

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

КАФЕДРА КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

И МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ

Василенко Аркадий Юрьевич

Выпускная квалификационная работа бакалавра

"Численное моделирование активных воздействий на облака"

Направление 010400

Прикладная математика

и информатика

Научный руководитель,
кандидат физ.-мат. наук,
доцент
Станкова Е.Н.

Санкт-Петербург

2016

Содержание

Содержание.....	2
Введение.....	4
Постановка задачи.....	7
Обзор литературы.....	8
Глава 1. Способы активных воздействий на облака и методы оценки результатов воздействий.....	12
1.1. Способы активных воздействий на облака и осадки.....	12
1.2. Оценка физического эффекта активных воздействий.....	15
Глава 2. Изучение принципов моделирования процессов в конвективных облаках на примере двумерной модели конвективного облака с подробным описанием микрофизических процессов.....	17
2.1. Краткое описание модели.....	18
2.2. Алгоритмы распараллеливания модели и анализ их эффективности.....	21
2.2.1. Алгоритм распараллеливания по пространству.....	22
2.2.2. Алгоритм распараллеливания по физическим процессам.....	24
2.2.3. Алгоритм коллективного решения.....	25
2.2.4 Сравнение эффективности алгоритмов распараллеливания.....	27
2.3 Профилирования программного кода модели.....	32
Глава 3. Разработка концепции построения распределенной вычислительной среды, предназначенной для моделирования результатов воздействий на конвективные облака.....	35
3.1. Теоретическая основа построения распределенной вычислительной среды «Виртуальное облако».....	35
3.2 Структура и принципы реализации «Виртуального облака».....	37
Выводы.....	43

Заключение.....	45
Список литературы.....	47

Введение

Под активными воздействиями на облака понимают физико-химическое воздействие на них, осуществляемое либо с целью вызова выпадения осадков либо с целью рассеяния облаков без выпадения осадков, а также для предотвращения образования и выпадения града. В настоящее время механизм таких воздействий преимущественно сводится к изменению фазового состояния облака при «засеве» его некоторыми реагентами, в частности твердой углекислотой и дымом йодистого серебра или йодистого свинца [1-3].

В последнее время для выявления эффекта воздействия все шире применяются численные модели облаков [4,5]. Использование численной модели позволяет, не прибегая к дорогостоящим натурным экспериментам, провести анализ развития облака с наложенным возмущением, проследить влияние различных способов засева, а также метеорологических условий на ход процессов облако- и осадкообразования, выявить параметры, наиболее пригодные для контроля эффекта воздействия.

Непосредственная реализация активных воздействий на облака осуществляется путем их засева кристаллизующими реагентами, доставляемыми либо с помощью самолетов, либо путем «расстрела» облака из градобойных установок. При этом успех воздействия определяется правильным выбором времени и места воздействия. Время воздействия определяется стадией развития облака. Облако должно находиться на стадии своего развития, тогда внесение реагента будет способствовать образованию дополнительных ядер конденсации или льдообразования. Место воздействия определяется высотой, где находится максимальное количество так называемой «переохлажденной» воды, быстрое замерзание которой под воздействием реагента будет способствовать наиболее эффективному процессу осадкообразования.

Наиболее точно время и место воздействия можно определить с помощью численного моделирования. В идеале аэродром, с которого вылетают самолеты, или градобойный отряд должен быть одним из узлов распределенной вычислительной среды, предназначенной для прогнозирования параметров воздействия. Такая вычислительная среда должна содержать распределенную информационную систему, предназначенную для интеграции метеорологической информации о состоянии атмосферы, а также ряд вычислительных узлов, предназначенных для осуществления расчетов по различным моделям облаков, а также блоков для визуализации и интерпретации результатов расчетов.

Для более точного прогнозирования параметров воздействия необходимо использовать несколько типов моделей облаков, различающихся как размерностью, так и детализацией описания процессов осадкообразования. Следует отметить, что если расчеты с помощью «простых» одно и полутримерных моделей облаков можно реализовать на настольных компьютерах, оснащенных многоядерными процессорами, в течение нескольких минут, то вычисления с помощью двух и трехмерных моделей с подробным описанием микрофизических процессов, требуют мощных многопроцессорных вычислительных систем. Каждый вариант расчета по такой модели может длиться несколько часов.

Создание распределенных вычислительных сред (problem solving environment) является одной из наиболее важных задач в компьютерных науках. Такие среды с использованием высокопроизводительных систем и вычислений разрабатывались, например, для расчетов комплексных химических систем [6], для численного моделирования реакторов плазмохимического осаждения [7], а также моделирования динамики пучков элементарных частиц [8]. Мы предлагаем использовать подход, предложенный в работах [8,9], в которых

обсуждается создание, так называемого «Виртуального реактора» - программной среды для моделирования динамики пучков элементарных частиц.

По аналогии с «Виртуальным реактором» такую среду можно назвать «Виртуальное облако». Основная идея концепции этой вычислительной среды заключается в моделировании активного воздействия на конвективное облако с помощью нескольких численных моделей с разной степенью подробности описания динамических и микрофизических характеристик облака. На первом этапе разработки концепции вычислительной среды предполагается использовать двумерную [10] модель облака.

Первая глава настоящей работы рассматриваются различные способы активных воздействий на облака и методы оценки результатов воздействий. Особое внимание уделяется проблеме использования численных моделей для оценки физического эффекта активных воздействий на конвективные облака.

Во второй главе рассматриваются вопросы, связанные с моделированием процессов в конвективных облаках на примере двумерной модели конвективного облака с подробным описанием микрофизических процессов. Анализируются эффективность различных алгоритмов распараллеливания модели, приводятся результаты профилирования программного кода модели.

Третья глава посвящена описанию концепции построения распределенной вычислительной среды «Виртуальное облако», предназначенной для моделирования результатов воздействий на конвективные облака. Обсуждаются теоретические основы построения такой среды, ее Структура и принципы реализации.

Постановка задачи

Целью работы является разработка концепции построения распределенной вычислительной среды, предназначенной для моделирования результатов воздействия на конвективные облака.

Для достижения поставленной цели, необходимо решить следующие задачи:

- 1) Изучить способы активных воздействий на облака и методы оценки результатов воздействий
- 2) Изучить принципы моделирования процессов в конвективных облаках на примере двумерной модели конвективного облака с подробным описанием микрофизических процессов
- 3) Выбрать и проанализировать наиболее эффективные алгоритмы распараллеливания для моделирования конвективного облака и соответствующее аппаратное обеспечение
- 4) Изучить функциональные особенности распределенных вычислительных сред (problem solving environment) и способы их построения.

Обзор литературы

Статистика опасных природных процессов, произошедших в России за последние 10-15 лет, показывает, что их последствия становятся все более опасными для объектов экономики, населения и окружающей среды. Уже в настоящее время прямые и косвенные ущербы от них составляют 1-2% от валового национального продукта. Это означает, что при валовом объеме продукции в 2014 г., равном 7095 млрд руб., экономика страны потеряла от неблагоприятных природных явлений более 140 млрд руб., а потери продукции растениеводства (при валовой продукции 2125 млрд руб.) составили около 106 млрд руб. [11].

Это вынуждает учитывать возможный экономический ущерб от опасных природных процессов при разработке государственной экономической политики, прогнозов социально-экономического развития государства и макроэкономических программ. Его учет позволяет разрабатывать более реальные стратегические планы экономического развития.

Процессы, приводящие к образованию града, несут в себе колоссальную энергию и град может зародиться в одном регионе, а переноситься ураганскими ветрами в другие регионы. Наиболее подверженными воздействию стихии являются территории Северо-Кавказского и Южного федеральных округов, где отмечается четверть всех чрезвычайных ситуаций (ЧС) в России.

Для предотвращения последствий опасных природных процессов необходимо развитие технологий активных воздействий, специализированных служб прогноза, оповещения и защиты населения.

В научном плане, необходимо дальнейшее проведение фундаментальных теоретических и экспериментальных исследований для развития физических моделей формирования опасных явлений природного характера и создание научно обоснованных принципов и методов их прогноза, мониторинга и предотвращения.

Одним из наиболее эффективных инструментов изучения конвективных облаков и механизмов воздействия на них является компьютерное исследование, которое позволяет, не прибегая к дорогостоящим натурным экспериментам, провести анализ развития облака, проследить влияние различных способов воздействия и метеорологических условий на ход процессов облако- и осадкообразования и выявить параметры, наиболее пригодные для контроля эффекта воздействия.

Существует множество представлений конвективных облаков, отличающихся как размерностью, так и степенью детализации описания микрофизических процессов. По размерности пространства различают одномерные, полуторамерные, двумерные и трехмерные представления. Для научных исследований, направленных, прежде всего, на детальное изучение динамических, микрофизических процессов в облаке и их взаимосвязи, необходимо использовать представления, наиболее полно отражающие природные процессы, т.е. двух- и трехмерные. Такие представления достаточно сложные и требуют больших вычислительных ресурсов [12].

В.И. Хворостьяновым с сотрудниками был разработан комплекс двумерных и трехмерных численных моделей эволюции зон искусственной кристаллизации и просвета [13]. Впоследствии они были обобщены для моделирования искусственного регулирования осадков из фронтальных, конвективных и орографических облаков.

А.Ф. Кузенковым было исследовано влияние гравитационных волн на мезомасштабную структуру тумана и процесс образования просвета при его искусственной кристаллизации [12].

Численные эксперименты с двумерной микрофизической моделью конвективного облака показали, что на различных стадиях развития конвективного облака интенсивность осадков может иметь колебательный характер, а воздействие может приводить как к увеличению, так и к

уменьшению осадков, что можно использовать для целенаправленного регулирования осадков над заданной мишенью [14].

В Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова для оценки физического эффекта воздействия использовалась полуторамерная нестационарная модель конвективного облака [4,5,15]. Результаты расчетов показали, что в целом данные моделирования удовлетворительно согласуются с данными натурных измерений. Воздействия привели к уменьшению максимальной скорости восходящего потока, максимальной влажности дождевых капель, радиолокационной отражаемости, интенсивности жидких осадков и интенсивности града.

Компьютерные исследования методов и эффективности активных воздействий на конвективные процессы могли бы быть более эффективными, если бы проводились с использованием так называемых распределенных вычислительных сред (problem solving environment, PSE), которые в настоящее время широко используются для решения многих научных задач.

Такие среды с использованием высокопроизводительных систем и вычислений разрабатывались, например, для расчетов комплексных химических систем [6], для численного моделирования реакторов плазмохимического осаждения [7], а также моделирования динамики пучков элементарных частиц [8].

PSE обеспечивает полную интегрированную вычислительную среду для разработки, компиляции, отладки и запуска приложений, а также визуализации результатов расчетов. Она включает в себя многие особенности экспертной системы и обеспечивает всестороннюю помощь пользователям в формулировке проблемы, интеграции программных кодов, процессов и данных в глобальной компьютерной среде [16]. Среда позволяет работать с распределенными источниками информации и программными кодами, при этом требования к обработке данных на удаленных узлах системы могут сильно различаться, как

по типу запрашиваемых вычислительных ресурсов, так и по способам обработки информации.

Глава 1. Способы активных воздействий на облака и методы оценки результатов воздействий

1.1. Способы активных воздействий на облака и осадки

Обычно под поднятием «искусственное воздействие на погоду» подразумевают воздействия на облака. Работы в этой области заключаются в засеве облака тем или иным веществом с целью либо вызова осадков, либо рассеяния облака или тумана, либо подавления града.

Осадки (дождь и снег) можно вызвать, переводя облака из коллоидально-неустойчивого состояния, в котором они обычно находятся, в устойчивое состояние [17], при котором образуются капли или кристаллы, достаточно крупные для того, чтобы выпасть из облака, преодолев существующие в нем восходящие течения.

Одним из способов вызывания дождя из теплых облаков является введение выше основания облака в поднимающийся воздух крупных капель, которые поднимаясь, поглощают облачные капли и увеличиваются до размеров, при которых капля может выпасть на землю. Вводимые капли должны быть достаточно крупными, чтобы иметь благоприятные условия для роста, но не настолько крупными, чтобы слишком рано выпасть из облака. [17]

Другой метод воздействия основан на введении солевых частиц вблизи основания облака, чтобы создать центры формирования облачных капель. Обычно предпочитают вводить относительно крупные частицы, поскольку на них возникают капли раствора с относительно большими критическими радиусами. В принципе засев солью более эффективен, чем засев водой, поскольку для получения такого же числа капель-коллекторов необходима меньшая масса вещества. Однако с использованием соли связаны практические

проблемы, а именно комкование частиц при хранении в условиях повышенной влажности воздуха и коррозия оборудования, которых не существует для воды.

Переохлажденным облакам присуща термодинамическая фазовая неустойчивость, связанная с наличием в облаке переохлажденных капель. Стоит образоваться ледяным кристаллам, как начинается их быстрый диффузионный рост за счет этих капель. Основные реагенты, применяемые для образования ледяных кристаллов, - сухой лед (твердая углекислота, CO_2) и йодистое серебро (AgI). Кусок сухого льда размером с булыжник, сброшенный в переохлажденное облако, падает и замораживает большую долю капель на своем пути. Лабораторные эксперименты показали, что частицы AgI можно вводить в облака в виде дыма, образующегося при сгорании некоторых соединений серебра.

Возможное влияние искусственно созданных ледяных кристаллов на облако зависит от того, кучевое оно или слоистообразное. Слоистые облака сравнительно «тонкие», их верхняя граница располагается в области относительно высоких температур, где естественные ледяные ядра недостаточно активны. Поэтому процессы осадкообразования происходят в них достаточно медленно и искусственно введенные ядра льдообразования могут существенно ускорить процесс проявления осадков. Количество осадков будет при этом небольшим, его можно увеличить, если облака существуют долго, периодически повторяя засев.

Эффект воздействия на кучевые облака не так очевиден. Засев небольших облако с непродолжительным временем жизни может вызвать самое большее слабый дождь или снег из облака, которое иначе не дало бы осадков, или дождь может выпасть немного раньше, чем это было бы без засева.

Мощные кучево-дождевые облака, существующие продолжительное время, дают достаточное количество естественных осадков.

При наличии так называемых задерживающих слоев в атмосфере, когда наблюдаемая инверсия вертикального распределения температуры или

изотермия препятствует вертикальному развитию облака, его засев может высвободить скрытую теплоту фазовых переходов, которая увеличит силу плавучести и позволить облаку распространиться гораздо выше задерживающего слоя [17].

Низкая сплошная облачность и туманы представляют опасность в районе аэропортов. Идея о рассеянии облаков путем засева гораздо более привлекательна, чем идея об усилении осадков. В облако вводят крупные частицы или ледяные ядра для того, чтобы поглотить облачные капли, тем самым временно «просветляя» некоторую часть облака. Для рассеяния переохлажденных туманов и сплошных облаков с определенным успехом использовалось йодистое серебро и сухой лед.

Засев облаков ледяными ядрами с целью ослабления града основывается на следующих идеях. Первая из них относится к случаю замораживания практически всех переохлажденных капель в верхних частях потенциально градоопасных кучево – дождевых облаков. Это фактически прекращает рост градин посредством захвата капель и исключает тем самым возможность образования крупных градин. Но реализация этой идеи требует такого количества льдообразующего реагента, которое значительно превышает возможности любого приспособления для засева, применяемого в настоящее время. Вторая идея опирается на возможность использования более умеренного количества реагента и исходит из того, что необходимо добавление ледяных ядер только в ограниченную зону облака, туда, где, как считают, градины имеют максимальную скорость роста.

В развитие этой идеи используется метод, когда ледяные ядра вводятся в более низко расположенную зону облака, которая предположительно является областью основного восходящего потока. Эта зона содержит естественные ледяные ядра и частицы осадков, которые служат зародышами градин. Утверждается, что, внося искусственные ядра, можно вызвать столь активную

конкуренцию за имеющиеся в наличии источники воды, что станет маловероятным рост градин до больших размеров. Следовательно, при этом методе воздействия предполагается вызвать образование большего числа мелких градин вместо немногочисленных крупных. Мелкие градины могут полностью растаять, не достигнув земли, или по крайней мере причинить меньший ущерб, чем крупные.

1.2. Оценка физического эффекта активных воздействий

При выполнении работ по активным воздействиям важной задачей является оценка физического эффекта указанных работ, т.е. выявление результатов воздействий на фоне естественных облачных процессов [15]. Пространственно-временная структура облака при естественном развитии должна отличаться от таковой при активных воздействиях. Сравнение характеристик облака в разные моменты жизни позволяет выявить реакцию облака на внесенное возмущение, определить наиболее чувствительные к нему параметры [18-20].

В настоящее время используются три основных подхода к оценке физического эффекта воздействий [21]. Первый из них базируется на результатах измерений в результате воздействий. При этом в качестве критерия эффективности используются результаты сравнения с ожидаемыми изменениями в характеристиках облаков в соответствии с принятой концепцией.

Второй метод основывается на статистическом анализе результатов натурных экспериментов, где сравниваются две группы облаков: подвергнутых воздействию и развивающихся естественным путем.

Третий подход основывается на использовании численных моделей и сравнении характеристик облаков, полученных при моделировании в естественном цикле эволюции и при активных воздействиях. Численное моделирование позволяет получить большой набор характеристик облака.

Основной проблемой является выбор тех из них, которые наиболее чувствительны к конкретному виду воздействий, и, тем самым, наиболее информативны. Отметим, что оценка эффекта воздействий с использованием численной модели позволяет выявлять не только изменение характеристик облака, но и их закономерности.

При этом должна быть решена проблема синхронизации изменения характеристик в модели и в натуральных условиях, если в последнем случае соответствующую характеристику можно измерить.

Глава 2. Изучение принципов моделирования процессов в конвективных облаках на примере двумерной модели конвективного облака с подробным описанием микрофизических процессов

Эффективным инструментом изучения конвективных облаков является численное моделирование. Существует множество моделей развития конвективных облаков, отличающихся как размерностью, так и степенью детализации описания микрофизических процессов.

Для научных исследований, направленных, прежде всего, на детальное изучение динамических, микрофизических процессов в облаке и их взаимосвязи, очевидно, необходимо использовать модели, наиболее полно отражающие природные процессы, т.е. двух – трех мерные модели с подробным описанием микрофизических процессов. Однако такие модели требуют для своей реализации значительных вычислительных ресурсов. Кроме того, даже при использовании высокопроизводительной вычислительной техники каждый вариант расчета программы занимает около суток, что является препятствием для использования такого рода моделей в целях оперативного прогноза опасных конвективных явлений. Единственным выходом из этой ситуации является распараллеливание программного кода модели, что позволит существенно сократить время счета соответствующей программы. Распараллеливание последовательной версии научной программы позволит использовать накопленный потенциал для проведения вычислительных экспериментов там, где ранее не хватало вычислительных мощностей.

2.1. Краткое описание модели

В настоящей работе будет представлена модель HUCM (the Hebrew University Cloud Model) [10] – это двумерная нестационарная модель облачного ансамбля, базирующаяся на спектральном микрофизическом подходе.

Динамический блок модели представлен уравнениями для завихренности, уравнением для функции тока и уравнением неразрывности.

Среда считается турбулизованной, коэффициенты турбулентности одинаковы для всех конвективных переменных и рассчитываются из формулы, которая выводится из уравнения баланса турбулентной энергии при условии равенства нулю производных по времени.

Микрофизический блок модели основан на решении кинетических уравнений, описывающих эволюцию функций распределения для масс гидрометеоров. Рассматриваются следующие типы гидрометеоров: водяные капли (облачные капли и дождевые капли (частицы осадков)); ледяные кристаллы: столбики, пластинки и дендриты; снежные хлопья; крупа (крупные кристаллы, как правило, с намерзшими каплями воды; град (замершие капли воды)). Различные типы кристаллов различаются по форме, плотности, температуре образования, установившейся скорости падения и механизмам роста.

Порядок расчетов выглядит следующим образом. Для динамических и термодинамических процессов на каждом временном шаге рассчитываются новые значения пересыщения по отношению к воде и льду. Каждый «динамический временной шаг» разделяется на 8 шагов для микрофизических расчетов. За время рассчитываются микрофизические процессы, происходит перерасчет пересыщения и массы облачных частиц в каждом интервале времени. Схематично порядок расчетов представлен на рисунке 1:

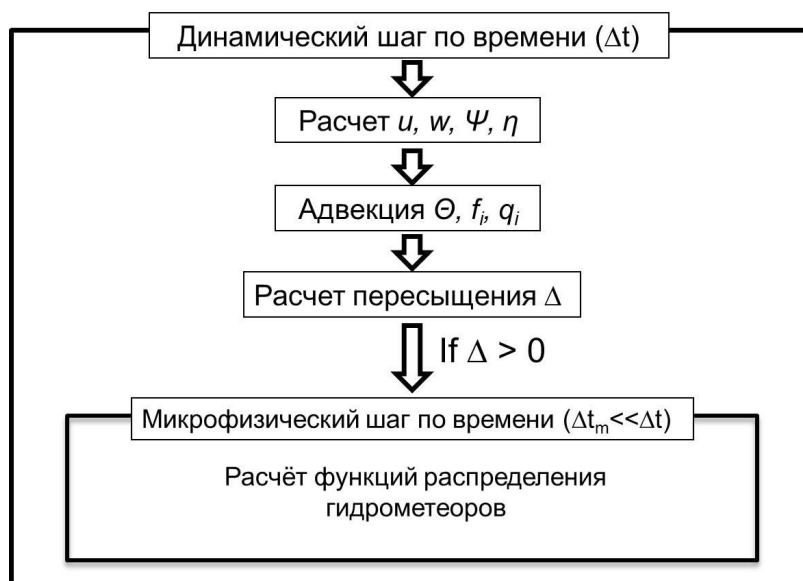


Рис 1. Порядок расчётов модели

Расчётная область модели простирается на 200 км в горизонтальном направлении и на 12 км в вертикальном.

Исследуемая расчётная область покрывается конечно-разностной сеткой (в случае нашей модели имеем 129 X 31 узлов сетки). Конечно-разностное решение будет определяться в узлах сетки, лежащих на пересечении линий сетки.

В качестве конечно-разностного аналога уравнения для переноса завихренности используется двумерная девятиточечная схема Аракавы. Она эффективно применяется для решения метеорологических задач, в которых рассматривается уравнение переноса вихря в невязкой жидкости.

Считается, что в начальный момент времени ($t=0$) атмосфера квазистатична и горизонтально однородна.

При $z=0$ (нижняя граница расчётной области): потоки тепла, влаги и момента движения определяются из модели параметризации поверхностного слоя атмосферы.

Начальная относительная влажность воздуха над поверхностью воды принимается равной 90%. Это на 5% больше значения влажности в начальный

момент времени над сушей. Первоначально облака отсутствуют. Образование облаков происходит благодаря локальной термической циркуляции воздуха. Температура поверхности считается постоянной на протяжении всего расчёта модели.

Блок-схема ввода-вывода модели выглядит следующим образом:



ис 2. Блок-схема ввода-вывода данных модели

2.2. Алгоритмы распараллеливания модели и анализ их эффективности

При решении задач газовой динамики, аналогичных рассматриваемой, на многопроцессорных системах с помощью сеточных методов [22], широко используются три подхода для построения параллельных программ. Первый получил название метода распараллеливания по пространству (метод геометрического параллелизма), второй – метод распараллеливания по физическим процессам, третий – распараллеливание с помощью передачи сообщений (метод коллективного решения) [23].

Рассматриваемая вычислительная программа моделирует двумерное нестационарное турбулентное движение воздуха. Отметим некоторые особенности реализации математической модели, используемой в программе. Входные и выходные данные хранятся в трехмерных статических массивах, сетка имеет прямоугольную форму, размерность сетки вычислений, как уже говорилось выше, по горизонтали $n = 129$ узлов, по вертикали $m = 31$ узел. В реализованном в программе численном методе значения в узлах сетки текущего временного слоя рассчитываются с использованием значений предыдущего временного слоя. Для вычисления значений в узле сетки используются значения соседних узлов. На рисунке 7 изображены шаблоны связей узлов в вычислениях (1 – для метода Аракавы, 2 – для метода, вычисляющего функцию тока).

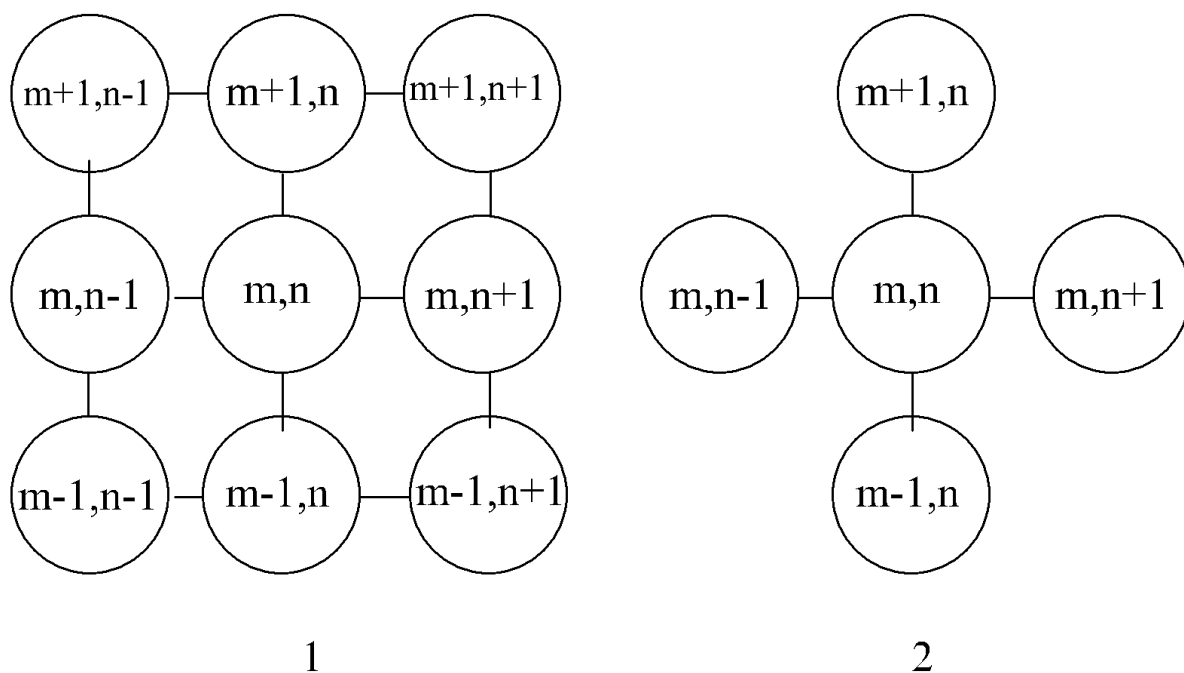


Рис3.Шаблоны вычислений

2.2.1. Алгоритм распараллеливания по пространству

Декомпозиция данных является общей методикой распараллеливания для вычислений на регулярных структурах [24]. Декомпозицию предлагается производить по горизонтальной координате. Далее описаны предполагаемые этапы последовательной модификации программы.

На первом этапе производится декомпозиция программы для облегчения внесения изменений и проведения отладки. Во-первых, необходимо сгруппировать по классам функции, отвечающие за вычисления в программе (т.е. функции принадлежащие группам «динамика» и «микрофизика»), функции, выполняющие чтение и запись данных (т.е. функции принадлежащие группе «ввод/вывод») и функции, отвечающие за визуализацию (т.е. функции группы «графика»). Во-вторых, необходимо вынести в отдельные структуры используемые в программе константы и переменные.

Быстродействие программ зависит не только от применяемого алгоритма, но и от организации структур данных и порядка вычислений на них. Процессор может обращаться к данным в оперативной памяти только через кэш-память. При попытке обратиться к данным, отсутствующим в кэше, выполняется непроизводительная процедура выгрузки-загрузки страниц из кэш-памяти. В идеале количество вызовов процедуры выгрузки-загрузки страниц должно стремиться к минимуму. В исходной последовательной программе каждый массив занимает большое количество страниц памяти. Поэтому используемые в программе структуры данных необходимо реорганизовать так, чтобы в каждой ячейке сетки вычислений объединялись соответствующие значения исходных структур данных.

Исходную задачу мы разбиваем на группу областей, независимых друг от друга на каждом расчетном шаге и пересекающихся только по границе разбиения. Делаем расчёты в каждой области, затем согласуем границы и переходим к расчету следующего слоя.

Напомним, что, согласно численной схеме модели, в каждом узле расчётной области производятся расчёты уравнений динамики, затем осуществляется проверка условия для пересыщения. Если значение пересыщения больше нуля, то в рассматриваемом узле необходимо вычисление уравнений, описывающих микрофизические процессы. Такие узлы конечно-разностной сетки соответствуют точкам пространства, в которых начинает формироваться облако. На раннем этапе развития облако имеет небольшие размеры, затем оно начинает развиваться – увеличиваться в размерах, могут выпадать осадки, происходят разные микрофизические процессы внутри облака. Как правило, даже на поздних стадиях развития, облако занимает малую часть расчётной области и распространяется не равномерно (см. приложение 2). Таким образом, при декомпозиции расчётной области на подобласти возникнет следующая ситуация: в каких-то подобластях

окажется много узлов, требующих расчёта микрофизических процессов, в каких-то мало, а в некоторых такие узлы вовсе будут отсутствовать. Расчёт микрофизики занимает довольно длительное время. При распараллеливании по пространству, каждую подобласть обрабатывает свой процессор. Таким образом, процессоры, отвечающие за подобласти с большим количеством вычислений микрофизики, загружаются сильнее. Как следствие, возникает нарушение балансировки загрузки между процессорами.

Алгоритм декомпозиции расчётной области обладает следующими достоинствами:

- алгоритм подходит для использования метода Аракавы;
- существует возможность автоматизации некоторых этапов работ по распараллеливанию программного кода.

Тем не менее, эффективность работы программы зависит от равномерности загрузки вычислительных узлов, но алгоритм распараллеливания по пространству в рассматриваемой задаче такую возможность предоставить не может.

2.2.2. Алгоритм распараллеливания по физическим процессам

Численный исходный последовательный алгоритм для решения уравнений, описывающих эволюцию функций распределения гидрометеоров под влиянием микрофизических процессов, построен с учетом расщепления по физическим процессам.

Согласно схеме расщепления, чтобы приступить к расчету j -ого этапа, мы должны знать значения искомого решения на предыдущем ($j-1$)-ом этапе. В этой последовательности действий и состоит главная сложность распараллеливания по физическим процессам.

Наиболее простой подход — определять значения рассчитываемых величин по всем физическим процессам, которые учитываются в отдельности, по состоянию их в предыдущем слое по времени.

В этом случае возникают свои осложнения: во-первых, такой подход существенно изменяет вычислительный алгоритм и снижает аппроксимацию разностной схемы, во-вторых, время счета того или иного физического процесса очень различно.

Очень не простая задача при таком подходе — балансировка (распределение) физических процессов по отдельным процессорам с их максимальной загрузкой. Согласно схеме расщепления, пока не закончится расчёт функции распределения k -ого этапа на j -ом временном слое, не сможет начаться расчёт k -ого этапа $(j+1)$ -го временного слоя. Ещё большей проблемой является зависимость микрофизических процессов друг от друга.

В результате указанных выше недостатков алгоритма, возникает «простой» процессоров, что ведёт к уменьшению эффективности работы программы.

2.2.3. Алгоритм коллективного решения

Параллелизм типа "коллективного решения" удобен при проведении вычислений, распадающихся на большое количество однотипных задач, каждая из которых решается независимо от остальных. Передачи данных между такими задачами нет, а значит, полностью отсутствует необходимость их взаимной синхронизации.

Применительно к нашей задаче, имеем следующее. Расчётная область покрыта конечно-разностной сеткой, которая представляет собой набор узлов. В каждом из этих узлов следует определять ряд параметров на каждом временном слое с помощью решения системы дифференциальных уравнений с соответствующими начальными данными.

В соответствии с численной схемой модели конвективного облака, в начале решаются уравнения, описывающие динамические процессы, затем, при выполнении соответствующих условий, начинается расчёт процессов, отвечающих за микрофизику. Решение системы уравнений для микрофизических процессов в каждом узле зависит только от локальных значений переменных в этом узле. При решении системы уравнений для динамических процессов, точнее её конечно-разностного аналога, используется метод Аракавы. Метод предписывает, для вычисления значения завихрённости в текущем узле, использование значений восьми соседних узлов. Если в качестве требующихся значений брать значения, вычисленные на предыдущем временном слое, то набор узлов конечно-разностной сетки на каждом конкретном временном шаге можно считать независимым.

Очевидно, что вычислительная нагрузка в различных узлах значительно отличается. При построении параллельной программы с помощью классического метода "коллективного решения" используется следующий алгоритм распределения вычислительной нагрузки.

- Выделяется один управляющий процессор, все остальные используются в качестве обрабатывающих узлов, то есть счетных. На управляющий процессор возлагаются функции распределения элементарных заданий по обрабатывающим процессорам и сбора полученных результатов.
- Каждый обрабатывающий процессор выполняет элементарные задания - решение системы дифференциальных уравнений для очередного узла сетки с соответствующими локальными параметрами.
- В начале очередного шага каждый из процессоров ожидает новую порцию данных, обрабатывает ее, возвращает результат и снова переходит к ожиданию очередного задания, пока не получит в ответ вместо задания сообщение, что все узлы сетки уже обработаны.

Отсутствие необходимости выполнения синхронизации между элементарными задачами позволяет передавать разным процессорам разное количество расчетных узлов по мере окончания обработки данных. Тем самым решается проблема равномерной загрузки процессоров, даже если время решения системы уравнений для разных узлов сетки или производительность процессоров сильно отличается.

Преимущества этого метода могут быть реализованы в полной мере, так как данные для обработки изначально сосредоточены на одном из процессоров, который и будет выполнять управляющие функции.

2.2.4 Сравнение эффективности алгоритмов распараллеливания

Для того, чтобы выбрать наиболее эффективный алгоритм распараллеливания, проведём сравнительный анализ всех трёх алгоритмов, описанных выше.

Метод геометрического параллелизма является методом статической балансировки загрузки, заранее определяя обрабатываемую каждым процессором часть сетки. Статическая балансировка эффективна лишь при условии, что априорной информации достаточно для предварительного распределения общей вычислительной нагрузки поровну между процессорными узлами. В рассматриваемой модели конвективного облака это не так и использование статической балансировки порождает неравномерную загрузку вычислительных узлов.

Сформулируем достоинства и недостатки алгоритма распараллеливания по пространству.

Достоинства алгоритма:

- удобен для реализации используемых численных методов (в частности схемы Аракавы);

- возможна автоматизация некоторых этапов работ по распараллеливанию программного кода.

Недостатки алгоритма:

- необходимость согласования границ областей декомпозиции на каждом шаге вычислений;
- использование статической балансировки загрузки и, как следствие, нарушение равномерной загрузки вычислительных узлов.

Следует вывод, что алгоритм распараллеливания по пространству (геометрического параллелизма) является не эффективным для решения задачи.

Метод распараллеливания по физическим процессам так же является методом статической балансировки загрузки. Здесь заранее определяется какой микрофизический процесс на каком процессоре будет рассчитываться.

Достоинство алгоритма:

- каждый микрофизический процесс рассчитывается при помощи параметров, используемых только в данном узле расчётной области, то есть не требуется передача данных с соседними узлами.

Недостатки алгоритма:

- существенное изменение вычислительного алгоритма и снижение степени аппроксимации разностной схемы;
- распараллеливанию подвергаются лишь расчёты, связанные с микрофизикой, расчёт динамических процессов проводится в последовательном режиме;
- трудность при организации распараллеливания из-за зависимости микрофизических процессов друг от друга;
- нарушение балансировки загрузки процессоров, объясняемое разницей во времени расчета того или иного физического процесса.

Из всего вышеизложенного можно сделать вывод о том, что метод распараллеливания по физическим процессам является не эффективным.

Алгоритм распараллеливания с помощью передачи сообщений (метод коллективного решения), в отличие от предыдущих методов, использует динамическую балансировку загрузки. В его рамках перед началом вычислений не известно, какие именно узлы сетки будут обработаны тем или иным процессором. Процессоры получают задания динамически, по мере выполнения уже поступивших, что обеспечивает равномерную загрузку процессорных узлов.

- изучаемой модели конвективного облака имеет место неоднородная вычислительная нагрузка при расчете разных узлов пространственной сетки, поэтому использование принципа "коллективного решения" потенциально позволяет значительно снизить время простоя и повысить эффективность распараллеливания по сравнению с рассмотренными выше методами геометрического параллелизма и распараллеливания по физическим процессам.

Достоинства алгоритма:

- отсутствие необходимости синхронизации;
- возможность передавать разным процессорам разное количество расчетных узлов по мере окончания обработки данных;
- управляющие функции может выполнять процессор, на котором изначально сосредоточены данные для обработки;
- равномерная загрузка всех используемых вычислительных узлов.

Недостатки алгоритма:

длины параллельно выполняемых ветвей не равны между собой;

•не исключены простои из-за ожидания данных, передачи управления и возникновения конфликтов при использовании общих ресурсов.

Данный алгоритм является эффективным.

Сравнение всех трёх алгоритмов распараллеливания иллюстрируется ниже.

	Декомпозиц ия	Распараллелива ние по	Распараллелива ние с помощью
--	--------------------------	----------------------------------	---

	расчётной области	физическим процессам	передачи сообщений
1. Тип балансировки нагрузки	статич	статич.	динамич.
2. Необходимость изменения вычислительного алгоритма	-	+	+
3. Возможность автоматизации работы по распараллеливанию кода	+	-	-
4. Равномерность загрузки вычислительных узлов	-	-	+

Таблица 1. Сравнительный анализ алгоритмов распараллеливания по ряду критериев

Наиболее существенным критерием эффективности алгоритма распараллеливания выбран критерий под номером 4. Равномерность загрузки вычислительных узлов является самой главной задачей при распараллеливании. Она ведёт к уменьшению времени «простоев» вычислительных узлов, и непосредственно уменьшению времени работы программы.

2.3 Профилирования программного кода модели

Сложность программы заключается в наличии большого числа подпрограмм и вызываемых функций. Все функции, вызываемые в программе, принадлежат к одной из следующих групп:

1.динамика – функции, относящиеся к описанию динамических процессов;

2.микрофизика – функции, относящиеся к описанию микрофизических процессов;

3.графика – функции работы с графическими данными;

4.ввод/вывод – функции, осуществляющие ввод входных данных и вывод результатов;

5.служебные функции;

В таблице 2 приведены результаты профилирования программы на уровне вызовов функций. Для наглядности отображения функции объединены в группы. Time – процент временных затрат на выполнения данной группы функций относительно величины временных затрат на выполнения всей программы. Self (sec) – величина, характеризующая временные затраты, связанные с выполнением данной группы функций.

Группа	time(%)	self(sec)	Кол-во функций
Ввод/вывод	0.01	9.93	18
Графика	0.09	85.14	4
Динамика	44.070004	41993.023	40
Микрофизика	40.81001	38967.96	135

Служебные	15.019986	14326.47	6
-----------	-----------	----------	---

Таблица 2. **Обобщённые результаты профилирования для групп функций**

На основании данных, приведённых в таблице 2, можно судить о преобладании временных затрат на выполнение функций, связанных с динамикой и микрофизикой, по сравнению с прочими группами функций. Распределение времени между этими двумя группами примерно одинаково, однако, количество функций, относящихся к микрофизике значительно больше, нежели функций других видов. На основании имеющихся результатов профилирования были проанализированы временные затраты на выполнения подпрограмм, относящихся к различным микрофизическим процессам.

Микрофизический процесс	Имя подпрограммы	Время выполнения(%)
Конденсация/испарение	ONECOND	0,75
Коагуляция	COAL_BOTT	9,4
Замерзание	TOPFREEZ	0,01
	DOWNFREEZ	0,02
Таяние	MELTING	5,63
Дробление	SHEDDING	2,38
Нуклеация	NUCLEATION	0,01
	ICE_NUCLEATION	0,01

Таблица 3. **Распределение времени выполнения подпрограмм**

Данные, приведённые в таблице 2, свидетельствуют о том, что наибольшие временные затраты связаны с работой подпрограмм, соответствующих таким микрофизическим процессом как коагуляция.

В этой связи представляется целесообразным попытка распараллеливания в первую очередь подпрограммы COAL_BOTT как наиболее затратной с точки зрения времени и, соответственно, в наибольшей степени влияющей на время выполнения всей программы.

Глава 3. Разработка концепции построения распределенной вычислительной среды, предназначенной для моделирования результатов воздействий на конвективные облака

3.1. Теоретическая основа построения распределенной вычислительной среды «Виртуальное облако»

Основной идеей концепции вычислительной среды является моделирование результатов засева облаков с использованием нескольких численных моделей отличающихся степенью описания динамических и микрофизических характеристик облаков. Как уже указывалось во введении,

такую среду далее будем называть «Виртуальное облако» (ВО). Основным применением ВО является моделирование результатов засева облака с различными численными моделями с возможностью сравнения результатов и использование выходных данных одной модели в качестве входных данных для другой. Предполагается использовать одномерную [25-29], двумерную [10] и трехмерную [30, 31] модели. Наиболее простая одномерная модель облака может быть использована для получения быстрых предварительных результатов (за 2-3 минуты вычислений).

Предварительные результаты, в свою очередь могут быть использованы для модификации исходных данных о состоянии атмосферы, которые в дальнейшем используются в качестве входных параметров для двумерной и трехмерной моделей, расчеты по которым требуют существенных ресурсов и многочасовых компьютерных вычислений.

«Тяжелый» вариант ВО, с использованием многомерных моделей можно рассматривать в качестве информационной системы, предназначенной для принятия решений о наилучшем времени и месте засева облака в различных атмосферных условиях. "Легкий" вариант, с использованием только одномерной модели облака, может быть использован в системах реального времени, предназначенных для оперативных работ по увеличению количества осадков или подавлению града.

Основная идея внедрения программного обеспечения на основе сервис-ориентированной архитектуры (SOA), заключается в использовании Grid и облачных вычислительных технологий, которые позволяют осуществлять дистанционный доступ к информационным и вычислительным ресурсам. Распределенные сервисы налаживают взаимодействие между математическими моделями, источниками метеорологической информации и оперативными центрами засева облаков.

Пользовательский интерфейс ВО позволяет осуществлять моделирование как в исследовательских целях так и давать реальные рекомендации, касающиеся времени и места проведения засева. Такой подход дает исследователям возможность оптимизировать параметры расчетов и верифицировать их результаты. Подобный подход к разработке виртуальной лаборатории на основе рабочих потоков WS- VLAM [32] обсуждается в [33] и [8].

Для разработки дизайна ВО используется парадигм LEGO [34, 8]. В терминах информационных технологий он соответствует объектно-ориентированному проектированию и компонентному программированию. Каждый объект представлен как независимый компонент с собственными параметрами и поведением. Разработка распределенных вычислительных систем на основе этой концепции рассматривается в работе [35] более подробно.

Виртуальное облако рассматривается как набор услуг и инструментов, позволяющих использовать численные модели облаков для выбора оптимальных параметров и моделирования результатов засева облаков на распределенных вычислительных ресурсах. Пользователи получают доступ к ресурсам ВО через единый интерфейс, который включает графический интерфейс, реализованный на разных платформах.

Схема высокого уровня среды ВО аналогично представлены в работе [8] показано на рис.4.

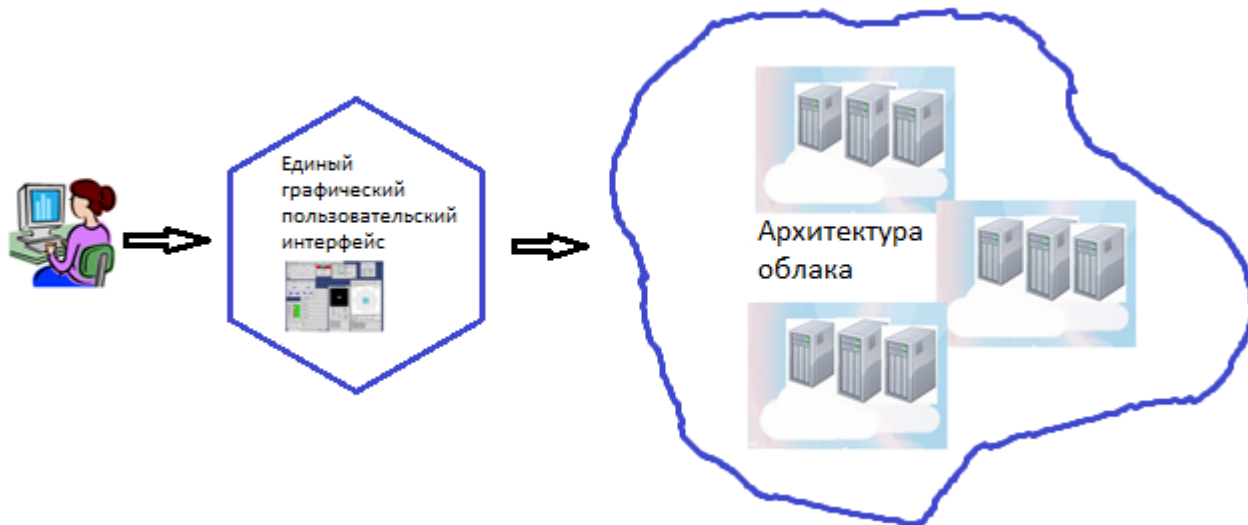


Рис.4 Схема высокого уровня виртуальной среды облака

3.2 Структура и принципы реализации «Виртуального облака»

Основной целью Виртуального облака является проведение вычислительных экспериментов для моделирования оптимальных параметров засева облаков с использованием численных моделей облаков с возможностью сравнения результатов расчетов (различные модели имитируют черты облака с различной степенью детализации). Кроме того, предварительные результаты, полученные с помощью одной модели, могут быть использованы в качестве входных данных для другой, более сложной модели.

Технология параллельных вычислений и массивно-параллельных вычислительных систем могут быть эффективно использованы в случае сложных 2-D и 3-D моделей облачных. В этом случае специальные исследования могут быть предоставлены для выбора оптимальной конфигурации вычислительных ресурсов, предназначенных для решения проблемы.

Пользователь имеет доступ к ресурсам виртуального облака через "единое окно" [8] - портал или интерфейс рабочего стола. В этом интерфейсе

пользователь выбирает источники метеорологической информации и тип облачной модели, устанавливает входные данные и параметры, специфичные для каждой модели, и задача выполняется на доступных вычислительных ресурсах, см Рис.5.



Рисунок 5. Вычислительный эксперимент в виртуальном облаке

Для того, чтобы обеспечить четкую последовательность операций нам нужна правильная работа процессов системы управления, которая должна также отвечать за преобразование данных между форматами, используемыми различными источниками метеорологических данных и различными облачными моделями.

Во время эксплуатации ВО пользователь должен контролировать все этапы численного эксперимента с помощью доступа ко всем виртуальным облачным сервисам. Единый графический интерфейс (UGI) предоставляет исследователю возможность выбирать источники данных и тип облачной модели, реализовывать процесс вычислений и визуализации результатов вывода. Пользователь может указать метод для реализации моделей. Так например, расчеты по одномерной модели требуют для своей реализации технологии CUDA, а двух и трех мерные модели - технологии MPI. Требования

пользователя подбираются к вычислительным ресурсам с помощью виртуальной инфраструктуры ВО.

Проиллюстрируем это согласование в процессе засева облаков и спрогнозируем результат. В первую очередь, исследователь должен определить соответствующие метеорологические источники данных. Для этого в состав ВО должна быть включена комплексная информационная система, основанная на технологии консолидации и направленная на получение входных данных модели.

Входные данные модели представляют собой вертикальные распределения температуры и влажности (данные радиозондирования атмосферы), а также набор характеристики поверхности Земли. В некоторых конкретных случаях, исходные данные должны быть модифицированы перед использованием в двумерной и трехмерной облачных моделях. Модификация должна быть сделана с помощью одномерной модели, самой простой и самой быстрой в смысле вычислений.

После того, как пользователь выберет подходящую технологию для расчета, Виртуальное Облако начнет реализовывать вычислительный эксперимент. Этот эксперимент может быть выполнен на различных ресурсах посредством сетевых и облачных сервисов.

Блоки среды ВО могут быть описаны следующим образом, см. рис.6:

- Информационная система, основанная на технологии консолидации данных и предназначенная для извлечения, трансформации и загрузки данных в реляционную базу, которая содержит весь набор метеорологической информации. Пользователь может выбрать район и номер метеорологической станции, используя карты и графический интерфейс.
- Блок для предварительного анализа данных и их модификации с помощью одномерной облачной модели. Пользователь указывает тип

модели и тип технологии (CUDA). Специальный графический интерфейс должен обеспечивать возможность анализировать предварительные результаты и изменять входные данные в соответствии с этим результатом.

Модифицированные данные будут служить в качестве начальных и граничных условий для двумерной и трехмерной облачных моделей.

- Блок для операций над двумерной и трехмерной моделями облаков. Технология MPI должна использоваться для эффективного распараллеливания кодов моделей.

- Блок для визуализации и анализа. Предварительные значения места и времени засева должны быть выбраны в соответствии с вычисленной эволюцией поля ветра и концентрации гидрометеоров.

Исследователь не обязан использовать все типы моделей, доступных в ВО. Например, в небольших метеорологических центрах, расположенных в аэропортах, где высокопроизводительные вычислительные ресурсы не доступны, использование одномерной модели будет достаточно.

Использование ВО выглядит следующим образом:

- 1) Пользователь обеспечивает аутентификацию и авторизацию, чтобы получить доступ к пользовательскому интерфейсу ВО.

- 2) Пользователь переходит к специальной интегрированной информационной системе и выбирает число метеорологических станций в области засева облаков. Система загружает автоматически метеорологические данные о состоянии атмосферы и характеристики поверхности земли и преобразует разнородные метеорологические данные в формат входных данных модели.

- 3) Пользователь начинает работу с одномерной моделью для проверки качества исходных данных. При необходимости входные данные могут быть изменены с помощью графического интерфейса.

- 4) Пользователь указывает двумерную или трехмерную облачную модель для расчетов и модифицированных исходных данных.

Это делается либо вручную с помощью выделенных ресурсов (например, кластер или многоядерный процессор) либо автоматически, на основе информации о требованиях приложения.

5) Пользователь устанавливает исходные параметры засева облаков, количество реагента и момент его введения в облако. После этого необходимо повторить весь комплекс расчетов со всеми моделями, чтобы оценить результат засева.

6) Численные коды моделей позволяют контролировать промежуточные результаты вычислений путем установления специальных параметров просмотра. ВО дает возможность установить эти параметры или изменить их.

7) Специализированные системы [36] будут использоваться для отслеживания ошибок, возникающих в ходе численных экспериментов. Результаты расчетов могут быть визуализированы с помощью специальных пакетов GrADS и Tecplot. Виртуальное облако дает возможность оценить результат засева путем сравнения результатов расчетов с воздействием и без него.

Инфраструктура ВО должна обеспечивать возможность параллельного проведения нескольких численных экспериментов с различными параметрами засева, чтобы была возможность наиболее быстрого выбора их оптимального сочетания.

Предполагается использовать технологии облачных вычислений для упрощения процесса запуска численных моделей, которые имеют различные требования к операционным системам и аппаратным средствам, а также для получения результатов в заранее установленное время. К тому же, использование облачных технологий позволяет реализовать численные эксперименты при ограниченных локальных вычислительных ресурсах. Дополнительные возможности могут быть получены с использованием технологии виртуализации.

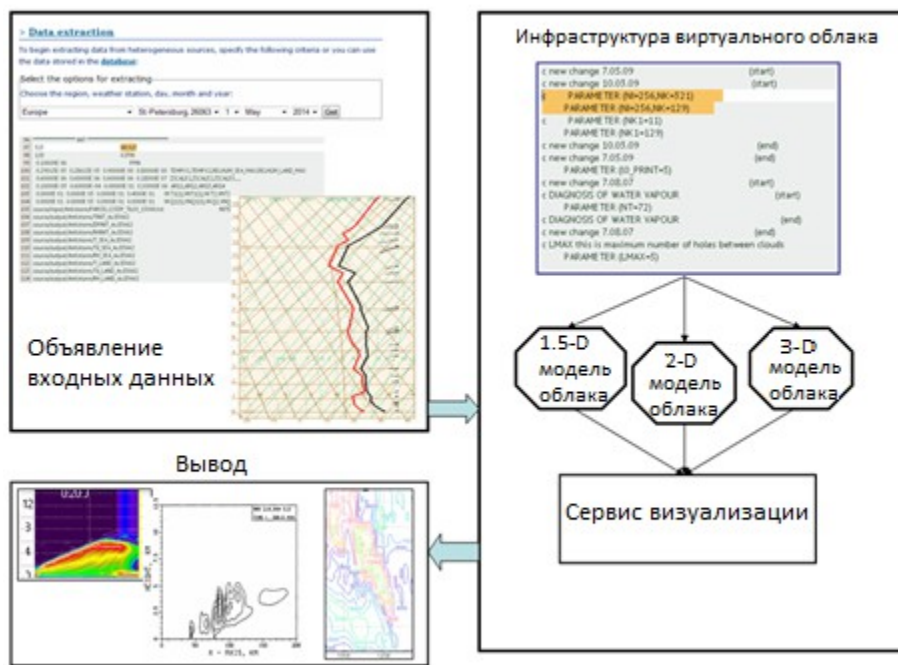


Рисунок 6. Схематическое изображение среды Виртуальное облако

Выводы

В настоящее время целью проведения работ по активным воздействиям на облака является: искусственное вызывание осадков в засушливых районах, предотвращение градобитий и катастрофических ливней, обеспечение безопасности полетов, метеообеспечение массовых общественных мероприятий, метеозащита городов, транспортных, энергетических и прочих объектов от опасных явлений погоды.

Численное моделирование конвективных облаков является мощным средством оценки результатов активных воздействий. Оценка эффекта воздействий с использованием численной модели облака позволяет получить

большой набор характеристик облака и выбрать те из них, которые являются наиболее информативными с точки зрения чувствительности к определенному типу воздействия, дать прогноз относительно оптимального времени и локализации воздействия.

Наиболее эффективное использование численных моделей облаков для оценки результатов воздействия возможно при распараллеливании их программных кодов. Анализ показал, что наиболее эффективным алгоритмом при распараллеливании программ, реализующих модели конвективных облаков может считаться метод коллективного решения.

Анализ результатов профилирование программного кода двумерной нестационарной модели облака с подробным описанием микрофизических процессов показало, что функции и подпрограммы, предназначенные для расчета микрофизических характеристик облака, вдвое увеличивают время расчета.

Наиболее эффективно использовать численные модели облаков для оценки результатов активных воздействий на облака возможно в рамках распределенной вычислительной среды «Виртуальное облако».

Основной идеей концепции такой вычислительной среды является моделирование результатов засева облаков с использованием нескольких численных моделей отличающихся степенью описания динамических и микрофизических характеристик облаков.

Основной целью Виртуального облака является проведение вычислительных экспериментов для моделирования оптимальных параметров засева облаков с использованием численных моделей с возможностью сравнения результатов расчетов (различные модели имитируют черты облака с различной степенью детализации).

Заключение

В данной выпускной квалификационной работе рассматриваются различные способы активных воздействий на облака и методы оценки результатов воздействий. Особое внимание уделяется проблеме использования численных моделей для оценки физического эффекта активных воздействий на конвективные облака.

Рассматриваются вопросы, связанные с моделированием процессов в конвективных облаках на примере двумерной модели конвективного облака с подробным описанием микрофизических процессов. Для более полного понимания структуры модели, её особенностей и формирования представления о возможностях распараллеливания, произведён анализ программы. А именно, изучены блок-схема и код последовательной версии программы. Подробно расписаны три алгоритма распараллеливания для модели конвективного облака, выделены достоинства и недостатки каждого алгоритма, сделан вывод о степени их эффективности. Проведён сравнительный анализ, в результате которого и выявлен наиболее эффективный алгоритм распараллеливания для моделирования конвективного облака.

Описывается концепция построения распределенной вычислительной среды «Виртуальное облако», предназначенной для моделирования результатов воздействий на конвективные облака. Обсуждаются теоретические основы построения такой среды, ее структура и принципы реализации.

Основной целью «Виртуального облака» является проведение вычислительных экспериментов для моделирования оптимальных параметров засева облаков с использованием численных моделей облаков с возможностью сравнения результатов расчетов (различные модели имитируют черты облака с различной степенью детализации). Кроме того, предварительные результаты,

полученные с помощью одной модели, могут быть использованы в качестве входных данных для другой, более сложной модели.

Список литературы

1. Weather Modification Association <http://www.weathermodification.org/>
2. A. S. Dennis. Weather modification by cloud seeding. Academic Press, 1980., P.284
3. G. Breuer, Weather Modification, Cambridge University Press, 1980
4. Довгалюк Ю.А., Драчева В.П., Егоров А.Д., Качурин Л.Г., Пономарев Ю.Ф., Синькевич А.А., Станкова Е.Н., Степаненко В.Д. Результаты комплексных исследований характеристик мощного кучевого облака после воздействия Метеорология и гидрология. 1997. № 11. С. 20.
5. [Т. В. Краусс, А. А. Синькевич, Н. Е. Веремей, Ю. А. Довгалюк, В. Д. Степаненко](#) Оценка результатов воздействий на кучево-дождевое облако с целью ослабления града в провинции Альберта (Канада) по данным радиолокатора и численного моделирования. Метеорология и гидрология. 2009, N4, pp.39 - 53
6. Schuchardt KL, Myers JD, Stephan EG. 2001. Open Data Management Solutions for Problem Solving Environments: Application of Distributed Authoring and Versioning to the Extensible Computational Chemistry Environment. Proceedings HPDC-10 2001.
7. V.V. Krzhizhanovskaya, V.V. Korkhov, A. Tirado-Ramos, D.J. Groen, I.V. Shoshmina, I.A. Valuev, I.V. Morozov, N.V. Malyshkin, Y.E. Gorbachev, P.M.A. Sloot Computational Engineering on the Grid: Crafting a Distributed Virtual Reactor // Proceedings of Second IEEE International Conference on e-Science and Grid Computing (e-Science'06) — Amsterdam, the Netherlands, — 2006. — P. 101
8. V. Korkhov, A. Ivanov, N. Kulabukhova, A. Bogdanov, S. Andrianov. Virtual Accelerator: Distributed Environment for Modeling Beam Accelerator Control System. In proceedings of 13th International Conference on Computational

- Science and Its Applications (ICCSA 2013), 2013, June 24-27, 2013, Ho Chi Minh City, Vietnam
9. N. Kulabukhova, V. Korkhov, S. Andrianov Virtual Accelerator: Software for Modeling Beam Dynamics. Computer Science and Information Technologies Proceedings of the Conference, September 23-27, 2013 Yerevan, Armenia.
 10. Khain A., Pokrovsky A., Pinsky M., 2004: 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. Journal of the Atmospheric Sciences, vol. 61, pp. 2963-2982
 11. Природа России национальный портал
<http://www.priroda.ru/reviews/detail.php?ID=11302>
 12. ФГБУ "ЦАО" Отдел физики облаков и активных воздействий http://www.caorhms.ru/OFAV/hist_of_dep/hist_of_dep_AktVoz.html
 13. Хворостьянов В.Н., Бондаренко В.Г., Котова О.П. Комплекс трехмерных и двумерных моделей облаков и туманов в орографически неоднородном пограничном сл атмосферы. –Труды Всесоюзной конференции по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, Киев,1987. - А..Гидрометеиздат, 1990, с.124-129.
 14. Хворостьянов В. И., Хаин А. П., Когтева Е. А. Двумерная численная модель естественного развития конвективного облака и его засева льдообразующим аэрозолям. //Труды ВГИ. Вып. 77. - 1989. -С. 68-76.
 15. Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Синькевич А.А. Применение полуторамерной модели для решения фундаментальных и прикладных задач физики облаков. Санкт-Петербург, 2013 С.220
 16. Houstis E., Gallopoulos E., Bramley R., Rice J. Problem-Solving Environments for Computational Science // IEEE Computers in Science and Engineering. 1997, Vol. 4, No 3. P. 18-21.

17. Роджерс Р.Р. Краткий курс физики облаков. Ленинград. Гидрометеиздат. С.224
18. Баранов В.Г.б Веремей Н.Е., Власенко С.С., Довгалюк Ю.А. Численное моделирование активных воздействий на конвективные облака с целью предотвращения гроз. – «Облака и радиация»: Сб. трудов Главн. геофиз. обсерватории. – СПб. 1996. 50 с.
19. Дессенс А. Можем ли мы изменить климат? –Л. Гидрометеиздат. 1969 С.117
20. Довгалюк Ю.А., Синькевич А.А., Степаненко В.Д. Способ контроля активного воздействия на облака. Патент № 1811618. // Бюллетень изобретений. №15 1993. Приор. 9.11.89
21. Денис А. Изменение погоды засевом облаков. – М.:Мир. С. 272
22. Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. М.:Наука,1978. 561с.
23. Самофалов В.В., Коновалов А.В., Шарф С.В. Динамизм или статичность: поиск компромисса // Труды Всероссийской научной конференции "Высокопроизводительные вычисления и их приложения". М., 2000. С. 165-167.
24. <http://www.wrf-model.org> Официальный сайт проекта WRF.
25. Raba N.O. Stankova E.N. Research of influence of compensating descending flow on cloud's life cycle by means of 1.5-dimensional model with 2 cylinders. Proceedings of MGO, 2009, V.559, p. 192-209
26. N. Raba, E. Stankova and N. Ampilova One-and-a-half-dimensional Model of Cumulus Cloud with Two Cylinders. Research of Influence of Compensating Descending Flow on Development of Cloud. Proceedings of the 5th International Conference "Dynamical Systems and Applications" Ovidius University Annals Series: Civil Engineering Volume 1, Special Issue 11, June 2009, pp.93-101.

27. N. Raba, E. Stankova On the Possibilities of Multi-Core Processor Use for Real-Time Forecast of Dangerous Convective Phenomena. Taniar et al. (Eds.): ICCSA 2010, LNCS 6017, pp. 130 – 138, 2010. ISBN 978-3-642-12164-7
28. Nikita Raba, Elena Stankova, Natalya Ampilova On investigation of parallelization effectiveness with the help of multi-core processors *Procedia Computer Science*, Volume 1, Issue 1, May 2010, Pages 2757-2762
29. N. Raba, E. Stankova On the Problem of Numerical Modeling of Dangerous Convective Phenomena: Possibilities of Real-Time Forecast with the Help of Multi-core Processors Murgante et al. (Eds.): ICCSA 2011, LNCS 6786, pp. 633 – 642, 2011. ISSN 0302-9743
30. Yu. A. Dovgalyuk, N. E. Veremey, S. A. Vladimirov, A. S. Drofa, M. A. Zatevakhin, A. A. Ignatyev, V. N. Morozov, R. S. Pastushkov, A. A. Sinkevich, V. N. Stasenko, V. D. Stepanenko, A. V. Shapovalov, G. G. Shchukin. A conception of the numerical three-dimensional convective cloud model development i. The model structure and main equations of hydrothermodynamical block. *Proceedings of MGO*. 2008. V. 558. P. 102—142.
31. Yu. A. Dovgalyuk, N. E. Veremey, S. A. Vladimirov, A. S. Drofa, M. A. Zatevakhin, A. A. Ignatyev, V. N. Morozov, R. S. Pastushkov, A. A. Sinkevich, V. N. Stasenko, V. D. Stepanenko, A. V. Shapovalov, G. G. Shchukin. A conception of the numerical three-dimensional convective cloud model development. II. Microphysical block, *Proceedings of MGO*. 2010. V. 562. P. 7—39.
32. A. Wibisono, D. Vasunin, V. Korkhov, Z. Zhao, A. Belloum, C. de Laat, P.W. Adriaans, B. Hertzberger. WS-VLAM: A GT4 Based Workflow Management System. *Lecture Notes in Computer Science*, 2007. Vol. 4489, pp. 191-198
33. V. Korkhov, D. Vasyunin, A. Belloum, S. Andrianov, A. Bogdanov, “Virtual Laboratory and Scientific Workflow Management on the Grid for Nuclear Physics Applications”, *Proceedings of the 4th Intern. Conf. Distributed Computing and Grid-Technologies in Science and Education*, Dubna, Russia 2010, p. 153-158.

- 34.S. Andrianov. LEGO-Technology Approach for Beam Line Design. Proc. of the Eighth European Particle Accelerator Conference. Paris. France, 2002, P. 1607-1609.
- 35.N. Kulabukhova, A. Ivanov, V. Korkhov, A. Lazarev, “Software for Virtual Accelerator Designing”, 13th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems: Proceedings of ICALEPCS2011, Grenoble, France, WEPKS016 p. 816.
- 36.M. Gerhards, V. Sander, T. Matzerath, A. Belloum, D. Vasunin, A. Benabdelkader. Provenance opportunities for WS-VLAM: an exploration of an e-science and an e-business approach. Proceedings of the 6th workshop on Workflows in support of large-scale science Pages 57-66, ACM New York, NY, USA ©2011