. ;Qi(:,1) = 0. ;Qv(:,1) = 0.
w(:,1)=1.0 ; T(1,1)=273.15+20. ; Ur(:,1)=0.; Np(:,1) = 0; Nn(:,1) = 0;
qq(:,1) = 0.

!w(6,1)=2

! [COMPUTING]

z=dz ;

do s=1,1
e = f*6.11*exp(17.62*(T(1,s)-273.15)/(243.12+T(1,s)-273.15))
Td = (243.12*log(e/6.11))/(17.62-log(e/6.11))
zk = 122*(T(1,s)-(Td+273.15))
do i=2,x
if (z <= zk) then
T(i,s) = T(i-1,s)-ya*dz
end if
if (z>zk .and. z<zm) then
T(i,s) = T(i-1,s)-0.007*dz
end if
```

```

    if (z>=zm) then
        T(i,s) = T(i-1,s)
    end if
    !write(*,*) T(i,s)-273.15
    z = z + dz
end do
z=0 ;
do i=1,x
    e = f*6.11*exp(17.62*(T(i,1)-273.15)/(243.12+T(i,1)-273.15))
    p(i,s) =p0*exp(-g*z/Ra/T(i,1))
    Qv0(i) = 1000*0.622*e/p(i,s)
    ss0(i) = Qv0(i)/(1+Qv0(i))
    Tv0(i) = (T(i,1)-273.15)*(1+0.608*ss0(i))+273.15
    pa(i,s) = p(i,s)*100/Ra/T(i,s)
    z = z + dz
end do
end do ;
Tv(1,1)=Tv0(1)

do s = 1, tt-1 ; write(*,*) s
    z=dz ;
    do i=1,x ;    ![(Tv) VERTICAL TEMPERATURE]
        e = f*6.11*exp(17.62*(T(i,s)-273.15)/(243.12+T(i,s)-273.15))
        p(i,s) =p0*exp(-g*z/Ra/T(i,s))
        Qv(i,s) = 1000*0.622*e/p(i,s)
        ss(i,s) = Qv(i,s)/(1+Qv(i,s))
        Tv(i,s) = (T(i,s)-273.15)*(1+0.608*ss(i,s))+273.15
        pa(i,s) = p(i,s)*100/Ra/T(i,s)
        z=z+dz
    end do

    do i=1,x ; ![MICROPHYSICS UNIT]

        Qws(i,s) = 3.8*exp(17.27*(T(i,s)-273.15)/(T(i,s)-35.86))/p(i,s)
        Qis(i,s) = 3.8*exp(21.87*(T(i,s)-273.15)/(T(i,s)-8))/p(i,s)
        dqws(i,s)= Lv*Qws(i,s)/Rp/T(i,s)**2
        Pcond = (Qv(i,s)-Qws(i,s))/dt * (1 + Lv*dqws(i,s)/cp)**(-1)
        Pcevp = -Pcond
        Pcybl = 0.; Pprev = 0.; Pievp = 0.; Pitevp = 0.
        Fmv(i,s) = - Pcond - Pcybl + Pcevp + Pprev + Pievp + Pitevp
    end do

    do i = 1,x ; ![ELECTRIFICATION UNIT]

    if (i<=5) then
        qq(i,s) = 10e+7
        nnp(i,s) = 0.5*10e+9
        nnn(i,s) = 0.5*10e+9
    else if (i<=10) then
        qq(i,s) = 0.5*10e+7
        nnp(i,s) = 0.5*10e+9
        nnn(i,s) = 0.5*10e+9
    else if (i<=15) then
        qq(i,s) = 0.3*10e+7

```

```

f3 = 2*Ur(i,s)*(w(i,s)-wr)/R
f4 = 0
! (k(i+1,s)*(w(i+2,s)-w(i,s))-k(i-1,s)*(w(i,s)-w(i-
2,s)))/(4*dz*dz)/pa(i,s)
f5 = g*(Tv(i,s)-Tv0(i))/(273.15 + Tv0(i))
f6 = g*(Qc(i,s)+Qr(i,s)+Qi(i,s))
w(i,s+1) = w(i,s) + dt*(-f1 - f2 + f3 + f4 + f5 -
f6) ; !write(*,'(2f10.2,2e10.2)') tv0(i),tv(i,s),f5,w(i,s+1)

if(i==1) then
  f1 = (w(i+1,s)*pa(i+1,s)-w(i,s)*pa(i,s))/dz
elseif(i==x) then
  f1 = (w(i,s)*pa(i,s)-w(i-1,s)*pa(i-1,s))/dz
else
  f1 = (w(i+1,s)*pa(i+1,s)-w(i-1,s)*pa(i-1,s))/(2*dz)
endif

Ur(i,s+1) = - f1*R*0.5/pa(i,s)

if(i==1) then
  f1 = w(i,s)*((T(i+1,s) - T(i,s))/dz + ya)
elseif(i==x) then
  f1 = w(i,s)*((T(i,s) - T(i-1,s))/dz + ya)
else
  f1 = w(i,s)*((T(i+1,s) - T(i-1,s))/(2*dz) + ya)
endif

f2 = 2*a*a*abs(w(i,s))*(T(i,s)-T(1,1))/R
f3 = 2*Ur(i,s)*(T(i,s)-Tr)/R
f4 = 0
! (k(i+1,s)*(T(i+2,s)-T(i,s))-k(i-1,s)*(T(i,s)-T(i-2,s)))/(4*dz*dz)/pa(i,s)
T(i,s+1) = T(i,s) + dt*(-f1 - f2 - f3 - f4 - Ft)

if(i==1) then
  f1 = w(i,s)*(Qv(i+1,s) - Qv(i,s))/dz
elseif(i==x) then
  f1 = w(i,s)*(Qv(i,s) - Qv(i-1,s))/dz
else
  f1 = w(i,s)*(Qv(i+1,s) - Qv(i-1,s))/(2*dz)
endif

f2 = 2*a*a*abs(w(i,s))*(Qv(i,s)-Qv0(i))/R
f3 = 2*Ur(i,s)*(Qv(i,s)-Qvr)/R
f4 = 0
! (k(i+1,s)*(Qv(i+2,s)-Qv(i,s))-k(i-1,s)*(Qv(i,s)-Qv(i-
2,s)))/(4*dz*dz)/pa(i,s)
Qv(i,s+1) = Qv(i,s) + dt*(- f1 - f2 + f3 + f4)

if(i==1) then
  f1 = w(i,s)*(Qc(i+1,s) - Qc(i,s))/dz
elseif(i==x) then
  f1 = w(i,s)*(Qc(i,s) - Qc(i-1,s))/dz
else
  f1 = w(i,s)*(Qc(i+1,s) - Qc(i-1,s))/(2*dz)
endif

```

```

f2 = 2*a*a*abs(w(i,s))*(Qc(i,s)-Qc0)/R
f3 = 2*Ur(i,s)*(Qc(i,s)-Qcr)/R
f4 = 0
!(k(i+1,s)*(Qc(i+2,s)-Qc(i,s))-k(i-1,s)*(Qc(i,s)-Qc(i-
2,s)))/(4*dz*dz)/pa(i,s)
Qc(i,s+1) = Qc(i,s) + dt*(-f1 - f2 + f3 + f4 + Fc)

if(i==1) then
  f1 = (w(i,s)-Vr)*(Qr(i+1,s) - Qr(i,s))/dz
elseif(i==x) then
  f1 = (w(i,s)-Vr)*(Qr(i,s) - Qr(i-1,s))/dz
else
  f1 = w(i,s)*(Qc(i+1,s) - Qc(i-1,s))/(2*dz)
endif

f2 = 2*a*a*abs(w(i,s))*(Qr(i,s)-Qr0)/R
f3 = 2*Ur(i,s)*(Qr(i,s)-Qrr)/R

if(i==1) then
  f4 = Qr(i,s)*Vr*(pa(i+1,s)-pa(i,s))/dz/pa(i,s)
elseif(i==x) then
  f4 = Qr(i,s)*Vr*(pa(i,s)-pa(i-1,s))/dz/pa(i,s)
else
  f4 = Qr(i,s)*Vr*(pa(i+1,s)-pa(i-1,s))/(2*dz)/pa(i,s)
endif

Fr = 0
Qr(i,s+1) = Qr(i,s) + dt*(-f1 - f2 + f3 + f4 + Fr)

f1 = (w(i,s)-Vi(i,s))*((Qi(i+1,s) - Qi(i-1,s))/(2*dz))
f2 = 2*a*a*abs(w(i,s))*(Qi(i,s)-Qi0)/R
f3 = 2*Ur(i,s)*(Qi(i,s)-Qir)/R
f4 = Vi(i,s)*((pa(i+1,s) - pa(i-1,s))/(2*dz))
f5 = pa(i,s)*((Vi(i+1,s) - Vi(i-1,s))/(2*dz))
Qi(i,s+1) = Qi(i,s)- dt*(f1 - f2 + f3 + (f4 + f5)*Qi(i,s)/pa(i,s) + Fi)

end do
end do

! [RECORD RESULTS]
open (21,file='temp2.txt')
open (22,file='w2.txt')
open (24,file='ur2.txt')
open (25,file='qv2.txt')
open (28,file='Np2.txt')

do i=1,x
write (21,'(f6.0,144f10.1)')(i-1)*dz,(T(i,s)-273.15,s=1,tt)
write (22,'(f6.0,144f10.1)')(i-1)*dz,(w(i,s),s=1,tt)
write (24,'(f6.0,144f10.1)')(i-1)*dz,(Ur(i,s),s=1,tt)
write (25,'(f6.0,144f10.1)')(i-1)*dz,(Qv(i,s),s=1,tt)

write (28,'(f6.0,144e12.3)')(i-1)*dz,(Np(i,s),s=1,tt)
end do

```



```
close (21)
close (22)
close (24)
close (25)
close (28)

end program test
```

Приложение Б. Программа для визуализации результатов моделирования

```
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd

df = pd.read_csv('w4.txt', delim_whitespace=True, header=None)
dr = pd.read_csv('ur4.txt', delim_whitespace=True, header=None)
dt = pd.read_csv('temp4.txt', delim_whitespace=True, header=None)
dy = pd.read_csv('qv4.txt', delim_whitespace=True, header=None)

y = df.iloc[:, 0]
x = df.iloc[:, 1:2]; x1 = df.iloc[:, 10:11]; x2 = df.iloc[:, 20:21]; x3 =
df.iloc[:, 30:31]; x4 = df.iloc[:, 40:41]
z = dt.iloc[:, 1:2]; z1 = dt.iloc[:, 10:11]; z2 = dt.iloc[:, 20:21]; z3 =
dt.iloc[:, 30:31]; z4 = dt.iloc[:, 40:41]
s = dr.iloc[:, 1:2]; s1 = dr.iloc[:, 10:11]; s2 = dr.iloc[:, 20:21]; s3 =
dr.iloc[:, 30:31]; s4 = dr.iloc[:, 40:41]
r = dy.iloc[:, 1:2]; r1 = dy.iloc[:, 10:11]; r2 = dy.iloc[:, 20:21]; r3 =
dy.iloc[:, 30:31]; r4 = dy.iloc[:, 40:41]

plt.style.use('_mpl-gallery')
fig, ax = plt.subplots(2,2)

ax[0,0].plot(x, y, 'k-', label=f'1 sec'); ax[0,0].plot(x1, y, 'r-', label=f'10
sec')
ax[0,0].plot(x2, y, 'c-', label=f'20 sec'); ax[0,0].plot(x3, y, 'g-', label=f'30
sec'); ax[0,0].plot(x4, y, 'b-.', label=f'40 sec')

ax[1,0].plot(z, y, 'k-', label=f'1 sec'); ax[1,0].plot(z1, y, 'r-', label=f'10
sec')
ax[1,0].plot(z2, y, 'c-', label=f'20 sec'); ax[1,0].plot(z3, y, 'g-', label=f'30
sec'); ax[1,0].plot(z4, y, 'b-.', label=f'40 sec')

ax[0,1].plot(s, y, 'k-', label=f'1 sec'); ax[0,1].plot(s1, y, 'r-', label=f'10
sec')
ax[0,1].plot(s2, y, 'c-', label=f'20 sec'); ax[0,1].plot(s3, y, 'g-', label=f'30
sec'); ax[0,1].plot(s4, y, 'b-.', label=f'40 sec')

ax[1,1].plot(r, y, 'k-', label=f'1 sec'); ax[1,1].plot(r1, y, 'r-', label=f'10
sec')
ax[1,1].plot(r2, y, 'c-', label=f'20 sec'); ax[1,1].plot(r3, y, 'g-', label=f'30
sec'); ax[1,1].plot(r4, y, 'b-.', label=f'40 sec')

ax[0,0].set_title('Скорость восходящего потока'); ax[0,0].set_xlabel('w, м/с');
ax[0,0].set_ylabel('Высота')
ax[0,1].set_title('Радиальная составляющая скорости'); ax[0,1].set_xlabel('ur,
м/с'); ax[0,1].set_ylabel('Высота')
ax[1,0].set_title('Температура воздуха'); ax[1,0].set_xlabel('Т, °C');
ax[1,0].set_ylabel('Высота')
ax[1,1].set_title('Отношение смеси водяного пара'); ax[1,1].set_xlabel('Qv,
г/кг'); ax[1,1].set_ylabel('Высота')

ax[0,0].set_yticks(range(0, int(max(y)) + 201, 1000))
ax[0,1].set_yticks(range(0, int(max(y)) + 201, 1000))
```

```
ax[1,0].set_yticks(range(0, int(max(y)) + 201, 1000))
ax[1,1].set_yticks(range(0, int(max(y)) + 201, 1000))

ax[0,0].grid(True, linestyle='--'); ax[0,1].grid(True, linestyle='--');
ax[1,0].grid(True, linestyle='--'); ax[1,1].grid(True, linestyle='--')
ax[0,0].legend(), ax[0,1].legend(), ax[1,0].legend(), ax[1,1].legend()
plt.show()
```