

Министерство образования Республики Беларусь
Белорусский государственный университет
Факультет географии и геоинформатики
Кафедра общего землеведения и гидрометеорологии

СОГЛАСОВАНО
Заведующий кафедрой
_____Гледко Ю.А.
«21» апреля 2021 г.

СОГЛАСОВАНО
Декан факультета
_____Курлович Д.М.
«28» апреля 2021 г.

СОГЛАСОВАНО
Председатель
учебно-методической комиссии
факультета
_____Кольмакова Е.Г.
«23» апреля 2021 г.

Численный анализ атмосферных процессов

Электронный учебно-методический комплекс
для специальности: 1-31 02 02 «Гидрометеорология»

Регистрационный № 2.4.2-12/178

Авторы:

Светашев Александр Георгиевич, кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры общего землеведения и гидрометеорологии факультета
географии и геоинформатики БГУ;

Дорожко Наталья Васильевна, преподаватель кафедры общего землеведения и
гидрометеорологии факультета географии и геоинформатики БГУ.

Рассмотрено и утверждено на заседании Научно-методического совета БГУ
30.06.2021 г., протокол № 7.

Минск 2021

Утверждено на заседании Научно-методического совета БГУ
Протокол № 7 от 30.06.2021 г.

Решение о депонировании вынес:
Совет факультета географии и геоинформатики
Протокол № 8 от 28.04.2021 г.

А в т о р ы:

Светашев Александр Георгиевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общего землеведения и гидрометеорологии факультета географии и геоинформатики БГУ;

Дорошко Наталья Васильевна, преподаватель кафедры общего землеведения и гидрометеорологии факультета географии и геоинформатики БГУ.

Рецензенты:

Мельник В.И., вед. науч. сотрудник Центра климатических исследований Института природопользования НАН Беларуси, кандидат географических наук;

Матюшевская Е.В., заведующий кафедрой физической географии мира и образовательных технологий факультета географии и геоинформатики БГУ, кандидат географических наук.

Светашев, А. Г. Численный анализ атмосферных процессов : электронный учебно-методический комплекс для специальности: 1-31 02 02 «Гидрометеорология» / А. Г. Светашев, Н. В. Дорошко ; БГУ, Фак. географии и геоинформатики, Каф. общего землеведения и гидрометеорологии. – Минск : БГУ, 2021. – 96 с. : ил. – Библиогр.: с. 93–95.

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) предназначен для студентов специальности 1-31 02 02 «Гидрометеорология» для дневной формы обучения. Содержание ЭУМК предполагает изучение следующих вопросов: современное состояние теории и практики методов моделирования, анализа и прогноза погоды; физические основы моделирования погоды и климата; орбитальные методы исследования атмосферных процессов и параметров атмосферы; моделирование атмосферных процессов различных масштабов, связь между пространственными и временными масштабами; моделирование атмосферных процессов среднего масштаба; практическое освоение модели численного прогноза атмосферных процессов WRF; системы обработки и валидации результатов расчета; дополнительные возможности системы WRF, проблемы применения, перспективы развития методов численного прогноза атмосферных процессов.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА	4
1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	7
1.1. Современное состояние теории и практики методов моделирования, анализа и прогноза погоды	7
1.2. Физические основы моделирования погоды и климата	11
1.3. Орбитальные методы исследования атмосферных процессов, параметров атмосферы и подстилающей поверхности	18
1.4. Виды численных моделей. Моделирование атмосферных процессов различных масштабов.....	23
1.5. Модель численного прогноза мезомасштабных атмосферных явлений wrf.....	28
1.6. Практическое использование системы wrf.....	37
1.7. Применение подсеточных параметризаций при проведении расчетов погоды численными методами	41
1.8. Системы постпроцессной обработки и визуализации результатов расчета	44
1.9. Верификация моделей и валидация результатов численного моделирования	46
1.10. Использование орбитальных наблюдений для валидации численных моделей	51
1.11. Прогноз погоды с применением численных моделей	54
1.12. Совместное использование метео- и гидрологических численных моделей.....	61
1.13. Проблемы и перспективы развития численного анализа атмосферных процессов.....	67
2. ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ.....	80
2.1. Верификация данных расчетов численного моделирования и возможности их использования	80
2.2. Автоматизация процессов пред-процессной подготовки и постобработки данных в системе wrf.....	81
2.3. Определение картографической проекции по спутниковым изображениям для численного моделирования.....	82
2.4. Разработка файла входных данных, отвечающих за пре-процессную подготовку расчета системы wrf	82
2.5. Использование скриптов perl для анализа метеоусловий	83
3. РАЗДЕЛ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ	84
3.1. Общие правила	84
3.2. Примерный перечень вопросов к экзамену и зачету	85
3.3. Примерная тематика рефератов.....	87
3.4. Требования к рефератам	87
4. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ	88
4.1. Содержание учебного материала.....	91
4.2. Рекомендуемая литература	93
4.4. Учебно-методическая карта	95

¹ Приложение 1. Презентации к лекциям

¹ Приложение 1 размещено отдельным файлом в формате pdf.

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Дисциплина «Численный анализ атмосферных процессов» представляет собой органичную часть курсов физической метеорологии и динамики атмосферы и посвящена изучению методов численного (компьютерного) моделирования атмосферных процессов, а также связанных с ними метеорологических и климатических явлений.

Последнее десятилетие XX и начало XXI века ознаменовались бурным развитием методов численного моделирования метеорологических процессов и явлений различных пространственных и временных масштабов, что было обусловлено значительным прогрессом в области компьютерных систем и информационных технологий. В большинстве развитых стран на повестке дня – создание полностью автономных интеллектуальных систем анализа и прогноза погоды, а также оценки различных экстремальных погодных ситуаций.

Данный курс полностью согласуется с курсами, посвященными радиолокационным и спутниковым методам исследования параметров атмосферы и земной поверхности, поскольку именно результаты дистанционного зондирования используются в качестве исходных данных для функционирования и «валидации» численных физических моделей, в частности, для систем мезомасштабного прогноза погоды.

Дисциплина «Численный анализ атмосферных процессов» читается для специальности 1-31 02 02 Гидрометеорология (специальные) и относится к циклу специальных дисциплин (государственный компонент).

Изложение изучаемой дисциплины предполагает знание таких дисциплин специальности, как «Физическая метеорология», «Синоптическая метеорология» и «Динамическая метеорология».

Цель предмета заключается в подготовке специалистов, владеющих основами теоретических знаний в области развития моделей численного анализа атмосферных процессов, а также практическими навыками проведения расчетов с использованием наиболее современных программ и компьютерных технологий.

В задачи дисциплины входят:

- Формирование у студентов знаний о физических основах, принципах и методах построения численных моделей атмосферы и анализа метеорологических явлений,
- знакомство с самыми передовыми разработками в области численных моделей атмосферных процессов
- получение студентами практических навыков по использованию современных компьютерных систем для численного моделирования, анализа и прогноза реальных погодных ситуаций

Изучение дисциплины базируется на основе знаний, полученных при изучении цикла специальных дисциплин государственного компонента и компонента учреждения высшего образования: физической метеорологии, синоптической метеорологии и динамики атмосферы.

В результате изучения дисциплины обучаемый (студент) должен:

знать:

- физические основы возникновения и развития атмосферных процессов;
- основные физические характеристики метеорологических явлений
- основные признаки и критерии опасных явлений погоды;
- основные принципы и методы численного анализа и компьютерного моделирования
- основы программирования на компилируемых и «скриптовых» языках
- общее устройство и приемы проведения расчетов и распараллеливания вычислений на многопроцессорных системах;
- основные методы получения и использования метеорологической информации с помощью различных систем и интернет -источников;
- основные принципы построения систем автоматизированного прогноза метеорологических явлений различных пространственных и временных масштабов;

уметь:

- получать необходимую информацию из открытых интернет-источников;
- готовить входные данные для проведения модельных расчетов в системе мезомасштабного прогнозирования WRF;
- проводить численное моделирование реальных погодных ситуаций в системе WRF, в том числе и с использованием суперкомпьютеров
- оценивать информацию, получаемую в результате проведенных расчетов, производить ее первичную обработку
- использовать полученные данные при анализе физических процессов и явлений, происходящих в атмосфере.

владеть:

- навыками и методами применения информации, полученной численным моделированием, в научно-исследовательской и практической (прогностической) деятельности.

Для решения задач дисциплины кроме теоретического курса предусматривается проведение практических занятий на суперкомпьютерных системах ННИЦ МО БГУ и БГУ.

В результате изучения учебной дисциплины формируются следующие компетенции:

1. Академические.

Специалист должен:

АК-1. Уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач.

АК-2. Владеть системным и сравнительным анализом.

АК-3. Владеть исследовательскими навыками.

АК-4. Уметь работать самостоятельно.

2. Профессиональные.

Специалист должен быть способен:

Научно-исследовательская деятельность

ПК-1. Определять проблемы в области наук о Земле и осуществлять постановку научных задач, представляющих как теоретический интерес, так и практическую значимость в области глобального и регионального природопользования.

ПК-2. Разрабатывать методические подходы, выбирать приборы и оборудование, картографические и справочные материалы и проводить научно-исследовательские работы в области наук о Земле.

ПК-3. Проводить анализ результатов полевых и экспериментальных исследований и измерений, оценивать их достоверность и осуществлять математическую обработку.

ПК-4. Формулировать из полученных полевых и экспериментальных результатов корректные выводы и давать рекомендации по их практическому применению.

Проектно-исследовательская деятельность

ПК-13 – Выполнять анализ и математическую обработку результатов полевых и экспериментальных исследований в области наук о Земле;

ПК-14 – Реализовывать на практике принципы и нормативы рационального природопользования;

Инновационная деятельность

ПК-36 – Готовить научные и учебно-методические доклады, материалы к мультимедийным презентациям на основе анализа информационных ресурсов, инновационных технологий, проектов и решений;

ПК-37 – Уметь работать с электронными географическими картами и атласами, учебно-справочной литературой;

ПК-38 – Знать современные проблемы природопользования, определять цели инновационной деятельности и способы их достижения.

Форма получения высшего образования – дневная, очная. Занятия проводятся в седьмом семестре на четвертом курсе.

Типовым учебным планом на изучение дисциплины для всех специальностей отводится 200 ч., в том числе 88 ч. аудиторных.

Примерное распределение учебного времени по семестру: 200 ч. общих, 88 ч. аудиторных; Примерное распределение аудиторного времени по видам занятий: 34 ч. лекций; 46 ч. Лабораторных; 8 ч. УСР.

Итоговый контроль знаний рекомендуется осуществлять в форме экзамена в 7-м семестре.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

1.1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ, АНАЛИЗА И ПРОГНОЗА ПОГОДЫ

1.1.1. Краткий исторический обзор развития методов анализа погодных условий

Современное развитие информационных технологий в той или иной степени затронуло практически все области научных исследований.

Внедрение метода вычислительного эксперимента в практику теоретических исследований и широкого спектра технологий обработки экспериментальных данных позволило решить принципиально новые задачи, а в ряде случаев привело и к возникновению новых предметных областей, существование которых было невозможно до появления компьютеров и развития информационных технологий (ИТ) данных технологий.

Развитие широкого класса современных теоретических и прикладных областей научного исследования, связанных с атмосферой, стало в полной мере возможно только благодаря появлению компьютерного моделирования атмосферных процессов. Примерами наиболее важных областей исследования, в которых компьютерное моделирование атмосферы играет основную роль, являются задачи численного прогноза погоды, изменения климата и вопросы, связанные с загрязнением атмосферы и других компонентов окружающей среды. Необходимость использования ИТ при этом обусловлена целым рядом причин:

- уравнения, описывающие различные процессы в атмосфере, не могут быть решены аналитически без использования численных методов.
- Моделирование атмосферных процессов связано с большим объёмом вычислений, зачастую требующим использования наиболее мощных суперкомпьютеров.
- единственными экспериментальными данными о состоянии атмосферы являются данные многочисленных наблюдений с помощью наземных станций, метеозондов, авиации, различных систем дистанционного зондирования на базе наземных радаров, лидаров и орбитальных спутников; усвоение такого обширного набора данных из различных источников невозможно без использования современных систем обработки, сбора и передачи информации.
- проведение моделирования подразумевает манипулирование значительными объёмами промежуточных данных и эффективный обмен результатами вычислений различных моделей между исследовательскими центрами;
- ряд задач, в особенности в области изучения регионального и глобального климата, геоэкологии и вариационного усвоения данных, связан с необходимостью поддержания огромных архивов данных, постоянный доступ к которым должен обеспечиваться из любой точки планеты.

На протяжении длительного времени исследования атмосферы носили исключительно качественный характер и основывались только лишь на данных немногочисленных наблюдений и гипотезах. Впоследствии, наблюдения стали носить систематический характер и уже в XIX веке в различных странах основываются первые метеорологические службы. Уже на раннем этапе исследований стало ясно, что в атмосферные процессы носят существенно неперiodический характер, что не позволяет напрямую предсказывать погодные условия в будущем с той же лёгкостью, как предсказываются морские приливы.

В 1860 году Уильям Феррель опубликовал серию статей, в которых математические методы впервые применялись при рассмотрении движений жидкости на вращающейся Земле. Работы Ферреля послужили стимулом к развитию физико-математической теории атмосферных движений, в настоящее время составляющей основу динамической метеорологии.

По-видимому, в 1904 году норвежский исследователь Вильгельм Бьёркнес наиболее полно выразил идею, что изменение состояния атмосферы во времени подчиняется основополагающим законам физики и для его прогнозирования достаточно системы нескольких базовых физических уравнений. В работе «Предсказание погоды как задача механики и физики» впервые явным образом утверждалось, что будущее состояние атмосферы, в принципе, полностью определяется её состоянием в настоящий момент времени (начальными условиями) и граничными условиями, в соответствии с законами физики (и представлениями детерминизма).

По мнению Бьёркнеса, состояние атмосферы описывается семью основными переменными: давлением, температурой, плотностью, влажностью и тремя компонентами скорости ветра. Изменение этих переменных с течением времени описывается уже известными уравнениями гидродинамики и термодинамики: уравнением непрерывности для воздуха (следствие закона сохранения вещества), тремя скалярными уравнениями Эйлера движения жидкой среды (на основе законов сохранения трёх компонент импульса и воздействия внешних сил в соответствии со вторым законом Ньютона), уравнением состояния идеального газа, первым началом термодинамики (то есть законом сохранения энергии) и уравнением сохранения воды во всех фазах.

В соответствии с этим задача метеорологического прогнозирования сводится к интегрированию системы основных уравнений. В то же время, Бьёркнес не верил в возможность их аналитического решения. Вместо этого он развивал методы графического исчисления, заключающиеся в применении физических принципов к метеорологическим диаграммам, построенным на основе наблюдений. Хотя некоторые точные решения системы уравнений движения атмосферы действительно могут быть получены и представляют интерес для теоретических исследований, в реальном моделировании атмосферы аналитическое решение уравнений неприменимо.

В 1922 году Льюис Фрай Ричардсон в монографии «Предсказание погоды с помощью численного процесса» предпринял первую смелую попытку численного решения системы метеорологических уравнений. Между 1913 и 1919 годами он разработал подход к решению уравнений движения атмосферы, заключающийся в разбиении интересующей пространственной области на прямоугольные параллелепипеды (ячейки сетки) и записи конечно-разностной формы уравнений. По аналогии с тем, как Карл Рунге и Вильгельм Кутта разработали метод численного решения обыкновенных дифференциальных уравнений, Ричардсон развил метод конечных разностей для решения уравнений в частных производных.

Вручную производя все необходимые вычисления, Ричардсон осуществил всеобъемлющее численное интегрирование полной системы уравнений на сетке с горизонтальным шагом 200 км и четырьмя изобарическими уровнями (с шагом 200 гПа) над территорией центральной Германии на основании данных наблюдений для 20 мая 1910 года. Полученный прогноз, однако, мало соответствовал реальности. Как впоследствии выяснилось, это было обусловлено несбалансированностью начальных условий и численной неустойчивостью, связанной с невыполнением условия Куранта-Фридрихса-Леви, связывающего пространственный шаг дискретизации с шагом интегрирования по времени. Решения системы уравнений движения атмосферы в исходном виде включает в себя и наиболее быстрые процессы — акустические волны, для адекватного моделирования которых временной шаг должен быть весьма малым. Необходимое количество вычислений было слишком велико для проведения исследований без возможности использования компьютеров. В совокупности с нехваткой данных наблюдений, это представлялось непреодолимым барьером на пути реализации мечты Ричардсона о том, что когда-либо станет возможным проводить интегрирование метеорологических уравнений с большей скоростью, нежели погодные процессы протекают в реальности. В течение нескольких десятилетий никто не осмеливался продолжить исследования в области численного прогноза погоды, а монография Ричардсона 1922 года подвергалась критике.

Ситуация коренным образом изменилась с появлением первых компьютеров. В 1946 году в рамках проекта по созданию первого цифрового электронного компьютера ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Calculator) Джон фон Нейман предложил сделать одним из его основных применений решение задачи численного прогноза погоды. Даже несмотря на использование компьютера, исходная задача Ричардсона была существенно упрощена: предварительно в 1948-49 годах Чарни и Эллиасен несколько изменили систему уравнений, исключив из её решений акустические волны и введя ряд дополнительных приближений. Таким образом, была разработана первая компьютерная модель атмосферы и на основании разработок 1948-49 годов Чарни, Фьёртофт и фон Нейман осуществили в 1950 первый успешный численный прогноз погоды. Вычисления проводились в рамках баротропной (содержащий по вертикали только один слой сетки) модели. Прогнозы 1950

года покрывали территорию Северной Америки двумерной расчётной сеткой, состоявшей из 270 узлов с шагом 700 км. Временной шаг составлял три часа. Хотя результаты прогноза и были далеки от идеальных, тем не менее, они оправдывали продолжение исследований.

Уже в 1951 году Чарни на основании всестороннего исследования пришёл к выводу, что использование в численном моделировании полной системы уравнений движения атмосферы в принципе возможно и, более того, позволит достигнуть более реалистичных результатов. Таким образом, необходимое количество приближений определяется исключительно доступными вычислительными ресурсами. Только в 1960-х модели, основанные на полной системе уравнений в формулировке Бьёркнеса и Ричардсона, пришли на смену баротропному и бароклинному приближению. Компьютерные модели атмосферы непрерывно развивались, и с ростом доступной вычислительной мощности становилось возможным использовать меньшее количество упрощений при формулировке системы уравнений.

1.1.2. Развитие и виды компьютерных моделей

Компьютерная модель атмосферы в широком смысле представляет собой программное представление динамических, физических, химических и радиационных процессов в атмосфере. Наряду с дифференциальными уравнениями, такое представление включает в себя также параметрические и эмпирические уравнения. Для широкого класса процессов величина используемого в конкретных вычислениях шага сетки не позволяет им адекватно воспроизводиться в процессе моделирования. В таком случае для их полноценного представления используются т. наз. «параметризации».

С развитием технологии атмосферного моделирования, круг воспроизводимых явлений и возможных приложений компьютерных моделей атмосферы постоянно растёт. С момента зарождения компьютерного моделирования атмосферы в 1948 году, компьютерные модели применялись в исследованиях погодных явлений, климата и вопросов, связанных с загрязнением атмосферы и окружающей среды в целом. Изначально метеорологические атмосферные модели использовались для прогнозирования погоды и изменений климата, в то время как в исследованиях в области химии и фотохимии атмосферы применялись собственные специфические компьютерные модели. И лишь в настоящее время разработаны наиболее общие программные системы, включающие в себя как динамическую метеорологию, так и атмосферную химию и позволяющие моделировать широкий спектр атмосферных явлений.

Цель разработки компьютерной модели атмосферы заключается с одной стороны в исследованиях с применением моделирования в направлении улучшения понимания физических, химических, динамических и радиационных процессов, а с другой стороны в улучшении качества моделирования для практического использования данной компьютерной модели в прогнозировании погоды и изменений климата и в других сферах.

1.2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОГОДЫ И КЛИМАТА

1.2.1. Атмосфера – предмет компьютерного моделирования

Атмосфера начала образовываться вместе с формированием Земли. В процессе эволюции планеты и по мере приближения ее параметров к современным значениям произошли принципиально качественные изменения ее химического состава и физических свойств. Согласно эволюционной модели, на раннем этапе Земля находилась в расплавленном состоянии и около 4,5 млрд. лет назад сформировалась как твердое тело. Этот рубеж принимается за начало геологического летоисчисления. С этого времени началась медленная эволюция атмосферы. Некоторые геологические процессы, (например, излияния лавы при извержениях вулканов) сопровождались выбросом газов из недр Земли. В их состав входили азот, аммиак, метан, водяной пар, оксид СО и диоксид СО₂ углерода. Под воздействием солнечной ультрафиолетовой радиации водяной пар разлагался на водород и кислород, но освободившийся кислород вступал в реакцию с оксидом углерода, образуя углекислый газ. Аммиак разлагался на азот и водород. Водород в процессе диффузии поднимался вверх и покидал атмосферу, а более тяжелый азот не мог улечься и постепенно накапливался, становясь основным компонентом, хотя некоторая его часть связывалась в молекулы в результате химических реакций. Под воздействием ультрафиолетовых лучей и электрических разрядов смесь газов, присутствовавших в первоначальной атмосфере Земли, вступала в химические реакции, в результате которых происходило образование органических веществ, в частности аминокислот. С появлением примитивных растений начался процесс фотосинтеза, сопровождавшийся выделением кислорода. Этот газ, особенно после диффузии в верхние слои атмосферы, стал защищать ее нижние слои и поверхность Земли от опасных для жизни ультрафиолетового и рентгеновского излучений. Согласно теоретическим оценкам, содержание кислорода, в 25 000 раз меньшее, чем сейчас, уже могло привести к формированию слоя озона со всего лишь вдвое меньшей, чем сейчас, концентрацией. Однако этого уже достаточно, чтобы обеспечить весьма существенную защиту организмов от разрушительного действия ультрафиолетовых лучей.

В зависимости от распределения температуры атмосферу Земли подразделяют на тропосферу, стратосферу, мезосферу, термосферу и экзосферу. Давление и плотность воздуха в атмосфере Земли с высотой убывают.

Модель, соответствующая стандартным давлению у основания атмосферы P_0 и химическому составу, называется стандартной атмосферой. Точнее, это условная модель атмосферы, для которой заданы средние для значения температуры, давления, плотности, вязкости и др. характеристик воздуха на высотах от 2 км ниже уровня моря до внешней границы земной атмосферы. Параметры средней атмосферы на всех высотах рассчитаны по уравнению состояния идеального газа и барометрическому закону в предположении, что на

уровне моря давление равно 1013,25 гПа (760 мм рт. ст.), а температура 288,15 К (15,0° С). По характеру вертикального распределения температуры средняя атмосфера состоит из нескольких слоев, в каждом из которых температура аппроксимирована линейной функцией высоты. В самом нижнем из слоев – тропосфере температура падает на 6,5° С каждым километром подъема. На больших высотах значение и знак вертикального градиента температуры меняются от слоя к слою. Выше 790 км температура составляет около 1000 К и практически не меняется с высотой.

Стандартная атмосфера является периодически уточняемым, узаконенным стандартом. Самый нижний и наиболее плотный слой атмосферы, в котором температура быстро уменьшается с высотой, называется тропосферой. Он содержит до 80% всей массы атмосферы и простирается в полярных и средних широтах до высот 8–10 км, а в тропиках до 16–18 км. Здесь развиваются практически все погодообразующие процессы, происходит тепловой- и влагообмен между Землей и ее атмосферой, образуются облака, возникают различные метеорологические явления, возникают туманы и осадки. Эти слои земной атмосферы находятся в конвективном равновесии и, благодаря активному перемешиванию имеют однородный химический состав, в основном, из молекулярного азота (78%) и кислорода (21%). В тропосфере сосредоточено подавляющее количество природных и техногенных аэрозольных и газовых загрязнителей воздуха. Динамика нижней части тропосферы толщиной до 2 км сильно зависит от свойств подстилающей поверхности Земли, определяющей горизонтальные и вертикальные перемещения воздуха (ветры), обусловленные передачей тепла от более нагретой суши, через ИК-излучение земной поверхности, которое поглощается в тропосфере, в основном, парами воды и углекислого газа (парниковый эффект). Распределение температуры с высотой устанавливается в результате турбулентного и конвективного перемешивания. В среднем оно соответствует падению температуры с высотой примерно на 6,5 К/км. Скорость ветра в приземном пограничном слое сначала быстро растет с высотой, а выше она продолжает увеличиваться на 2–3 км/с на каждый километр. Иногда в тропосфере возникают узкие планетарные потоки (со скоростью более 30 км/с), западные в средних широтах, а вблизи экватора – восточные. Их называют струйными течениями. У верхней границы тропосферы (тропопаузы) температура достигает минимального значения для нижней атмосферы. Это переходный слой между тропосферой и расположенной над нею стратосферой. Толщина тропопаузы от сотен метров до 1,5–2 км, а температура и высота соответственно в пределах от 190 до 220 К и от 8 до 18 км в зависимости от географической широты и сезона. В умеренных и высоких широтах зимой она ниже, чем летом на 1–2 км и на 8–15 К теплее. В тропиках сезонные изменения значительно меньше (высота 16–18 км, температура 180–00 К). Над струйными течениями возможны разрывы тропопаузы. Важнейшей особенностью атмосферы Земли является наличие значительного количества водяных паров и воды в капельной форме, которую легче всего наблюдать в виде облаков и облачных структур. Степень покрытия

неба облаками (в определенный момент или в среднем за некоторый промежуток времени), выраженная в 10-балльной шкале или в процентах, называют облачностью. Форма облаков определяется по международной классификации. В среднем, облака покрывают около половины земного шара. Облачность – важный фактор, характеризующий погоду и климат. Зимой и ночью облачность препятствует понижению температуры земной поверхности и приземного слоя воздуха, летом и днем – ослабляет нагревание земной поверхности солнечными лучами, смягчая климат внутри материков. Через тропопаузу, в среднем на высотах от 12 до 50 км, тропосфера переходит в стратосферу. В нижней части, на протяжении около 10 км, т.е. до высот около 20 км, она изотермична (температура около 220 К). Затем она растет с высотой, достигая максимума около 270 К на высоте 50–55 км. Здесь находится граница между стратосферой и выше лежащей мезосферой, называемая стратопаузой.

В стратосфере значительно меньше водяных паров. Все же иногда наблюдаются – тонкие просвечивающие перламутровые облака, изредка возникающие в стратосфере на высоте 20–30 км. Перламутровые облака видны на темном небе после захода и перед восходом Солнца. По форме перламутровые облака напоминают перистые и перисто-кучевые облака.

На высоте около 50 км с пика широкого температурного максимума начинается мезосфера. Причиной увеличения температуры в области этого максимума является экзотермическая фотохимическая реакция разложения озона. Озон возникает в результате фотохимического разложения молекулярного кислорода O_2 . В целом, на всем протяжении мезосферы температура атмосферы уменьшается до минимального ее значения около 180 К на верхней границе мезосферы (называемой мезопауза, высота около 80 км). В окрестности мезопаузы, на высотах 70–90 км, может возникать очень тонкий слой ледяных кристаллов и частиц вулканической и метеоритной пыли, наблюдаемый в виде красивого зрелища серебристых облаков вскоре после захода Солнца. В мезосфере большей частью сгорают попадающие на Землю мелкие твердые метеоритные частицы, вызывающие явление метеоров.

Современная климатология стремится показать именно атмосферные процессы в их связи с географической обстановкой. При этом приходится для их иллюстрации пользоваться примерами, накопленными старой климатологией, рассматривавшей следующие - основные метеорологические элементы:

- 1) атмосферное давление;
- 2) температуру воздуха, характеризующую его тепловое состояние;
- 3) влажность воздуха;
- 4) воздушные течения, рассматриваемые по величине скорости воздуха и по направлению;
- 5) видимость, или прозрачность, атмосферы;
- 6) облачность и осадки в твердом и жидком состоянии.

Существует три основных цикла атмосферных процессов, определяющих климат. Это так называемые климатообразующие процессы - теплооборот, влагооборот и атмосферная циркуляция.

Теплооборот

Сквозь атмосферу проходит поток солнечной радиации. Атмосфера частично поглощает солнечные лучи, преобразуя их энергию в теплоту; частично рассеивает их, меняя по качеству (спектральному составу); частично они отражаются назад облаками.

Радиация, прошедшая сквозь атмосферу (отчасти и рассеянная атмосферой), падая на земную поверхность, частично от нее отражается, но в большей части поглощается ею и нагревает верхние слои почвы и водоемов. Земная поверхность сама испускает невидимую инфракрасную радиацию, которая в большей части поглощается атмосферой и нагревает ее. Атмосфера, в свою очередь, излучает инфракрасную радиацию, большая часть которой поглощается земной поверхностью. В то же время земная и атмосферная радиация непрерывно уходит за пределы атмосферы вместе с отраженной солнечной радиацией, уравнивая приток солнечной радиации к Земле.

Кроме обмена тепла путем излучения, между земной поверхностью и атмосферой происходит обмен тепла путем теплопроводности. В передаче тепла внутри атмосферы особенно важную роль играет перемешивание воздуха в вертикальном направлении. Значительная часть тепла, поступающего на земную поверхность, затрачивается еще на испарение воды, переходя в скрытую форму. Потом, при сгущении водяного пара в атмосфере, это тепло, выделяясь, идет на нагревание воздуха.

Температура воздуха, постоянно ощущаемая как тепло или холод, имеет важнейшее значение для жизни на Земле вообще, для жизни и хозяйственной деятельности. Температура воздуха меняется в течении суток и в течении года в зависимости от вращения Земли и связанных с ним изменений в притоке солнечной радиации. Она меняется и нерегулярно, в связи с воздушными течениями, направленными из одних мест Земли в другие. Распределение температуры воздуха по Земному шару в основном зависит от общих условий притока солнечной радиации по широтам, от распределения суши и моря, которые по-разному поглощают радиацию и по-разному нагреваются, и, от воздушных течений, переносящих воздух из одних областей Земли в другие.

Влагооборот

Между атмосферой и земной поверхностью происходит постоянный оборот воды, или влагооборот. С поверхности океанов и других водоемов, влажной почвы и растительности в атмосферу испаряется вода, на что затрачивается большое количество тепла из почвы и верхних слоев воды. Водяной пар - вода в газообразном состоянии - является важной составной частью атмосферного воздуха.

При существующих в атмосфере условиях водяной пар может испытывать и обратное преобразование: он конденсируется, сгущается, вследствие чего возникают облака и туманы. В процессе конденсации в атмосфере

освобождаются большие количества скрытого тепла. Из облаков при определенных условиях выпадают осадки. Возвращаясь на земную поверхность, осадки тем самым уравнивают испарение в целом для всего Земного шара.

Количество выпадающих осадков и его распределение по сезонам влияют на растительный покров и земледелие. От распределения и колебания количества осадков зависят также условия стока, режим рек, уровень озер и другие гидрологические явления. От большей или меньшей высоты снежного покрова зависят промерзание почвы и режим вечной мерзлоты.

Атмосферная циркуляция

Неравномерное распределение тепла в атмосфере приводит к неравномерному распределению атмосферного давления, а от распределения давления зависит движение воздуха, или воздушные течения.

На характер движения воздуха относительно земной поверхности важное влияние оказывает тот факт, что движение это происходит на вращающейся Земле. В нижних слоях атмосферы на движение воздуха также влияет трение. Движение воздуха относительно земной поверхности называют ветром, всю систему воздушных течений на Земле - общей циркуляцией атмосферы. Вихревые движения крупного масштаба - циклоны и антициклоны, постоянно возникающие в атмосфере, делают эту систему особенно сложной.

С перемещениями воздуха в процессе общей циркуляции связаны основные изменения погоды: воздушные массы, перемещаясь из одних областей Земли в другие, приносят с собой новые условия температуры, влажности, облачности и пр.

Кроме общей циркуляции атмосферы, существуют местные циркуляции: бризы, горно-долинные ветры и др.; возникают также сильные вихри малого масштаба - смерчи, тромбы.

Ветер вызывает волнение водных поверхностей, многие океанические течения, дрейф льдов; он является важным фактором эрозии и рельефообразования.

Активные воздействия на атмосферные процессы

Большое научное и практическое значение имеет проблема активных воздействий на атмосферные процессы с целью изменения погоды и климата. Работы в этом направлении, впервые (в 50-х гг.) начатые в Советском Союзе, уже привели к созданию методов воздействия на некоторые атмосферные процессы. Так, в частности, рассеяние в облаках некоторых реагентов изменяет развитие грозных облаков и предотвращает выпадение града, который приносит большие убытки сельскому хозяйству. Разработаны методы рассеяния туманов, защиты растений от заморозков, ведутся экспериментальные работы по воздействию на облака для увеличения количества осадков. Большинство применяемых сейчас методов воздействия на атмосферные процессы основано на возможностях управления неустойчивыми процессами, динамика которых может быть изменена при затратах сравнительно небольших количеств энергии и реагентов.

1.2.2. Понятие погоды и климата для численного анализа атмосферных процессов

Погода и климат – природные факторы, под воздействием которых произошло формирование человека. Они постоянно и разнообразно влияют на жизнь отдельного человека и всего человечества, определяют физическое и психическое состояние организма, потребность в жилье и одежде, пище, топливе, средствах передвижения и т. п.

Погода – это состояние атмосферы в определенный отрезок времени (в данную минуту, день, месяц, сезон), характеризующееся совокупностью метеорологических величин (температура, влажность, давление, скорость ветра и т. д.) и явлений (туман, гололед, метель, буря, смерч и т. д.). Главной особенностью погоды является ее изменчивость, неустойчивость.

Климат планеты зависит от целого комплекса внешних и внутренних факторов. Большинство внешних факторов влияют на суммарное количество солнечной радиации, получаемой планетой, а также её распределение по сезонам, полушариям и континентам.

Внешние факторы:

- параметры земной орбиты и оси
- расстояние между Землёй и Солнцем — определяет количество солнечной энергии, получаемой Землёй.
- наклон оси вращения Земли к плоскости орбиты — определяет сезонные изменения.
- эксцентриситет орбиты Земли — влияет на распределение тепла между Северным и Южным полушарием, а также на сезонные изменения.
- циклы Миланковича — в ходе своей истории планета Земля регулярно изменяет эксцентриситет своей орбиты, а также направление и угол наклона своей оси. Эти изменения принято называть «циклы Миланковича».

Различают 4 цикла Миланковича:

Прецессия — поворот земной оси под влиянием притяжения Луны, а также (в меньшей степени) Солнца. Как выяснил Ньютон в своих «Началах», сплюснутость Земли у полюсов приводит к тому, что притяжение внешних тел поворачивает земную ось, которая описывает конус с периодом (по современным данным) примерно 25 776 лет, в результате которого меняется сезонная амплитуда интенсивности солнечного потока на северном и южном полушариях Земли;

Нутация – долгопериодические (так называемые вековые) колебания угла наклона земной оси к плоскости её орбиты с периодом около 41 000 лет;

Долгопериодические колебания эксцентриситета орбиты Земли с периодом около 93 000 лет.

Перемещение перигелия орбиты Земли и восходящего узла орбиты с периодом соответственно 10 и 26 тысяч лет.

Климат – многолетний режим погоды, одна из основных географических характеристик той или иной местности. Климат в данной местности складывается в результате многообразного влияния климатообразующих

факторов (географическая широта и долгота, состояние циркуляции атмосферы, солнечная радиация, рельеф местности и характер подстилающей поверхности).

1.2.3. Физические основы численного моделирования атмосферных процессов

В моделях погоды используется системы, включающие большое количество математических уравнений, необходимых для вычисления возможного поведения атмосферы и океанов. Одни из них описывают воздушные потоки, другие — образование, движение и исчезновение облаков всех типов и вероятность выпадения дождя, снега или града. В уравнениях должно учитываться множество переменных, которые влияют на формирование погоды. Только с помощью компьютерного моделирования циркуляции всей атмосферы Земли с учетом всех остальных (оптических, аэрозольных, химических и т. д.) процессов, влияющих на нее, можно решить задачи моделирования климата и прогноза погоды.

Метеорологические процессы протекают в соответствии с фундаментальными законами физики, поэтому гидрология широко использует сформулированные в классической физике (при скоростях движения, намного уступающих скорости света) законы сохранения вещества, тепловой и механической энергии, количества движения. К основным физическим законам численного моделирования атмосферных процессов относятся: закон сохранения вещества, закон сохранения энергии, закон сохранения механической энергии, закон сохранения количества движения (импульса).

Закон сохранения массы — закон физики, согласно которому масса физической системы сохраняется при всех природных и искусственных процессах. Закон сохранения энергии — фундаментальный закон природы, установленный эмпирически и заключающийся в том, что для изолированной физической системы может быть введена скалярная физическая величина, являющаяся функцией параметров системы и называемая энергией, которая сохраняется с течением времени. Поскольку закон сохранения энергии относится не к конкретным величинам и явлениям, а отражает общую, применимую везде и всегда закономерность, его можно именовать не законом, а принципом сохранения энергии. Если тела, составляющие замкнутую механическую систему, взаимодействуют между собой только посредством сил тяготения и упругости, то работа этих сил равна изменению потенциальной энергии тел, взятому с противоположным знаком. Закон сохранения импульса (закон сохранения количества движения) — закон, утверждающий, что сумма импульсов всех тел системы есть величина постоянная, если векторная сумма внешних сил, действующих на систему тел, равна нулю.

Природные среды получают энергию от Солнца в виде оптического излучения. Энергия оптических квантов превращается затем в механическую энергию движущихся масс, в потоки явной и скрытой теплоты, в химическую, электрическую и другие формы энергии. "Излишки" энергии отдаются Землей в космическое пространство в форме длинноволнового (инфракрасного) электромагнитного излучения. Новые структуры в сложных

самоорганизующихся системах образуются в результате действия многочисленных обратных связей, как отрицательных (они гасят постоянно возникающие возмущения), так и положительных. Последние приводят к росту возмущений, которые затем могут перерасти в новые структуры.

1.3. ОРБИТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ, ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

1.3.1. Дистанционные методы зондирования Земли

Дистанционное зондирование является методом получения информации об объекте или явлении без непосредственного физического контакта с данным объектом. Дистанционное зондирование является подразделом географии. В современном понимании, термин в основном относится к технологиям воздушного или космического зондирования местности с целью обнаружения, классификации и анализа объектов земной поверхности, а также атмосферы и океана, при помощи распространяемых сигналов (например, электромагнитной радиации). Разделяют на активное (сигнал сначала излучается самолётом или космическим спутником) и пассивное дистанционное зондирование (регистрируется только сигнал естественных источников, например, солнечный свет).

Пассивные сенсоры дистанционного зондирования регистрируют сигнал, излучаемый или отраженный объектом либо прилегающей территорией. Отраженный солнечный свет – наиболее часто используемый источник излучения, регистрируемый пассивными сенсорами. Примерами пассивного дистанционного зондирования являются цифровая и пленочная фотография, применение инфракрасных, приборов с зарядовой связью и радиометров.

Активные приборы, в свою очередь, излучают сигнал с целью сканирования объекта и пространства, после чего сенсор имеет возможность обнаружить и измерить излучение, отраженное или образованное путём обратного рассеивания целью зондирования. Примерами активных сенсоров дистанционного зондирования являются радар и лидар, которыми измеряется задержка во времени между излучением и регистрацией возвращенного сигнала, таким образом определяя размещение, скорость и направление движения объекта.

Дистанционное зондирование предоставляет возможность получать данные об опасных, труднодоступных и быстро движущихся объектах, а также позволяет проводить наблюдения на обширных участках местности. Примерами применения дистанционного зондирования может быть мониторинг вырубки лесов (например, в бассейне Амазонки), состояния ледников в Арктике и Антарктике, измерение глубины океана с помощью лота. Дистанционное зондирование также приходит на замену дорогостоящим и сравнительно медленным методам сбора информации с поверхности Земли, одновременно гарантируя невмешательство человека в природные процессы на наблюдаемых территориях или объектах.

При помощи орбитальных космических аппаратов ученые имеют возможность собирать и передавать данные в различных диапазонах электромагнитного спектра, которые, в сочетании с более масштабными воздушными и наземными измерениями и анализом, обеспечивают необходимый спектр данных для мониторинга актуальных явлений и тенденций, таких как Эль-Ниньо и другие природные феномены, как в кратко-, так и в долгосрочной перспективе. Дистанционное зондирование также имеет прикладное значение в сфере геонаук (к примеру, природопользование), сельском хозяйстве (использование и сохранение природных ресурсов), национальной безопасности (мониторинг приграничных областей).

Рынок дистанционного зондирования Земли считается одним из самых быстрорастущих в мире. Новые компании, технологии, услуги и сервисы появляются каждый год. Большие перспективы связаны с использованием беспилотных аппаратов, лидаров, микроспутников.

1.3.2. Техники получения данных

Основная цель мультиспектральных исследований и анализа полученных данных – это объекты и территории, излучающие энергию, что позволяет выделять их на фоне окружающей среды.

Как правило, лучшим временем для получения данных методами дистанционного зондирования является летнее время (в частности, в эти месяцы наибольший угол солнца над горизонтом и наибольшая длительность дня). Исключением из этого правила является получение данных с помощью активных датчиков (например, Радар, Лидар), а также тепловых данных в длинноволновом диапазоне. В тепловидении, при котором датчики проводят измерения тепловой энергии, лучше использовать промежуток времени, когда разница температуры земли и температуры воздуха наибольшая. Таким образом, лучшее время для этих методов — холодные месяцы, а также несколько часов до рассвета в любое время года.

Кроме того, есть ещё некоторые соображения, которые нужно учитывать. С помощью радара, например, нельзя получать изображение голой поверхности земли при толстом снежном покрове; то же самое можно сказать и о лидаре. Тем не менее, эти активные сенсоры нечувствительны к свету (или его отсутствию), что делает их отличным выбором для применения в высоких широтах. Кроме того, как радар, так и лидар способны (в зависимости от используемых длин волн) получать изображения поверхности под пологом леса, что делает их полезными для применения в сильно заросших регионах. С другой стороны, спектральные методы получения данных (как стереоизображения, так и мультиспектральные методы) применимы в основном в солнечные дни; данные, собранные в условиях низкой освещенности, как правило, имеют низкий уровень сигнала/шума, что усложняет их обработку и интерпретацию. К тому же, в то время как стереоизображения способны отображать и идентифицировать растительность и экосистемы, при помощи этого метода невозможно проникнуть под навес деревьев и получить изображения земной поверхности.

В последнее время активно развивается направление по использованию спутников для наблюдения метеорологических явлений в атмосфере. Появился отдельный класс орбитальных систем и группировок спутников, решающих метеорологические задачи, включая задачи кратковременного прогноза опасных атмосферных процессов – «наукастинга».

Метеорологические спутниковые системы – это аппаратные комплексы, включающие орбитальные космические группировки ИЗС, предназначенные для дистанционного зондирования атмосферы и поверхности Земли с целью получения метеорологической и климатической информации, наземные станции для управления ИЗС, получения, обработки и хранения спутниковой информации.

Основные задачи, решаемые с помощью метеорологических спутниковых систем:

- Контроль за состоянием атмосферы и поверхности, в частности, обнаружение опасных погодных явлений, стихийных бедствий и катастроф.
- Осуществление прогнозов погоды различной долговременности.
- Исследования климата Земли и прогноз его возможных изменений.
- Научно-исследовательские задачи в области физики атмосферы, метеорологии и климатологии (исследование облачности, барических образований, струйных течений, верхней атмосферы, солнечно-земных связей и др.)

- Космические аппараты, входящие в метеокомплексы, делятся на два типа по параметрам орбиты и, соответственно, по назначению:

- Геостационарные – орбиты для которых угловая скорость движения спутника совпадает со скоростью вращения Земли. Особенности: плоскость орбиты спутника совпадает с экваториальной плоскостью, радиус орбиты 36 тыс. км, спутник находится все время над одной точкой Земной поверхности и зона его наблюдения ограничена пределами 50° СШ – 50° ЮШ, для такого спутника трудно обеспечить высокое разрешение аппаратуры, это, как правило, спутники связи, но есть геостационарные спутники наблюдения за погодой и облачностью.

- Геополярные – угол наклона орбиты близок к 90°, т.е. орбита практически перпендикулярна плоскости экватора. Радиус орбиты порядка 1 тыс. км. Такие спутники относятся к низкоорбитальным системам. Особенности: спутник через определенный промежуток времени, зависящий от ширины полосы обзора, оказывается над районом наблюдения – сеансы наблюдения одних и тех же областей поверхности обычно проходят в различное местное время при разных условиях освещения солнцем, что сильно затрудняет сопоставление данных, поэтому такие спутники выводят, как правило, на «солнечно синхронные» орбиты, при этом выгоднее, чтобы восходящее движение спутника походило над теневой, а нисходящее над освещенной стороной земной поверхности.

ВАЖНО ПОМНИТЬ!

– Запуск геостационарных спутников производится в экваториальной плоскости, в направлении вращения Земли на высоту 36 786 км над уровнем моря. При этом их угловая скорость соответствует скорости вращения планеты. Имея такие орбитальные характеристики, спутники этого типа находятся всегда над одной точкой, если не учитывать колебания и «дрейф», вызванные погрешностями при выводе на орбиту и гравитационными аномалиями. Они постоянно наблюдают одну область, составляющую около 42 % земной поверхности – немного меньше, чем полушарие. Эти спутники не позволяют наблюдать области самых высоких широт и не дают детального изображения, зато предоставляют возможность непрерывного слежения за обстановкой в крупных регионах.

– Полярные спутники движутся по гораздо более низким орбитам – от 850 до 1000 км, вследствие чего не обеспечивают широкого охвата наблюдаемой территории. Однако орбиты их обязательно проходят над полюсами Земли, и один спутник такого типа способен за определенное количество витков «снять» всю поверхность планеты узкими (около 2500 км) полосами с хорошим разрешением. При одновременной работе двух спутников, находящихся на солнечно-синхронных полярных орбитах, обзор каждого района производится с интервалом 6 часов.

Как правило, метеоспутники несут в составе своего аппаратного комплекса два типа приборов:

– Обзорные. С их помощью получают телевизионные и фотоизображения поверхности суши и океанов, облачного, снежного и ледового покрова. В числе этих приборов – не менее двух устройств многозональной съемки в различных диапазонах спектра (видимом, микроволновом, инфракрасном). Они производят съемку с разным разрешением. Спутники также оснащаются установкой радарного сканирования поверхности.

– Измерительные. Посредством приборов этого типа спутник собирает количественные характеристики, отражающие состояние атмосферы, гидросферы и магнитосферы. К таким характеристикам относятся температура, влажность, радиационная обстановка, текущие параметры геомагнитного поля и т. д.

– Срок действия спутников ограничен и зависит от высоты его орбиты и установленной на нем аппаратуры.

– Низкоорбитальные спутники, испытывающие влияние земной атмосферы, требуют постоянной коррекции орбиты и срок их службы определяется запасом необходимого для этой цели топлива. Обычно применяемые космические жидкостные реактивные двигатели работают на маловодной перекиси водорода (концентрацией около 90%) или гидразине, разлагающихся в камере ЖРД в присутствии катализатора; образующийся высокотемпературный газ при истечении из сопла создает тягу. Запаса топлива может хватить на 10-15 лет, если коррекция проводится не слишком часто.

Высокоорбитальным спутникам также требуется коррекция орбиты из-за влияния гравитационного поля Солнца, Луны и других планет.

- Основное сокращение срока службы спутника происходит из-за разрушения приборов интенсивным электромагнитным и корпускулярным излучением Солнца. Частичная потеря качества отдельных приборов становится заметной уже после 5 лет эксплуатации.

- Спутник может работать как в режиме запоминания информации с последующей передачей пакета данных на наземный комплекс приема и обработки, так и вести непосредственную прямую передачу. Получаемые наземным комплексом спутниковые данные подвергаются дешифрированию, в ходе которого осуществляется привязка информации по времени и картографическим координатам. Затем данные с разных космических аппаратов объединяются и подвергаются дообработке с созданием наглядно воспринимаемых изображений.

Использование орбитальных наблюдений метеопараметров:

- Видимые и инфракрасные изображения поверхности Земли и атмосферы используются для получения данных о векторах ветра, которые усваиваются моделями численного прогноза погоды (ЧПП).

- Видимые и инфракрасные изображения используются для определения основных параметров облачности, характеристики барических образований, опасных атмосферных явлений и т.п.

- Вертикальные профили температуры и влажности в атмосфере, получаемые по данным атмосферных ИК и СВЧ зондировщиков, усваиваются в схемах ЧПП.

- Спутниковые оценки вертикального распределения концентрации озона в атмосфере дополняют данные озонзондов и также усваиваются в современных схемах ЧПП.

- Карты температуры поверхности океана по спутниковым данным используются при составлении сезонных прогнозов, особенно в тропических зонах, а также для оценки климатических трендов.

- Данные о ветре над океанической поверхностью (скорость и направление приводного ветра) используются при решении многих задач метеорологии, включая определение центров ураганов, изучение процессов, связанных с межсезонными изменениями климата (например, явления Эль-Ниньо).

Весьма перспективным является направление использования орбитальных наблюдений для валидации результатов численного моделирования и прогноза метеорологических явлений, в также верификации используемых численных моделей.

1.4. ВИДЫ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ. МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ РАЗЛИЧНЫХ МАСШТАБОВ

1.4.1. Виды численных моделей атмосферы

Численное моделирование процессов в атмосфере, океане и криосфере стало в настоящее время основным инструментом исследования изменений погоды и климата. Глобальные и региональные гидродинамические модели общей циркуляции атмосферы и океана успешно используются в научных центрах разных стран мира в целях прогноза погоды и изучения предполагаемых изменений климата в ближайшие десятилетия под воздействием естественных и антропогенных факторов. Для развития и совершенствования моделей и методов исследований организован ряд международных программ, проводимых под эгидой ВМО, ЮНЕП и других международных организаций. В 1975 году в отделе динамической метеорологии ГГО была разработана полусферная трехуровневая конечно-разностная модель атмосферы, в которой были учтены основные физические процессы, формирующие термодинамический режим атмосферы. С помощью этой модели был выполнен ряд исследований по влиянию различных естественных и антропогенных факторов на климатический режим отдельных регионов Северного полушария. Следующим этапом развития численного моделирования в ГГО явилось создание в 1983 г. глобальной спектральной пятиуровневой модели общей циркуляции атмосферы, в которой были применены более совершенные методы параметризации основных климатообразующих процессов, по сравнению с применявшимися ранее в конечно-разностной модели. В дальнейшем модель непрерывно развивалась в направлении увеличения ее пространственного разрешения и совершенствования схем параметризации физических процессов с учетом новых данных об атмосфере и подстилающей поверхности и результатов международных сравнений различных моделей атмосферы. На этой основе к 1993 г. был создан базовый вариант модели T30L14. Эта модель (в дальнейшем именуемая MGO-1), имеющая среднее разрешение по горизонтали в 300 км и включающая 14 слоев в атмосфере, три слоя в почве и верхний квазиоднородный слой океана, активно использовалась для исследования короткопериодных исследований климата и разработки ансамблевых методов оперативного долгосрочного прогноза погоды на сроки до одного месяца. С целью уменьшения систематических погрешностей, присущих многим моделям атмосферы и выявившихся в процессе участия этих моделей в международном проекте сравнения глобальных моделей общей циркуляции атмосферы AMIP, в котором принимала участие и модель ГГО, в эту модель был внесен ряд усовершенствований в схемы расчета облачности и механизмов ее взаимодействия с радиационными потоками в атмосфере. Организация следующего этапа международной программы AMIP II и инициализация в его рамках ряда важных проектов по диагностике современного климата, а также разработка в ГГО технологического модуля оперативной модели гидродинамического прогноза погоды и проведение исследований по

предполагаемым антропогенным изменениям климата в 21 веке привели к необходимости дальнейшего развития глобальных моделей, а получение архивов более точных и общедоступных климатологических данных, в частности, полученных на основе реанализа данных наблюдений дало возможность существенного усовершенствования ряда блоков модели путем учета в них новых существенных физических факторов. Это касается, в первую очередь, расчета гидрологического цикла и процессов на поверхности почвы с учетом растительного и снежного покровов. Быстрое развитие вычислительных ресурсов дало возможность также увеличить разрешение модели и с применением новых методов параметризации климатообразующих физических процессов разработать новую версию глобальной модели общей циркуляции атмосферы GTOMGO-2.

Численный прогноз погоды использует компьютерную математическую модель атмосферы для составления прогноза погоды. Хотя первые попытки использовать математические модели для прогнозирования погоды были сделаны в 20-х годах XX века, только с изобретением компьютера и компьютерного моделирования стало возможным осуществлять его в режиме реального времени. Данный процесс связан с обработкой огромного набора данных и выполнением сложных вычислений и может быть полноценно осуществлен только на мощных суперкомпьютерах. В основе моделей лежат математические уравнения, описывающие аэро- и термодинамические процессы в атмосфере и связывающие такие параметры как плотность, скорость, давление и температуру. Эти уравнения являются нелинейными и не имеют точного решения, поэтому для их решения используются численные методы. Исходные уравнения дискретизируются во времени и пространстве и превращаются в систему линейных уравнений, связывающую наборы физических параметров в выбранных точках (узлах вычислительной сетки). Чем больше используется точек для расчета, тем выше точность модели, но и тем выше требования к вычислительным мощностям ЭВМ. В качестве исходных данных для моделей используются данные метеозондов, метеоспутников и наземных метеостанций.

Выделяют следующие типы моделей: модели, в основе которых – статистические данные, иначе их называют системы черных ящиков. В них исследуются данные с применением математического и статистического инструментов, на вход подаются показатели, на выходе получают поведение системы, зависимости, законы, описывающие изучаемое явление. Исследование с помощью метода «черного ящика» заключается в том, что осуществляется предварительное наблюдение за взаимодействием системы с внешней средой и установление списка входных и выходных воздействий, среди которых выделяются существенные воздействия. Затем осуществляется выбор входов и выходов для исследования с учетом имеющихся средств воздействия на систему и средств наблюдения за ее поведением. На следующем этапе производятся воздействия на входы системы и регистрация ее выходов. В процессе изучения наблюдатель и «черный ящик» образуют систему с обратной

связью, а первичные результаты исследования – множество пар состояний входа и выхода, анализ которых позволяет установить между ними причинно-следственную связь. В настоящее время известны два вида «черных ящиков». К первому виду относят любой «черный ящик», который может рассматриваться как автомат, называемый конечным или бесконечным. Поведение таких «черных ящиков» известно. Ко второму виду относятся такие «черные ящики», поведение которых может быть наблюдаемо только в эксперименте. В таком случае в явной или неявной форме высказывается гипотеза о предсказуемости поведения «черного ящика» в вероятностном смысле. Без предварительной гипотезы невозможно любое обобщение или, как говорят, невозможно сделать индуктивное заключение на основе экспериментов с «черным ящиком». Категория динамических гидрологических моделей очень широка и охватывает полный спектр подходов. Крайними из них являются, с одной стороны, полностью эмпирические подходы типа «черного ящика», не предназначенные для моделирования процессов, происходящих внутри бассейна и определяющих его реакцию, а устанавливающие соответствие потока на входе в бассейновую систему и выходе из нее. Особой категорией моделей типа «черный ящик» являются искусственные нейронные сети. С другой стороны — подходы, предусматривающие решение сложных систем уравнений, базирующихся на физических закономерностях и теоретических концепциях, определяющих гидрологические процессы — так называемые «гидродинамические модели».

Второй тип моделей строится на основе уже известных науке законов, вначале модель может разрабатываться на произвольном наборе данных, затем уже изучать реальные процессы. Эти модели можно использовать для прогноза, задавая на входе возможные значения параметров, получать на выходе отклик системы. Модели с сосредоточенными параметрами имеют постоянные параметры, которые не меняются в пространстве и, как правило, описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями, в то время как параметры моделей с распределенными параметрами, физическая сущность которых описываются дифференциальными уравнениями в частных производных, могут изменяться в пространстве.

Статистическое моделирование — исследование объектов познания на их статистических моделях. Статистические модели необходимы для теоретического изучения влияния флуктуаций, шумов и т.п. на процессы. При учёте случайных процессов движение системы будет подчиняться уже не динамическим законам, а законам статистики. В соответствии с этим могут быть поставлены вопросы о вероятности того или иного движения, о наиболее вероятных движениях и о других вероятностных характеристиках поведения системы». Ввиду того, что реализация прогностических моделей производится в основном численными методами, этот подход получил название численного прогноза погоды (Numerical Weather Prediction, NWP). Численный прогноз является достаточно успешным, в связи с чем современные службы погоды полностью доверяются его моделям. Одно из направлений использования

статистических методов связано с обслуживанием моделей численного прогноза погоды. Сюда относятся статистическая постобработка выхода модели, усвоение метеорологических данных, ансамблевое прогнозирование и др.

Прогнозы вычисляются компьютерами, точнее мощными вычислителями, кластерами серверов полностью автоматизировано.

Для прогнозирования погоды применяются технологии, которые включают в себя моделирование, расчеты и обработку данных различных метеорологических моделей (таких как GFS, NMM, WRF, NAMS). Технологии компьютерного прогнозирования вычисляют метеорологические параметры в узлах регулярных сеток на период до 14-ти суток вперед, с разделением до 1-го часа.

Прогнозы имеют примерно одинаковую точность на уровне 95% “попаданий” на первые сутки и далее по нисходящей (нелинейно) до 50% на пятые-седьмые. 100%-ной точности не дает ни один известный метод прогнозирования погоды.

1.4.2. Моделирование атмосферных процессов различных масштабов

Компьютерная модель атмосферы в широком смысле представляет собой программное представление динамических, физических, химических и радиационных процессов в атмосфере. Наряду с дифференциальными уравнениями, такое представление включает в себя также параметрические и эмпирические уравнения. Для широкого класса процессов величина используемого в конкретных вычислениях шага сетки не позволяет им адекватно воспроизводиться в процессе моделирования. В таком случае для их полноценного представления используются так называемые «параметризации».

С развитием технологии атмосферного моделирования, круг воспроизводимых явлений и возможных приложений компьютерных моделей атмосферы постоянно растёт. С момента зарождения компьютерного моделирования атмосферы в 1948 году, компьютерные модели применялись в исследованиях погодных явлений, климата и вопросов, связанных с загрязнением атмосферы и окружающей среды в целом. Изначально метеорологические атмосферные модели использовались для прогнозирования погоды и изменений климата, в то время как в исследованиях в области химии и фотохимии атмосферы применялись собственные специфические компьютерные модели. И лишь в настоящее время разработаны наиболее общие программные системы, включающие в себя как динамическую метеорологию, так и атмосферную химию и позволяющие моделировать широкий спектр атмосферных явлений.

Компьютерные модели атмосферы разрабатывались исследовательскими центрами, университетами и метеослужбами различных стран. Атмосферные модели обычно подразделяют на классы в соответствии с пространственным масштабом моделируемых явлений. Среди используемых на практике для прогнозирования моделей, как правило, выделяют модели глобальной циркуляции, региональные и мезомасштабные модели.

В моделях глобальной циркуляции атмосферы рассматриваются процессы планетарного масштаба, и ставится цель адекватного воспроизведения глобальной циркуляции воздушных масс с использованием данных всех возможных метеонаблюдений, включая прямые наблюдения (с помощью наземных станций, самолётов, метеозондов) и данные дистанционного зондирования (со спутников, наземных радаров и лидаров). Примерами современных моделей глобальной циркуляции являются Global Forecast System (GFS), разработанная в США, Unified Model (UM) метеослужбы Великобритании, GME службы погоды Германии и др.

Региональные модели атмосферы нацелены на моделирование атмосферных процессов в некотором ограниченном регионе, при этом условия на границах региона моделирования определяются на основании результатов вычислений некоторой модели глобальной циркуляции для того же промежутка времени. Поскольку область моделирования существенно меньше, чем в глобальных моделях, появляется возможность использовать меньший шаг сетки и включить в рассмотрение более широкий круг процессов. Если доступные вычислительные ресурсы позволяют проводить моделирование с шагом сетки порядка нескольких километров, то такая модель обычно называется мезомасштабной, поскольку способна адекватно воспроизводить мезомасштабные атмосферные процессы. Примерами мезомасштабных моделей являются NAM (North American Mesoscale), Eta, RUC (Rapid Update Cycle), ARPS (Advanced Regional Prediction System), RAMS (Regional Atmospheric Modeling System), разработанные в США, LM (Lokal Model) службы погоды Германии, ALADIN (европейский проект на основе разработок метеослужбы Франции). Система MM5 (Mesoscale Model 5), результат разработок университета штата Пенсильвания и Национального центра атмосферных исследований (NCAR – National Center for Atmospheric Research) США, в течение нескольких лет была широко распространена в различных странах и использовалась в научных целях и практике метеорологического прогнозирования. Такая популярность обусловлена в первую очередь тем, что MM5 является моделью свободного пользования, то есть, доступна для скачивания и представляет собой свободно распространяемое программное обеспечение. В настоящее время на основе моделей MM5, Eta и ряда других разработана новейшая универсальная система атмосферного моделирования WRF, нацеленная на использование как в исследовательских целях, так и для метеорологического прогнозирования. Подобно MM5, система WRF распространяется свободно и широко используется в научных центрах и метеослужбах различных стран. Мезомасштабная модель – математическая модель для расчета погоды над ограниченной территорией с достаточно высоким разрешением. Мезомасштабные модели включают, как правило, нестационарные трехмерные уравнения гидротермодинамики и отличаются различными подходами параметризации атмосферных процессов.

1.5. МОДЕЛЬ ЧИСЛЕННОГО ПРОГНОЗА МЕЗОМАСШТАБНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ЯВЛЕНИЙ WRF

1.5.1. Общий обзор и характеристика мезомасштабной модели прогноза погоды и анализа атмосферных процессов WRF

Weather Research and Forecasting (WRF) – одна из наиболее современных и разработанных систем численного прогноза погоды и атмосферного моделирования. В настоящее время WRF позиционируется в качестве единого рабочего инструмента для совместного использования научно-исследовательскими учреждениями и метеослужбами.

Разработка системы WRF является результатом сотрудничества ряда ведомств, исследовательских организаций и университетов в рамках проекта по созданию нового поколения систем мезомасштабного атмосферного моделирования и усвоения данных метеонаблюдений с целью улучшения понимания физических процессов в атмосфере и повышения качества прогнозирования мезомасштабных погодных явлений, а также для скорейшего внедрения новейших научно-исследовательских разработок в сфере атмосферного моделирования в практику оперативного метеорологического прогнозирования.

WRF представляет собой достаточно гибкую, открытую к модификациям программную систему, находящуюся в свободном доступе (Public Domain). Высокая степень машино-независимости программного кода позволяет использовать WRF практически в любом программном окружении для широкого спектра вычислительных платформ, включая наиболее мощные суперкомпьютеры, серверы, рабочие станции, персональные и даже портативные компьютеры.

Наряду с использованием в практике численного прогноза погоды, приложения WRF включают в себя исследования в области усвоения данных метеонаблюдений, разработки схем параметризации физических процессов в атмосфере, моделирования регионального климата, анализа распространения примесей в атмосфере, взаимодействия атмосферы и океана, моделирования идеализированных случаев, представляющих интерес для теоретических исследований. Являясь свободно распространяемым программным обеспечением, WRF используется в научных и практических целях в различных странах мира и продолжает непрерывно развиваться [5].

В разработку WRF внесли свой вклад в целом более 150 организаций в США и за их пределами. Среди основных — подразделение мезомасштабной и микромасштабной метеорологии (MMM Division) NCAR, организации Межуниверситетского объединения по атмосферным исследованиям UCAR (University Cooperation for Atmospheric Research), Национальные центры прогнозирования окружающей среды NCEP (National Centers for Environmental Prediction) и Лаборатория исследования систем Земли ESRL (Earth System Research Laboratory) Национальной администрации по океану и атмосфере США (NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration), Метеослужба BBC (AFWA, Air Force Weather Agency) и Лаборатория по морским

исследованиям (NRL, Naval Research Laboratory) Минобороны США, Центр анализа и прогнозирования штормов CAPS (Center for Analysis and Prediction of Storms) при университете штата Оклахома и Федеральное авиационное агентство FAA (Federal Aviation Administration).

1.5.2. Основные компоненты системы мезомасштабного прогноза погоды и анализа атмосферных процессов WRF

Гибкость системы WRF обусловлена модульной структурой её программного кода. WRF состоит из множества достаточно независимых компонент, выполняющих определённые задачи на разных стадиях моделирования.

Основные компоненты WRF включают в себя динамические ядра, программные модули представления физических процессов (Physics Packages) и интерфейс их взаимодействия с динамическими ядрами (Physics Interface), модуль вариационного усвоения данных метеонаблюдений WRF-Var и модель химического состава атмосферы WRF-Chem.

Внешними компонентами WRF являются система подготовки входных данных WRF Preprocessing System (WPS), система объективного анализа данных стандартных метеонаблюдений OBSGRID, различные программные средства визуализации и последующей обработки (пост-процессинга) выходных данных WRF (результатов моделирования).

Необходимое взаимодействие между различными компонентами WRF и обмен данными с внешними программами обеспечивается в рамках программного среды WRF Software Framework (WSF). В частности, интерфейс ввода-вывода WRF I/O API позволяет WRF функционировать совместно с различными сторонними программными средствами, что обеспечивает естественную поддержку системой множества форматов данных. Интерфейс взаимодействия моделей (Model Coupling API) предоставляет возможность совместной работы WRF с другой системой моделирования, например, совместно с моделью циркуляции океана, моделью земной поверхности и т. п. WSF позволяет реализовать такое взаимодействие в рамках единого программного окружения Earth System Modeling Framework (ESMF).

1.5.3. Используемые форматы данных

Обмен данными между компонентами системы WRF и запись результатов моделирования в выходные файлы осуществляется интерфейсом ввода-вывода WRF I/O API в выбранном пользователем формате данных. В настоящее время поддерживаются 5 форматов ввода-вывода: двоичный, NetCDF, PHDF5, GRIB1 и GRIB2. Форматом по умолчанию, рекомендуемым для использования во всех задачах моделирования, является NetCDF.

NetCDF (Network Common Data Form) представляет собой формат данных и соответствующий программный интерфейс, предназначенный для работы с научными данными. NetCDF нацелен на предоставление эффективного доступа к относительно небольшим подмножествам массивных наборов данных. Разработка и поддержка NetCDF осуществляется в Unidata, подразделении UCAR. В настоящее время NetCDF применяется в различных областях

исследований, однако изначально его разработка была нацелена на использование в задачах наук о Земле, требующих работы с громадными массивами данных. NetCDF представляет собой формат данных с самоописанием: наряду со значениями переменных в файле содержатся и их атрибуты, такие как описание соответствующей физической величины, единица измерения и другие параметры.

Большинство программных средств, предназначенных для визуализации и обработки результатов моделирования системы WRF, предполагают использование для выходных файлов именно формата NetCDF. В свою очередь, программа pcvview представляет собой универсальное средство визуализации содержимого любых файлов в формате NetCDF.

Хотя NetCDF может использоваться в качестве универсального формата хранения массивов данных, достижение оптимального уровня сжатия не является целью его разработки. Для эффективной передачи значительных объёмов метеорологической информации в реальном времени по официальным высокоскоростным каналам связи и хранения архивных метео данных используется код GRIB (GRIdded Binary), официально утверждённый Всемирной метеорологической организацией (ВМО). GRIB представляет собой формат битового типа, позволяющий достигнуть высокой степени сжатия данных. В настоящее время по-прежнему широко используется формат GRIB Edition 1 (GRIB1), а также активно внедряется его новая версия GRIB Edition 2 (GRIB2).

1.5.4. Динамические ядра системы WRF

Динамическое ядро в системе WRF представляет собой важнейший независимый компонент, включающий программу инициализации, задача которой заключается в формировании начального условия и граничных условий для рассматриваемой задачи, и программу численного интегрирования модельной системы дифференциальных уравнений (вычислитель).

В настоящее время WRF содержит два динамических ядра — Advanced Research WRF (ARW) и Nonhydrostatic Mesoscale Model (NMM), выбор между которыми осуществляется на стадии компиляции системы. Динамические ядра отличаются постановкой системы дифференциальных уравнений, численными методами, используемыми для их интегрирования, вертикальной координатой и набором зависимых переменных.

Динамическое ядро ARW, ранее называвшееся Eulerian Mass solver (EM), преимущественно является результатом разработок NCAR в сфере негидростатического моделирования.

В ARW в качестве набора зависимых (прогностических) переменных используются отклонения потенциальной температуры, геопотенциала и давления от своих значений в гидростатическом равновесии, компоненты скорости в декартовых координатах. В качестве дополнительных переменных в параметризациях физических процессов также используется турбулентная кинетическая энергия (ТКЭ), отношения смеси для водяного пара, частиц облачности в различных фазах, осадков, основных химических составляющих

атмосферы и примесей. Система уравнений представляет собой негидростатические уравнения движения для сжимаемой жидкости (с возможностью вычислений и в гидростатическом режиме), демонстрирующие свойство сохранения скалярных величин. В качестве вертикальной координаты используется следующая рельефу местности — сигма-координата. Уравнения движения дискретизируются на пространственной сетке Аракавы класса «С» и интегрируются по времени методами Рунге-Кутты третьего и второго порядка с использованием метода расщепления (с различным шагом интегрирования для быстрых и медленных процессов).

Основные отличия ядра NMM, разработанного в основном NCER, заключаются в использовании системы уравнений для полностью сжимаемой жидкости, в которых явно разделяются составляющие, отвечающие за динамику в гидростатическом равновесии, от вклада негидростатической динамики. Это соответствует эволюционному подходу к негидростатическому моделированию, в котором максимально учитывается накопленный опыт в области численного прогноза погоды и моделирования регионального климата. Уравнения дискретизируются на сетке Аракавы класса «Е» и интегрируются по времени методом Адамса-Башфорта в сочетании с использованием для некоторых величин неявного метода Кранка-Николсона с целью обеспечения численной устойчивости. Другим важным отличием NMM является гибридная вертикальная координата: до определённой пользователем изобарической поверхности используется следующая рельефу местности сигма-координата, а выше — традиционная изобарическая координата.

1.5.5. Организация моделирования в ARW и NMM

Взаимодействие пользователя с системой WRF осуществляется способом, стандартным для программ, реализованных на языке FORTRAN. Все основные параметры, необходимые для организации моделирования в динамическом ядре, задаются пользователем в списке имён (FORTRAN namelist) – текстовом файле namelist.input. Дополнительные параметры определяются в ряде файлов настройки. Запуск отдельных программ осуществляется в режиме командной строки: в самой системе WRF не предусмотрен графический интерфейс.

В то же время следует отметить, что на всех стадиях моделирования, включая также задание областей счёта и подготовку входных данных в системе WPS, может использоваться WRF Portal — программа графического интерфейса пользователя (GUI) для WRF (front end). WRF Portal реализована на Java с целью максимальной совместимости на различных платформах. WRF Portal включает в себя WRF Domain Wizard – программу интерактивного определения конфигурации областей счёта. WRF Portal разрабатывается при поддержке ESRL и NOAA.

Основные компоненты динамического ядра ARW изображены на рисунке 1, ядра NMM — на рисунке 2. Построение начального условия и боковых граничных условий для модельной системы уравнений в обоих ядрах является задачей программы инициализации.

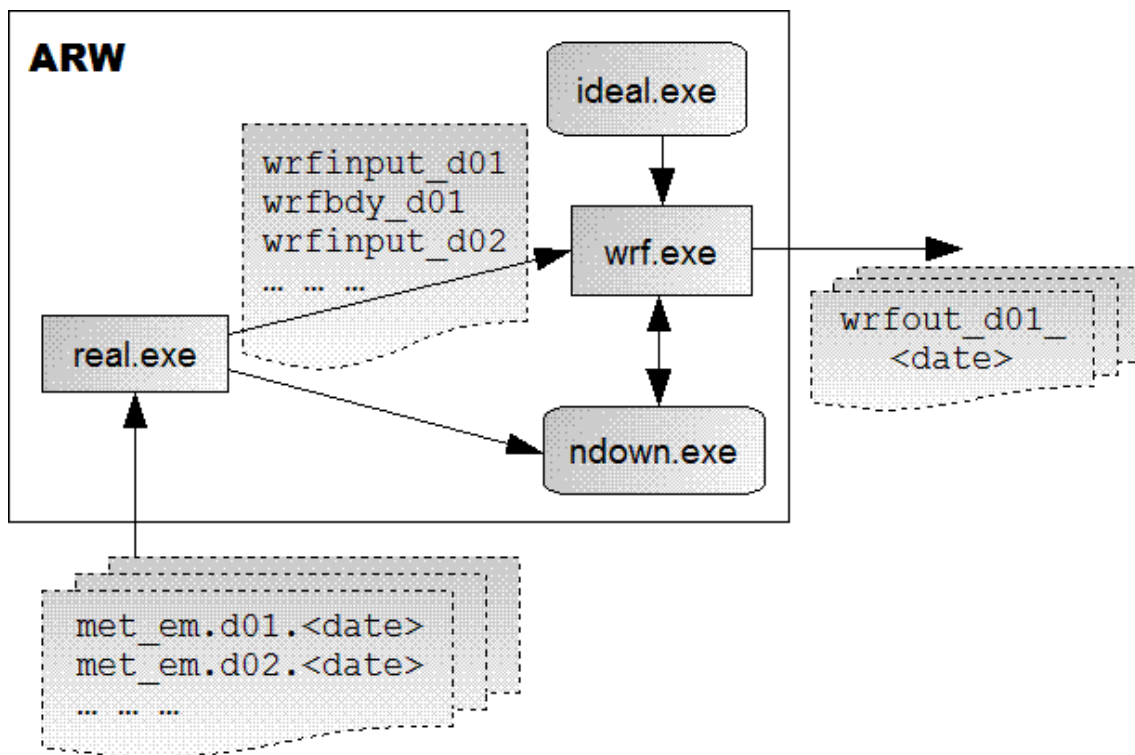


Рисунок 1 — Программная структура динамического ядра ARW

В ARW возможно рассмотрение ряда идеализированных задач атмосферного моделирования, не связанных с реальными данными (программа `ideal`). В ARW версии 3.0 они включают в себя идеализированное моделирование бароклинных волн (с шагом 100 км), глобальное моделирование с цифровой фильтрацией вычислительных шумов вблизи полюсов (625 и 556 км), моделирование крупного вихря с шагом 100 м и конвективной супер-ячейки с шагом 2 км, а также ряд двумерных случаев: гравитационное течение (шаг 100 м), обтекание атмосферным потоком холма (2 км), модель морских бризов (с шагом 2 км и учётом всех физических процессов), двумерные модели грозового фронта (шаг 250 м). Программа инициализации `ideal` для всех таких задач компилируется индивидуально с использованием модулей кода, отвечающих конкретному типу рассматриваемых явлений.

Для случаев реального атмосферного моделирования начальные и боковые граничные условия формируются программой инициализации на основе входных данных, содержащих параметры областей моделирования и поля значений всех необходимых метеорологических величин, заданные в узлах сформированной для каждой области расчётной сетки на изобарических поверхностях.

Ошибка! Закладка не определена. Входные данные для реального моделирования представляют собой результат работы системы подготовки данных WPS. Они основываются на результатах вычислений другой атмосферной модели (например, модели глобальной циркуляции) или архивных данных и обычно поступают в WPS в формате GRIB.

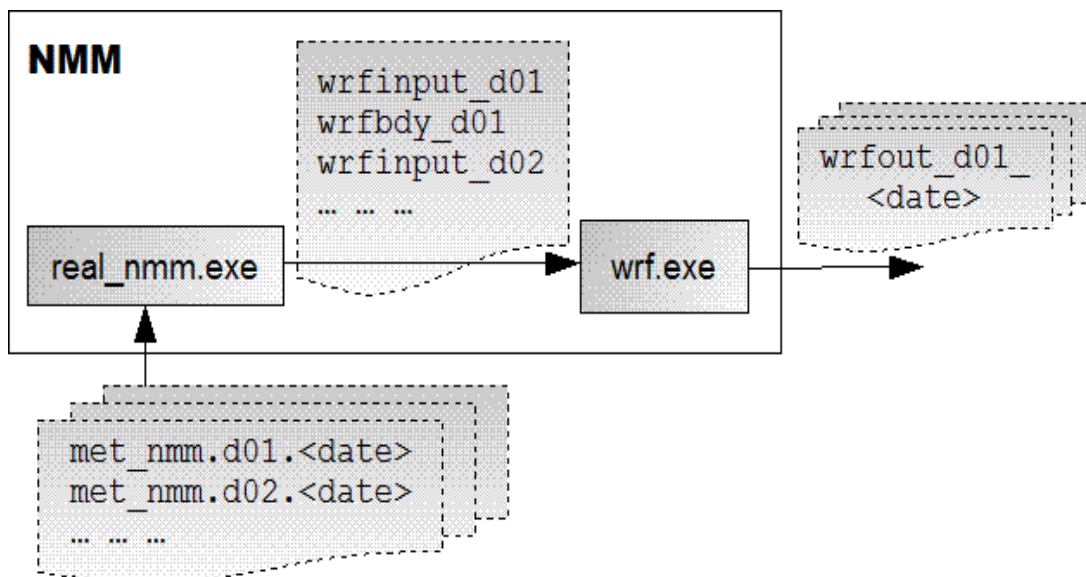


Рисунок 2 — Программная структура динамического ядра NMM

Программа инициализации (real в ARW, real_nmm в ядре NMM) строит набор поверхностей постоянной вертикальной координаты (сигма или гибридной) и производит вертикальную интерполяцию на них метеорологических величин, значения которых заданы для совокупности изобарических поверхностей. Расстояние между соседними уровнями вертикальной координаты может быть произвольным, что используется для более густого расположения уровней в приповерхностном слое атмосферы. Наряду с независимостью вертикального шага от шага сетки по горизонтали, это связано с отличительными особенностями реализации численной математической модели в динамических ядрах WRF.

1.5.6. Выбор участка и использование вложенных расчётных сеток

При переходе от физической поверхности Земли к ее отображению на плоскости (карте) выполняют две операции:

- 1) проектирование физической поверхности отвесными линиями на поверхность эллипсоида
- 2) изображение поверхности эллипсоида на плоскости посредством картографической проекции.

Координаты точек пространственных объектов используют для указания местоположения объектов на земной поверхности. Поверхность Земли имеет сложную форму. При составлении карт пространственное положение точек отображается в плоском (двухмерном) представлении.

Картографической проекцией называется математически определенный способ отображения поверхности земного эллипсоида на плоскости. Картографические проекции классифицируют по различным признакам, например, в зависимости от характера и размера искажений.

Проекция устанавливает функциональную зависимость между географическими координатами точек поверхности земного эллипсоида (широтой B и долготой L) и прямоугольными координатами X и Y этих точек на плоскости (карте), т.е.

$$X=f_1(B,L) \text{ и } Y=f_2(B,L)$$

Придавая функциям f_1 и f_2 конкретное выражение, получаем определенную картографическую проекцию, в которой можно вычислить прямоугольные координаты X и Y всех точек пересечения меридианов и параллелей, а по ним построить координатную сетку. Одновременно можно вычислить и прямоугольные координаты пунктов плановой основы, а по ним нанести сами опорные пункты. Компьютерные технологии позволяют рассчитывать проекции с заданными свойствами:

- наличие искажений в картографических проекциях, применяемых для географических карт, неизбежно, так как земная поверхность, имеющая форму геоида, не может быть развернута в плоскость без деформаций: в одних местах возникают разрывы, для устранения которых необходимо равномерное растяжение, в других – перекрытия, требующие равномерного сжатия. Отсюда следует, что на всех географических картах всегда имеются линейные искажения, и масштаб является величиной переменной, меняющейся с изменением места и направления;
- наличие искажений длин линий ведет к искажению длин, углов, площадей и форм;
- искажения возрастают с увеличением размеров картографируемой территории и по мере удаления от точек и линий нулевых искажений;
- искажения на картах могут быть определены посредством: измерений по карте с последующими вычислениями; макетов карт с изоколами, номограмм и таблиц;
- искажение длин линий (расстояний) связано с изменениями масштаба длин на одной и той же карте и выражается в том, что расстояния одинаковые на эллипсоиде, изображены на карте отрезками разной длины;

Искажением длин называется разность между частным масштабом и главным, который для данной карты принимается за единицу. Заключается в том, что, углы между направлениями на карте не равны соответствующим углам на эллипсоиде. Величина искажения угла в данной точке карты зависит от направления сторон угла. В качестве показателя искажения углов на карте принято наибольшее искажение ω (омега). В любой точке карты всегда имеется угол, изображающийся без искажения и равный 90° , который соответствует главным направлениям (осям) эллипса искажений.

Для характеристики искажения углов на карте между меридианами и параллелями, которые на поверхности эллипсоида встречаются под прямым углом, используют его отклонения от 90° и обозначают греческой буквой ε (эпсилон), т.е. $\varepsilon = \theta - 90^\circ$, где θ (тэта) – угол между касательными к меридиану и параллели в данной точке.

Искажение углов и длин линий на карте вызывает искажение форм, представляющее отношение большой полуоси эллипсоида к малой, или, что одно и то же, отношение наибольшего масштаба к наименьшему. Масштаб площадей в разных местах карты различен, что связано с искажением длин линий.

При построении участка в программе WRF используются области моделирования. Каждая область моделирования представляет собой прямоугольник в заданной картографической проекции и задаётся в системе подготовки данных WPS. В ARW версии 3.0 поддерживаются 4 типа картографических проекций: коническая конформная проекция Ламберта, проекция Меркатора, полярная стереографическая проекция и широтно-долготная проекция с возможностью поворота полюсов. Широтно-долготная проекция является новой для ARW и позволяет проводить глобальное моделирование атмосферы. Каждая картографическая проекция также характеризуется собственным набором параметров, таким как, например, две стандартные широты и центральная долгота для конической конформной проекции Ламберта. В NMM используется исключительно широтно-долготная проекция.

Важно помнить, что картографическую проекцию необходимо выбирать так, чтобы добиться наименьших искажений расчетной географической области (рабочего домена). Неверный выбор может привести к резкому увеличению времени счета и неоправданной потере точности. Для формирования «комфортных» условий проведения расчетов – необходим опыт и знания в области географии и метеорологии.

В обоих динамических ядрах поддерживается моделирование с использованием вложенных расчётных сеток. В исходной области моделирования системой подготовки входных данных формируется базовая расчётная сетка с указанным пространственным шагом по горизонтали (в метрах или градусах). От величины шага напрямую зависит точность моделирования и круг воспроизводимых в модели атмосферных процессов. В то же время, с уменьшением шага сетки в 2 раза необходимое количество вычислений возрастает как минимум в 4 раза, а с учётом необходимости адекватного уменьшения шага интегрирования по времени — в 8 раз. Таким образом, шаг сетки определяется компромиссом между требуемой точностью и доступными вычислительными ресурсами.

Введение на базовой сетке вложенных расчётных сеток позволяет сфокусировать вычисления с более высоким разрешением на интересующих регионах области моделирования. Область моделирования может включать в себя множество вложенных областей счёта различного масштаба, кроме того, каждая из них также может содержать собственные вложенные области. В каждой области счёта допускается неограниченное число вложенных областей при условии, что области одинакового уровня вложенности не перекрываются. На рисунке 3 изображен пример области счёта с тремя вложенными областями.

Количество уровней вертикальной координаты в текущих версиях динамических ядер WRF одинаково для всех расчётных сеток, вне зависимости от используемого пространственного шага по горизонтали.

Область 1 содержит вложенные области 2 и 4, а область 3 вложена в область 2.

Для каждого вложения шаг сетки уменьшается в произвольное целое число раз — благодаря этому в области вложения каждый узел исходной сетки совпадает с узлом вложенной сетки. Общая конфигурация вложений в заданной области моделирования и значения пространственного шага для каждой сетки определяются пользователем в соответствии со спецификой решаемой задачи, протекающими в различных регионах атмосферными процессами и доступной вычислительной мощностью.

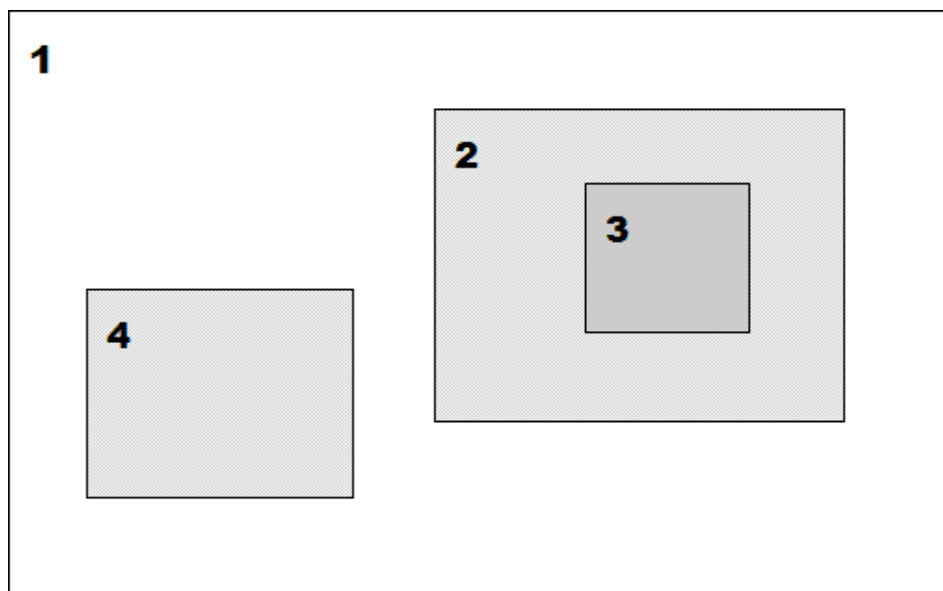


Рисунок 3 — Пример конфигурации с четырьмя областями счёта

Реализация моделирования с вложенными областями счёта в системе WRF в целом соответствует подходам, используемым в ряде других мезомасштабных атмосферных моделей (MM5, ARPS, COAMPS). Отличительными особенностями WRF является эффективное распараллеливание вычислений с вложенными областями счёта на компьютерных системах с распределённой памятью (благодаря WSF) и уникальная возможность использования движущихся вложенных областей.

Перемещение любой вложенной области счёта на области моделирования в определённые моменты модельного времени может быть явным образом указано пользователем с помощью параметров в записи `&domains` файла `namelist.input`. С другой стороны, использование алгоритма отслеживания вихря для автоматического перемещения вложенной области счёта позволяет ей следовать за движением тропического циклона с достаточно чёткой структурой.

В результате работы программы инициализации (`real` в ARW, `real_nmm` в NMM) на основе данных WPS для исходной области моделирования (область №1), содержащей в себе все остальные области счёта, формируется файл начальных условий `wrfinput_d01` и файл боковых граничных условий `wrfbdy_d01`. Для всех вложенных областей на основе данных, предоставленных WPS, также формируются файлы начальных условий `wrfinput_dNN`, где NN — порядковый номер области счёта. Граничные условия для каждой из вложенных областей формируются путём интерполяции результатов

вычислений в соответствующей исходной области (при любом уровне вложенности).

При моделировании с проведением вычислений одновременно на всех областях счёта достаточно упомянутых выше файлов, которые служат входными данными для программы `wrf`. Граничные условия для всех вложенных областей обновляются с каждым шагом интегрирования соответствующей исходной области счёта на основании полученных в ней за этот шаг результатов вычислений (для этого временной шаг вложенной области должен отличаться от шага исходной области в целое число раз). Если обмен информацией между областями счёта в процессе вычислений ограничивается лишь формированием граничных условий для вложенных областей, то речь идёт об одностороннем взаимодействии. При двухстороннем взаимодействии на каждом шаге интегрирования исходной области счёта переменным в узлах сетки, совпадающих с узлами вложенных сеток, присваиваются значения, полученные в результате вычислений на вложенных сетках (с меньшими величинами пространственного и временного шага).

С другой стороны, вычисления на различных областях счёта могут проводиться поочередно. В таком случае граничные условия для вложенной области счёта формируются после завершения вычислений программы `wrf` в исходной области. Файлы начальных и граничных условий формируются программой `ndown` на основе выходных файлов `wrf` и дополнительных данных системы WPS для вложенной области.

Результаты моделирования в каждой области счёта разбиваются на несколько интервалов модельного времени рассматриваемой задачи одинаковой длительности в соответствии с значением параметра `frames_per_outfile`, указанным пользователем в файле `namelist.input`, и выводятся программой `wrf` в выходных файлах `wrfout_dNN_YYYY-MM-DD_hh:mm:ss`, где NN — порядковый номер области счёта, YYYY-MM-DD и hh:mm:ss — соответственно начальная дата и время для данного интервала модельного времени. Также при необходимости для всех областей счёта формируются файлы повторного запуска вида `wrfirst_dNN_YYYY-MM-DD_hh:mm:ss`, позволяющие продолжить моделирование с указанного момента модельного времени. Промежуток модельного времени между последовательными записями текущего состояния модели в файл повторного запуска задаётся параметром `restart_interval` файла `namelist.input`.

1.6. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ WRF

1.6.1. Компиляция и сборка системы WRF

Программный код системы WRF распространяется в открытом доступе. Вследствие этого важно, чтобы студенты, магистранты и аспиранты метеорологических специальностей имели необходимые практические навыки для самостоятельной установки и использования этой системы.

Программный код компонентов WRF строится в соответствии с принципом разделения программного представления физико-математических

аспектов атмосферной модели и фрагментов кода, отвечающих за распараллеливание вычислений и другие архитектурно зависимые задачи. Распараллеливание вычислений при необходимости может использоваться практически на всех этапах моделирования и подготовки данных, демонстрируя высокий уровень быстродействия на множестве вычислительных платформ, включая многопроцессорные системы с распределённой и совместно используемой памятью, векторные и скалярные системы. Кроме того, возможно использование дополнительного аппаратного ускорения, например, задействование в вычислениях графических ускорителей (GPU).

Большинство компонентов системы WRF (включая WRF-Var) и система подготовки входных данных WPS реализованы на языке FORTRAN 90, широко используемом в различных областях исследований для организации математического моделирования с параллельными вычислениями. Ряд промежуточных компонент программного окружения WRF а также интерфейс MPI (Message Passing Interface), используемый WRF и WPS для распараллеливания вычислений, реализованы на языке C.

WRF компилируется из исходного кода с использованием достаточно сложного механизма сборки, который пытается определить тип используемой компьютерной архитектуры и предлагает пользователю выбор из возможных вариантов компоновки. На многопроцессорных системах доступны варианты без распараллеливания и в режимах параллельных вычислений с совместно используемой памятью и с распределённой памятью. Механизм сборки WRF протестирован для различных ОС семейства UNIX, включая ряд дистрибутивов Linux. В процессе компоновки для анализа и построения всех необходимых файлов используются некоторые вспомогательные программы, реализованные на языке C, сценарии Perl и командных процессоров csh и bash, а также ряд стандартных для ОС семейства UNIX программных средств: make, m4, sed и awk. Компиляция системы WRF могут быть осуществлена с помощью различных компиляторов, включая коммерческие (PGI, Intel, PathScale) и свободно распространяемые (gfortran, gcc, g95).

В компонентах WRF, связанных непосредственно с моделированием, для проведения вычислений не требуется никаких сторонних программных библиотек (например, для быстрого преобразования Фурье или вычислительной линейной алгебры). Единственной необходимой для всех компонент как правило является библиотека NetCDF, доступная на сайте Unidata [10], поскольку для ввода-вывода данных в WRF и WPS обычно используется именно формат NetCDF.

В модуле вариационного усвоения данных WRF-Var используются некоторые дополнительные библиотеки для поддержки различных форматов данных метеонаблюдений, а также библиотеки вычислительной линейной алгебры BLAS, LAPACK и BUFR. Для компиляции системы подготовки данных WPS с поддержкой формата GRIB2 необходимы также библиотеки JasPer (реализация стандарта JPEG2000 сжатия с потерей данных), PNG (метод сжатия без потери данных) и zlib (используется в библиотеке PNG).

1.6.2. Адаптация для работы под Windows (на примере виртуальных машин)

Программа WRF разработана под компьютерную систему linux, однако при отсутствии доступа к данному дистрибутиву, можно использовать аналоговые системе или виртуальные машины, которые можно использовать на Windows. Понятие виртуальная машина появилось несколько десятков лет назад, ещё в конце 60-х гг. прошлого века, но применялись виртуальные машины только на больших ЭВМ. В настоящий момент они переживают свое второе рождение. Виртуальная машина – в общем случае программная или аппаратная среда, исполняющая некоторый код; это среда, набор ресурсов и правил работы, которой формируются (с помощью программного обеспечения) в некой другой вычислительной среде. Виртуальные машины эмулируют работу реального компьютера. На такой виртуальный компьютер, так же, как и на реальный, можно устанавливать операционную систему, эмулировать подключение периферийных устройств, а также выполнять настройку базовой системы ввода/вывода (BIOS). Собственно, инструмент для создания виртуальной машины (его называют приложением VM или системой виртуальных машин (СВМ)) – это обычное приложение, устанавливаемое, как и любое другое, на конкретную операционную систему. Эта реальная операционная система называется хостовой операционной системой (от англ. термина host — «главный», «базовый», «ведущий»). Все задачи по управлению виртуальными машинами решает специальный модуль в составе приложения VM – монитор виртуальных машин, который играет роль посредника во всех взаимодействиях между VM и базовым оборудованием, поддерживая функционирование всех созданных виртуальных машин на единой аппаратной платформе и обеспечивая их надежную изоляцию.

Виртуальные машины могут использоваться для:

- защиты информации и ограничения возможностей программ;
- исследования производительности ПО или новой компьютерной архитектуры;
- эмуляции различных архитектур (например, эмулятор игровой приставки);
- вредоносного кода для управления инфицированной системой;
- моделирования информационных систем с клиент-серверной архитектурой на одной ЭВМ;
- тестирования и отладки системного программного обеспечения.

Архитектура системы выглядит следующим образом:

- хостовая операционная система и монитор виртуальных машин разделяют между собой права на управление аппаратными компонентами компьютера;
- монитор виртуальных машин контролирует распределение ресурсов между запущенными виртуальными машинами, создавая для них иллюзию непосредственного доступа к аппаратному уровню (этот механизм называют виртуализацией);

– гостевые операционные системы в пределах выделенных им ресурсов управляют работой запущенных под их управлением приложений.

Существует большое количество различных программ для создания и управления виртуальными компьютерами. VirtualBox – это виртуальная машина от корпорации Oracle. Бесплатная программа, предназначенная для виртуализации операционных систем Windows, macOS, Linux, FreeBSD, Solaris/OpenSolaris, поддерживаются и другие платформы. Среда виртуализации может быть установлена как для работы с операционными системами, так и для развертывания сетевой инфраструктуры и хостинга сайтов. С помощью VirtualBox вы сможете ознакомиться с функционалом ОС или же в безопасном режиме протестировать программу без вреда основной системе. Часто пользователи предпочитают устанавливать на виртуальные машины старые игры, которые несовместимы с современными ОС.

VMware – это наиболее известная и распространенная виртуальная машина, как правило, используют для работы крупные площадки или корпорации. Виртуальная машина VMware поставляется в двух видах: Workstation и Player, поддерживает работу с 32 и 64-битными системами, USB 3.0, установку различных операционных систем. VMWare подойдет продвинутым пользователям, которые предпочитают выполнять настройки системы вручную. Microsoft Virtual PC – это еще один популярный эмулятор виртуальных машин. Программа хорошо совместима со всеми версиями OS Windows. Обладает широким функционалом и удобным интерфейсом, но у нее есть один большой недостаток – она работает только с операционными системами Windows. На ней нельзя запустить Linux или Mac OS.

Основные преимущества виртуализации:

- в рамках виртуальной машины можно работать с устаревшими программными решениями и операционными системами;
- возможность создать защищенные пользовательские окружения для работы с сетью, в этом случае вирусные атаки могут нанести вред операционной системе, а не виртуальной машине;
- несколько виртуальных машин, развернутых на физических ресурсах одного компьютера, изолированы друг от друга, таким образом, сбой одной из виртуальных машин не повлияет на доступность и работоспособность сервисов и приложений других;
- виртуальные машины идеально подходят для процессов обучения и переподготовки, поскольку позволяют развернуть требуемую платформу вне зависимости от параметров и программного обеспечения хоста (физического компьютера, на котором функционирует виртуальная машина);
- в рамках одной гостевой операционной системы может быть развернуто несколько виртуальных машин, объединенных в сеть и взаимодействующих между собой;
- виртуальные машины могут создавать представления устройств, которых физически нет (эмуляция устройств).

Несмотря на то, что большая часть недостатков виртуальных машин разрешима, нельзя не упомянуть о них:

- обеспечение единовременной работы нескольких виртуальных машин потребует достаточного количества аппаратных мощностей;
- в зависимости от используемого решения, операционная система виртуальной машины может работать медленнее, чем на "чистом" аналогичном аппаратном обеспечении;
- различные платформы виртуализации не поддерживают виртуализацию всего аппаратного обеспечения и интерфейсов.

В связи с повсеместным распространением OS семейств Windows постоянно проводятся работы по кроссплатформенному использованию модулей и результатов расчета системы WRF.

Из такого рода разработок можно отметить систему: GUI for the WRF Preprocessor System (WPS) and namelist.input. Go here for LAPS Version Version 2.84 for Linux, AIX, Mac, and Windows - released August 15, 2013, включающую интерактивный интерфейс пре-процессной подготовки данных для проведения расчета в системе WRF.

Кроме того, разработан большой набор программ для визуализации и анализа результатов расчета, включая системы 3D визуализации, например, VAPOR (<http://www.vapor.ucar.edu/>), использующую язык ncl.

Необходимо также отметить, что в рамках Windows 10 активно разрабатывается система «внутренней» совместимости с OS Linux, которая в настоящее время еще полностью не закончена.

1.7. ПРИМЕНЕНИЕ ПОДСЕТОЧНЫХ ПАРАМЕТРИЗАЦИЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАСЧЕТОВ ПОГОДЫ ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ

1.7.1. Выбор микрофизик (общие понятия)

В гидродинамическом (численном) прогнозе погоды атмосфера, представляющая собой сплошную среду, интерпретируется как система с конечным числом степеней свободы и дискретизируется либо путем перехода от дифференциальных уравнений к сеточным уравнениям, либо с помощью разложения решения по ортогональным базисным функциям (ряды Фурье, обобщенные сферические функции и др.). Используются, кроме того, лагранжевы уравнения для некоторого конечного множества воздушных частиц. При переходе к сеточной области и от дифференциальных уравнений гидротермодинамики к их конечно-разностным аналогам число степеней свободы математической модели атмосферы определяется, во-первых, числом расчетных поверхностей по вертикали и, во-вторых, шагом сеточной области по горизонтальным координатам. В современных гидродинамических моделях атмосферы шаг сетки по горизонтали чаще всего принимается равным примерно 300 км, а число уровней по вертикали, как правило, не превышает 10. В системе WRF-ARW стандартные используемые пространственные масштабы – 3, 5 и 10 км (минимальные при специальных экспериментальных расчетах - до

20 м), число уровней по вертикали обычно 27 – 35 (но, в принципе, может быть выбрано пользователем в соответствии с решаемой задачей).

Понятно, что при этом сеточные уравнения гидротермодинамики атмосферы описывают лишь макромасштабную часть спектра метеорологических процессов и не описывают их Мезо- и мелкомасштабных компонент. Например, при разложении поля геопотенциала в ряд Фурье все волны, длина которых меньше трех-четырех шагов сетки, будут описываться неверно, а волны, длина которых равна двум шагам сетки, мы вообще не сможем описать.

Неправильное описание волн искажает решение задачи и в конечном счете ведет к вычислительной неустойчивости. С точки зрения реализации численных прогнозов атмосферные явления и процессы, которые не могут быть разрешены с помощью используемой конечно-разностной аппроксимации, то есть «просеиваются» сквозь сеточные ячейки, называются процессами подсеточного масштаба. Поскольку в атмосфере имеет место взаимодействие между процессами различного масштаба, то необходимо при прогнозе синоптических процессов учитывать влияние мелко масштабных явлений. Однако описать в явном виде это влияние нельзя, так как мы не можем точно описать сами процессы подсеточного масштаба. Поэтому при построении прогностических уравнений и математических моделей атмосферы стремятся учесть влияние волн подсеточного масштаба суммарно, то есть учитывают их суммарный вклад на окончательный результат. Задача об описании влияния процессов подсеточного масштаба на макропроцессы путем выражения эффектов мелкомасштабных движений через функции (параметры), описывающие свойства макропроцессов, получила название параметризации. Так, например, оставляя в уравнениях гидротермодинамики атмосферы члены F_x , F_y и e , можно учесть влияние сил турбулентной вязкости, лучистый, фазовый и турбулентный приток тепла. Учет указанных эффектов имеет тем большую активность, чем на большие сроки дается прогноз. При прогнозе на малые промежутки времени можно пользоваться адиабатическим приближением и не учитывать притоки тепла. Однако при прогнозе на несколько суток их учет необходим, поскольку притоки тепла, накапливаясь, может привести к существенному изменению характера атмосферных возмущений и процессов различного масштаба.

1.7.2. Влияние радиации и учет облачности

Необходимость параметризации этого процесса обусловлена необходимостью многократного решения переноса солнечного и длинноволнового излучения в атмосфере с учетом отражений и рассеяния для всего спектра с учетом облачности, что ведет к огромным вычислительным затратам. В последнее десятилетие широкое распространение в моделях атмосферы получило использование свободно распространяемой параметризации коротко- и длинноволновой радиации RRTMG SW и LW соответственно, в которой фактически используется интерполяция данных, полученных при расчете всех линий поглощения с учетом фактической

температуры и давления. Отдельно рассматривается 14 спектральных интервалов для коротковолновой радиации и 16 для длинноволновой. Такие параметризации применяются в моделях прогноза погоды Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП), американских Национальных центров прогнозов окружающей среды (NCEP), американской региональной модели WRF-ARW, немецкой модели ICON, китайской модели GRAPES, а также климатических моделях Национального центра атмосферных исследований США (NCAR), ECHAM (Германия), LMD (Франция). Для учета облачности в последнее время применяют подход со стохастическим распределением облачности. Вместо одного расчета с частичным покрытием облачностью ячейки горизонтальной сетки модели на каждом вертикальном уровне, выполняется несколько расчетов с профилями бинарной облачности (ясное небо/полное покрытие), которые построены таким образом, чтобы при усреднении профилей бинарной облачности получался бы заданный профиль с частичным покрытием. Такой подход заметно дороже, но качество модельного климата при этом получается выше. Вообще, наибольшая неопределенность в моделях атмосферы связана именно с описанием процессов в облаках

1.7.3. Образование крупномасштабных осадков и пограничный слой

За последнее десятилетие многие прогностические центры внедрили схемы образования и трансформации крупномасштабных осадков с учетом микрофизических процессов (например, процесс Бержерона-Фендайзена) и переноса образовавшихся осадков.

Такие схемы достаточно точно учитывают фазу осадков в момент их образования и ее изменения по мере движения к поверхности Земли. Эти схемы также допускают (как и в природе) сосуществование капель и кристаллов в конденсате. Они применяются в большинстве прогностических моделей атмосферы: ЕЦСПП, метеослужба Германии, Метео-Франс, WRF, полулагранжева модель Гидрометцентра и другие.

По мере роста вычислительных возможностей, параметризация пограничного слоя во многих моделях значительно усложнилась. Применяются подходы с включением дополнительного уравнения кинетической энергии турбулентности в различных вариантах (в частности, с уравнением 17 переноса этой величины), также применяются и гораздо более сложные параметризации, учитывающие, т. н. моменты третьего порядка. Развивается и альтернативный подход EDMF (eddy diffusivity – mass flux).

Для сравнения различных подходов уже много лет выполняется международный проект GABLS (GEWEX atmospheric boundary layer study), в котором результаты воспроизведения пограничного слоя различными параметризациями сравниваются как с данными наблюдений, так и с результатами трехмерного моделирования моделями крупных вихрей (large eddy simulation, LES). Особый акцент в этих исследованиях делается на воспроизведении устойчивого пограничного слоя.

Использование микрофизических подсеточных параметризаций в системе WRF – это весьма важный навык, который во многом определяет качество проведенного расчета и валидность полученных результатов.

Некорректный выбор системы микрофизик (а все наборы должны формироваться только системно) – может привести к «странным» результатам, ответственность за которые лежит на пользователе, а не на программе.

1.8. СИСТЕМЫ ПОСТПРОЦЕССНОЙ ОБРАБОТКИ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

1.8.1. Постпроцессная обработка

Результаты на выходе решающего устройства (вычислителя) в виде нескольких таблиц могут быть записаны в текстовый или бинарный файлы, не пригодные для чтения. Поэтому существуют следующие возможности представления результатов.

- Области напряжений, деформаций, температур и т.д. отображаются функциями визуализации в виде «геометрии» или сетки.
- Функции выделения, рекомбинации и сортировки параметров позволяют найти предельные значения полей напряжений, деформаций или температур.

Иногда пользователя могут заинтересовать те значения, которые не вошли как результаты в файл отчета и которые могут быть выведены из него в результате математических манипуляций. Им могут быть назначены дополнительные расчеты.

Режим отображения результата (способ представления):

- градуированное цветоделение до 10 цветов;
- тонирование – спектр от синего до красного;
- символьный – стрелки вектора в узлах или многогранники, размер и цвет которых отражают величину соответствующего значения;
- цифровой – значения параметра располагаются в центре элемента или в узле.

Графическое представление значений результата в виде:

- объемной оболочки - показывает значения на внешней оболочке объема, например, для визуализации деформаций показывает изменение результата, уменьшая и увеличивая его значения от нулевого до максимального;
- плоского сечения - показывает значения внутри объема, разрезая геометрию плоскостью и двигая это сечение в любом направлении внутри объема от места максимального значения до места минимального значения;
- патча поверхности - показывает результаты внутри объема в виде изоповерхности, она искажается, изображая значения от нижней границы до верхней границы результата.

Анимация любого из графических режимов. Листинг результатов – интерактивное окно с числовыми результатами, в динамическом режиме позволяет вести обработку полученных значений, например, сортировать

полученные значения по порядковому номеру и величине или в каких-либо границах значений (ограниченном поле значений). Оценка погрешности результатов в линейном статическом анализе для объемных элементов.

Ошибки представляются в виде:

- абсолютной ошибки (в единицах параметра, например давления);
- относительной ошибки напряжения (в %);
- количества элементов, имеющих совокупную ошибку, более 10%.

Эти данные могут быть получены с помощью специальной настройки контроля решателя на этапе задания условий анализа.

1.8.2. Использование сценарного языка ncl для обработки и анализа данных в системе WRF.

NCL это интерпретируемый, объектно-ориентированный язык программирования, который предназначен специально для людей, занимающихся анализом данных привязанных на сетку, связанную с географическими координатами, попросту говоря с Землей, и в особенности модельеров. NCL включены более 600 функций и процедур

Среди них те, что используются специально с климатическими и модельными данными, а также для:

- расчёта эмпирических ортогональных функций, трансформаций Фурье, сингулярного разложения, осреднения, стандартного отклонения, синусов, косинусов, логарифмов, минимумов, максимумов и так далее;
- получения и трансформации временной информации;
- отображения примитивов (линий, залитых площадей, маркеров), спецсимволов для метео-карт, изоповерхностей и других графических объектов;
- интерполяции, аппроксимации и регридинга в одном двух и трёх измерениях;
- облегчённого анализа скалярных и векторных значений глобальных геофизических величин.

Переменные NCL – это специализированные переменные формата netCDF.

Преимущество NCL в том, что загружать можно файлы нескольких популярных в научных кругах форматов — NetCDF, HDF (только Scientific Data Sets), HDF-EOS (только GRID and SWATH), GRIB1, GRIB2.

При этом переменные, которые импортируются в NCL будут выглядеть единообразно и приводиться к стандарту netCDF и это значит, что скрипт, написанный для данных в HDF формате, с большой долей вероятности будет работать почти без изменений и с теми же данными в GRIB2.

В NCAR также разработана одна из наиболее универсальных программ визуализации научных данных — VAPOR (Visualization and Analysis Platform for Ocean, atmosphere and solar Researchers).

Задачей VAPOR является интерактивный анализ и визуализация данных численного моделирования гидродинамических процессов различной природы. Особенностью VAPOR является возможность визуализации изменяющихся во времени трёхмерных (3D) полей данных с использованием техники DVR (Direct

Volume Rendering – прямая объёмная визуализация). VAPOR доступна для свободного скачивания с сайта.

1.9. ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ И ВАЛИДАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

1.9.1. Верификация моделей

При моделировании необходимо быть уверенным в корректности модели, в соответствии модели реальному прототипу. Точность математического моделирования зависит от того, насколько хорошо математическая модель отражает свойства объекта. При этом важно знать, с какой погрешностью получается результат, поскольку в случае большой погрешности расчет теряет смысл.

На точность моделирования влияют следующие особенности:

- упрощение модели;
- ошибки при построении модели;
- использование элементов с низкой точностью, с линейной аппроксимацией;
- наличие в модели вырожденных конечных элементов;
- некорректные связи;
- некорректные параметры моделей;
- некорректные свойства элементов;
- некорректные начальные и граничные условия;
- погрешности метода расчетов.

На основании результатов испытаний, таких, например, как показания приборов, вносятся изменения в математическую модель. В итоге создается модель, результаты использования которой совпадают с реальными объектами с заданной погрешностью.

Верификация модели (model verification) – проверка ее истинности, адекватности. Дословный перевод с английского: verification – это: 1) контроль, проверка; Sync: check, examination; 2) удостоверение, подтверждение (предсказания, сомнения); 3) засвидетельствование.

В отношении к дескриптивным моделям верификация модели сводится к сопоставлению результатов расчетов по модели с соответствующими данными действительности – фактами и закономерностями экономического развития.

В отношении нормативных (в том числе оптимизационных) моделей положение сложнее: в условиях действующего экономического механизма моделируемый объект подвергается различным управляющим воздействиям, не предусмотренным моделью; надо ставить специальный экономический эксперимент с учетом требований чистоты, т.е. устранения влияния этих воздействий, что представляет собой трудную, во многом еще не решенную задачу.

Верификация численной модели есть проверка соответствия ее поведения предположениям экспериментатора. Когда модель организована в виде вычислительной программы для компьютера, то сначала исправляют ошибки в

ее записи на алгоритмическом языке, а затем переходят к верификации. Это первый этап действительной подготовки к имитационному эксперименту. Подбираются некоторые исходные данные, для которых могут быть предсказаны результаты просчета.

Если окажется, что ЭВМ выдает данные, противоречащие тем, которые ожидалось при формировании модели, значит, модель неверна, т.е. не соответствует заложенным в нее ожиданиям. В обратном случае переходят к следующему этапу проверки работоспособности модели – ее валидации.

Верификация является инструментом валидации, ее частью. В более общем виде верификация – это подтверждение на основе представления объективных свидетельств того, что установленные требования были выполнены. Если образно, то верификация – процедура сопоставления того, что сделано (или еще пока делается), с тем, что было задумано (предписано) сделать, т.е. сопоставление законченного или промежуточного результата с входными требованиями – "взгляд назад".

Верификация продолжается вплоть до момента кодирования программы, а валидация осуществляется непосредственно после. Поэтому в практике моделирования с использованием ЭВМ верификация и валидация моделей завершается после проведения вычислительного эксперимента и подтверждения его результатами соответствия как реальным процессам исследуемого объекта, так соответствия конкретным условиям применимости (или требованиям). Однако в большинстве случаев процессы верификации, валидации, тестирования и реализации пересекаются по времени.

1.9.2. Валидация результатов

Валидация результатов моделирования (model validation) – проверка соответствия данных, получаемых в процессе машинной имитации, реальному ходу явлений, для описания которых создана модель. Она производится тогда, когда экспериментатор убедился на предшествующей стадии (верификации) в правильности структуры (логики) модели, и состоит в том, что выходные данные после расчета на компьютере сопоставляются с имеющимися статистическими сведениями о моделируемой системе.

Валидация – подтверждение на основе представления объективных свидетельств того, что требования, предназначенные для конкретного использования или применения, выполнены. Образно говоря, валидация – это процедура сопоставления того, что задумано сделать (или еще пока делается), с тем, что необходимо потребителю для конкретного применения, т.е. сопоставление планируемого или промежуточного результата деятельности с текущими выходными требованиями – "взгляд вперед". Дословный перевод с английского: validation – это: 1) ратификация, утверждение, Sync: ratification; 2) легализация, признание законной силы, придание юридической силы.

1.9.3. Статистический анализ результатов

Все понятия теории вероятностей и математической статистики чрезвычайно полезны синоптику, как при метеорологическом обеспечении конкретного потребителя, так и при изучении процессов, происходящих в

атмосфере, при уточнении существующих или разработке новых способов прогноза погоды.

Статистическим решением называется некоторое заключение (вывод) об исследуемом объекте или его свойствах, получено в результате статистической обработки информации. В общем случае задача принятия статистических решений формулируется следующим образом. Имеется некоторый объект наблюдения, который может находиться в одном из m состояний.

В процессе наблюдений за объектом получена некоторая совокупность результатов наблюдений $x_1, x_2, \dots, x_n$, характеризующих состояние объекта в момент наблюдения. Необходимо на основе обработки данной совокупности результатов наблюдения принять некоторые решения о состоянии, в котором находится исследуемый объект в данный момент времени или в котором он будет находиться через некоторый промежуток времени.

Для принятия решения необходимо задать некоторый алгоритм, позволяющий связать множество результатов наблюдений с множеством возможных решений. Правило, устанавливающее закон выбора решения на множестве совокупностей сведений об изучаемом объекте, называется решающим правилом или решающей функцией.

Существует много решающих правил, которые могут быть использованы при осуществлении того или иного вида обработки информации. Очевидно, что из этих правил следует применять то, которое обеспечивает принятие решения требуемого качества, т. е. решения оптимального в определенном смысле. В связи с этим возникает задача определения оптимального решающего правила.

Выбор такого правила определяется рядом факторов:

- требованиями, которые предъявляются к качеству решения;
- свойствами совокупности результатов наблюдений;
- условиями, в которых получаются результаты наблюдений;
- дополнительной априорной информацией, которая может быть использована при принятии решения.

Статистические модели условно можно разделить на детерминистические и стохастические. В детерминистических моделях предикторы и предиктанты выражают физические величины, которые можно связать детерминистической зависимостью. В стохастических (вероятностных) моделях предикторы и предиктанты рассматриваются как случайные величины.

Все статистические методы прогноза в широком смысле можно разделить на две части:

- 1) классические методы – методы, которые применяются на основе данных наблюдений и
- 2) методы, использующиеся для оптимизации информации численных моделей прогноза погоды.

Статистические, прогностические модели используются для уточнения, коррекции и детализации результатов гидродинамических методов прогноза. Кроме того, комбинация статистических и численных методов необходима как для разработки прогнозов в терминах вероятности.

Выделяются пять видов физико-статистического долгосрочного прогноза погоды:

- Регрессионный метод;
- Метод аналогов;
- Вероятностный метод;
- Экстрополяционный метод;
- Дискриминантный метод.

Классические методы статистических прогнозов погоды чаще всего применяются для оптимизации практического численного прогнозирования. В качестве предикторов используются результаты расчетов численной модели. Применение статистических процедур, для восстановления прогностических полей, делает прогноз комплексным – «гидродинамико-статистическим».

Существуют базовые предпосылки, в соответствии с которыми статистические методы полезно применять для интерпретации результатов расчета гидродинамических моделей:

1) численные модели упрощают и гомогенизируют состояние подстилающей поверхности. Важные местные особенности погоды остаются не учтенными. Статистические зависимости призваны решить эту проблему.

2) численные модели подвержены накоплению ошибок прогноза. Статистические методы могут компенсировать и корректировать эти ошибки.

3) численные модели детерминистичны по своей природе. Использование статистических методов позволяет рассчитать степень неопределенности прогноза и разработать вероятностный прогноз.

Методические подходы к решению задачи долгосрочного прогноза погоды статистическими методами так же можно разбить на два класса:

1. Физико-статистические методы.

Методы, устанавливающие причинно-следственные связи между аномалиями погоды и влияющими на их возникновение факторами.

а) строится физически-обусловленная модель длительных колебаний погоды.

б) предикторы определяются либо качественными соображениями, либо из гидродинамических уравнений, описывающих физику формирования прогнозируемого метеорологического элемента.

с) могут быть простые однофакторные модели (предвестник в сезонных прогнозах Гидрометцентра России, связь облачности над Атлантикой с температурой на ЕТР).

д) многофакторные статистические модели (метод ГГО, разработанный М.И. Юдиным).

е) в оперативной работе данные методы являются вспомогательными.

2. Статистические методы.

Методы, в которых не ставится задача физического, причинно-следственного описания процессов, но максимально используются прогностические возможности различных циклов, периодичностей, проявлений инерционности во временных рядах самих метеорологических величин.

Физические причины возникновения циклов и периодов, как правило, не рассматриваются.

а) гидрометеорологическая величина прогнозируется, исходя из поведения ее же значений в прошлом.

б) разработанные на такой основе методы представляют собой формальные модели длительных колебаний погоды, их можно назвать также чисто статистическими методами.

с) в оперативной работе применяются как вспомогательные.

1.9.4. Оправдываемость прогноза погоды

По данным Всемирной Метеорологической Организации успешными считаются краткосрочные прогнозы погоды с оправдываемостью 85-90 %, долгосрочные прогнозы с оправдываемостью 60-65 %.

Прогноз погоды на сутки составляют отдельно на ночь и на день. Если характер погоды в течение прогнозируемого периода ожидается однородным, то допускается прогноз погоды на сутки давать общим текстом. В прогнозах погоды указываются следующие метеорологические характеристики: облачность, осадки, направление и скорость ветра, минимальная температура воздуха ночью и максимальная температура днем, а также явления погоды.

Каждый территориальный орган гидрометеослужбы составляет прогноз погоды по зоне своей ответственности.

Если ожидается, что в отдельных частях области погода будет существенно отличаться, то используют характеристики географического положения (запад, восток, центр и т. д.).

Термины и понятия, которые используются в текстах прогнозов, придумываются не самими синоптиками, они содержатся в руководящих документах Гидрометцентра и также эти термины можно считать международными, поскольку они согласованы Всемирной метеорологической организацией.

У пользователей прогноза претензии и недоразумения часто возникают в связи с субъективной оценкой фактической погоды, а также неточным восприятием терминов и понятий текста прогноза.

Термин «кратковременный дождь» согласно руководящему документу - 3 часа. Понятие «гроза со шквалистым усилением ветра до 15 м/с» означает, что можно ожидать усиление ветра на 8 м/с и более за короткий промежуток времени (не более 2 мин), причем предлог «до» означает 10-15 м/с.

Метод необъективной оценки населением метеопрогнозов очень далёк от реальной картины оправдываемости прогнозов погоды.

Необъективность оценки работы синоптиков также возникает в связи с тем, что большинство граждан пользуются прогнозами погоды, размещенными на сайтах интернета, или получают информацию от средств массовой информации. За СМИ, получающих информацию непонятно из каких источников или сообщающих устаревшие данные, Гидрометеослужба ответственности не несёт.

В среднем оправдываемость расчетных прогнозов погоды, публикуемых в Интернете, составляет 70-75 %. Их выпускают компьютерные программы, человек в этом не участвует. Наиболее достоверными считаются расчеты на 3-5 дней.

Средняя оправдываемость прогнозов погоды, составленных органом Гидрометеослужбы по зоне своей ответственности, составляет по территории 94%, а по пункту — 91 %, и это свидетельствует о том, что прогнозы, вопреки сложившемуся мнению, чаще всего оправдываются, а не наоборот.

В настоящее время подготовка метеопрогнозов обеспечивается при помощи новейших научных и технических достижений. Специалист — синоптик должен уметь грамотно излагать свои мысли, обладать аналитическим складом ума, быть всесторонне образованным человеком. Ведь для того, чтобы составить прогноз погоды он должен оперировать знаниями физики атмосферы (метеорологии), динамики атмосферы (динамической метеорологии), а также обладать знаниями астрономии, географии, математики, быть опытным пользователем компьютера.

Разработан ряд специализированных программных продуктов для проведения валидации результатов численного моделирования, путем сопоставления с результатами натурных метеонаблюдений, а также путем сопоставления с результатами орбитальных наблюдений и расчетами различных моделей.

Примером такого программного продукта для WRF является приложение MET (/users/lir/wrf/met/METv1.1-gnu (Linux)).

1.10. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОРБИТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ДЛЯ ВАЛИДАЦИИ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ

1.10.1. Метеорологические спутники Земли

Метеорологический спутник – искусственный спутник Земли, созданный для получения из космоса метеорологических данных о Земле, которые используются для прогноза погоды. Спутники этого типа несут на борту приборы, с помощью которых наблюдают в частности за температурой поверхности Земли и облачным, снеговым и ледовым покровом. Методы получения метеорологической информации и способы её обработки с помощью метеоспутников изучает спутниковая метеорология.

Метеоспутники вместе со станциями приёма и обработки данных образуют метеорологическую космическую систему. В России эксплуатацией метеоспутников занимается организация ФГБУ «НИЦ „Планета“», страны Европы обслуживает организация EUMETSAT. Первый метеорологический спутник СССР – «Космос-122» – был запущен 25 июня 1966 года. Он имел на борту аппаратуру для съемки в оптическом и инфракрасном диапазоне, позволял исследовать распределение облачности, ледяных полей и снежного покрова, а также измерять температурные характеристики атмосферы на дневной и ночной стороне Земли. С 1967 года в СССР начала функционировать

система «Метеор», которая легла в основу разрабатывавшихся впоследствии метеорологических систем различного назначения.

Космические аппараты, входящие в метеокомплексы, делятся на два типа по параметрам орбиты и, соответственно, по назначению:

1) Геостационарные спутники. Запуск их производится в экваториальной плоскости, в направлении вращения Земли на высоту 36 786 км над уровнем моря. Угловая скорость их соответствует скорости вращения планеты. Имея такие орбитальные характеристики, спутники этого типа находятся всегда над одной точкой, если не учитывать колебания и «дрейф», вызванные погрешностями при выводе на орбиту и гравитационными аномалиями. Они постоянно наблюдают одну область, составляющую около 42 % земной поверхности – немного меньше, чем полушарие. Эти спутники не позволяют наблюдать области самых высоких широт и не дают детального изображения, зато предоставляют возможность непрерывного слежения за обстановкой в крупных регионах.

2) Полярные спутники. Аппараты этого типа движутся по гораздо более низким орбитам – от 850 до 1000 км, вследствие чего не обеспечивают широкого охвата наблюдаемой территории. Однако орбиты их обязательно проходят над полюсами Земли, и один спутник такого типа способен за определенное количество витков «снять» всю поверхность планеты узкими (около 2500 км) полосами с хорошим разрешением. При одновременной работе двух спутников, находящихся на солнечно-синхронных полярных орбитах, обзор каждого района производится с интервалом 6 часов.

Космический аппарат, предназначенный для метеонаблюдений, состоит из двух модулей: служебного (спутниковая платформа) и несущего полезную нагрузку (приборы). В служебном отсеке размещается энергетическое оборудование, обеспечивающее питание от солнечных батарей, укрепленных на нем вместе с радиатором и двигательной системой. К рабочему модулю подсоединен радиотехнический комплекс, оснащенный несколькими антеннами, и датчики мониторинга гелиофизической обстановки.

Как правило, метеоспутники несут в составе своего аппаратного комплекса два типа приборов:

1) Обзорные. С их помощью получают телевизионные и фотоизображения поверхности суши и океанов, облачного, снежного и ледового покрова. В числе этих приборов – не менее двух устройств многозональной съемки в различных диапазонах спектра (видимом, микроволновом, инфракрасном). Они производят съемку с разным разрешением. Спутники также оснащаются установкой радарного сканирования поверхности.

2) Измерительные. Посредством приборов этого типа спутник собирает количественные характеристики, отражающие состояние атмосферы, гидросферы и магнитосферы. К таким характеристикам относятся температура, влажность, радиационная обстановка, текущие параметры геомагнитного поля и т. д.

1.10.2. Получение метеопараметров по спутниковым данным

Спутник может работать как в режиме запоминания информации с последующей передачей пакета данных на наземный комплекс приема и обработки, так и вести непосредственную прямую передачу. Получаемые наземным комплексом спутниковые данные подвергаются дешифрированию, в ходе которого осуществляется привязка информации по времени и картографическим координатам. Затем данные с разных космических аппаратов объединяются и подвергаются дообработке с созданием наглядно воспринимаемых изображений.

Согласование международных вопросов, касающихся применения космических систем в прогнозировании погоды, находится в ведении координационной группы по метеорологическим спутникам в рамках ВМО. Совместное использование спутниковых метеосистем началось еще в 1970-х годах. Особенно же важна координация в этой области сейчас. Ведь в состав международной группировки метеорологических спутников, размещенных на геостационарной орбите, входят космические аппараты многих стран: США, европейских государств, России, Индии, Китая, Японии, Южной Кореи.

В настоящее время на Земной орбите находится порядка 10 спутников, используемых в метеорологических целях. Эти спутники непрерывно сканируют поверхность и атмосферу Земли и осуществляют непосредственный сброс информации на землю в соответствующие научные центры, лаборатории и всем, кто может принять. Приемная станция, находящаяся в зоне радиовидимости спутника, в реальном времени видит то, что видит спутник. Данные с него поступают непосредственно в момент съемки. Аппаратное изображение принимается не только в видимом спектре, но и на некоторых частотах инфракрасного диапазона. Правильнее даже сказать, что все основные каналы – инфракрасные, их намного больше. Эти каналы намного важнее для практических целей, потому что в них можно выделить водяной пар, дым, тепловое излучение от лесных пожаров или определить температуру поверхности планеты. С помощью таких снимков можно определить даже созревание урожая на колхозных полях. Эта статья рассказывает о технике практического приема изображений со спутников дистанционного зондирования Земли.

Метеоспутники дают основную информацию (набор и пространственное распределение метеопараметров) для валидации результатов численного моделирования погодных процессов.

Перспективным является использование для валидации численных моделей результатов орбитальных наблюдений облачности группировкой спутников EUMETSAT (<https://www.facebook.com/eumetsat/>).

1.11. ПРОГНОЗ ПОГОДЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ

1.11.1. Прогноз погоды

Прогноз погоды — научно обоснованное предположение о будущем состоянии погоды в определённом пункте или регионе на определённый период. Составляется (разрабатывается) метеорологическими службами на основе методов метеорологии.

Прогноз синоптического положения, то есть температуры, осадков, влажности и полей давления (геопотенциала) опирается на законы, описывающие движение атмосферы как сжимаемой жидкости. Данные законы относятся к такому разделу физики как гидродинамика, которая включает в себя уравнения движения, состояния газов, переноса влажности, сохранения массы. Решая эти уравнения численными методами для конкретного состояния атмосферы, можно получить числовые значения будущих полей давления, температуры, ветра. В качестве исходных данных для подстановки в уравнения являются измеренные в настоящий момент параметры атмосферы; измерения проходят по всей возможной высоте. Численное интегрирование уравнений обязано своей точностью современным вычислительным машинам, которые могут обрабатывать значительное количество входных данных. Тем не менее, для целей численного решения уравнений и быстрой интерпретации этих решений, необходимо использовать максимально возможные ресурсы — суперкомпьютеры.

Прогноз погоды составляют метеорологи с помощью данных, полученных с метеостанций (на Земле их около восьми тысяч). Они работают круглосуточно и без выходных. Среднее расстояние между метеостанциями в европейской части России – 150 км, в Сибири – 300 км. Сотрудник станции фиксирует и систематизирует показания приборов (температура, атмосферное давление, направление ветра) каждые три часа вручную или с помощью автоматического учета.

Для сбора данных используют и метеорологический зонд. Его поднимает в воздух воздушный шар, наполненный водородом. По всей планете такой зонд запускается ровно в полдень и в полночь по Гринвичу. Зонд фиксирует состояние температуры и влажности в верхних слоях тропосферы и стратосферы (20 и 50 км над поверхностью Земли).

Именно на этой высоте возникают циклоны и антициклоны. Если прибор показывает высокую влажность в небе, значит там зарождается туча, и скоро на землю прольётся дождь. Зонд рассчитан на один полет: достигнув нужной высоты, шар из водорода начинает сдуваться, и аппарат размером с футбольный мяч приземляется в произвольном месте.

Данные об облачности и состоянии верхних слоев атмосферы собирают и космические спутники. Им достаточно сфотографировать нужный участок, на основе чего ученые уже смогут сделать прогноз.

1.11.2. Методы прогноза

Предсказание погоды с научной точки зрения – одна из сложнейших задач физики атмосферы. Существуют различные методы для прогнозирования метеорологических явлений и их величин, но в полном объеме ни один метод не обеспечивает пока точного прогноза. Имеется прямая зависимость между заблаговременностью прогнозов и ростом их ошибок.

Синоптический метод составления прогнозов погоды основан на анализе карт погоды. Сущность этого метода состоит в одновременном обзоре состояния атмосферы на обширной территории, позволяющем определить характер развития атмосферных процессов и дальнейшее наиболее вероятное изменение погодных условий в интересующем районе. Осуществляется такой обзор с помощью карт погоды, на которые наносятся данные метеорологических наблюдений на различных высотах, а также у поверхности земли, производимых одновременно по одной программе в различных точках земного шара. На основе подробного анализа этих карт синоптик определяет дальнейшие условия развития атмосферных процессов в определенный период времени и рассчитывает характеристики метеоэлементов – температуру, ветер, облачность, осадки и т.д.

Численный прогноз погоды использует компьютерную математическую модель атмосферы для составления прогноза погоды. Хотя первые попытки использовать математические модели для прогнозирования погоды были сделаны в 20-х годах XX века, только с изобретением компьютера и компьютерного моделирования стало возможным осуществлять его в режиме реального времени. Данный процесс связан с обработкой огромного набора данных и выполнением сложных вычислений и может быть полноценно осуществлен только на мощных суперкомпьютерах.

Численные (гидродинамические) методы прогноза погоды основаны на математическом решении системы полных уравнений гидродинамики и получение прогностических полей давления, температуры на определенные промежутки времени. Вычислительные центры Москва, Вашингтон, Токио, Рейдинг (Европейский прогностический центр) используют различные численные схемы развития крупномасштабных атмосферных процессов.

Точность численных прогнозов зависит от скорости расчета вычислительных систем, от количества и качества информации, поступающей с метеостанций. Чем больше данных, тем точнее расчет. Если техническая и математическая сторона метода ежегодно улучшается, то, к сожалению, в последние годы на территории нашей страны значительно уменьшилось число метеорологических и аэрологических станций, что существенно влияет на конечный результат.

Статистические методы прогноза позволяют по прошлому и настоящему состоянию атмосферы спрогнозировать на определенный будущий период времени состояние погоды, т.е. предсказать изменения различных метеоэлементов в будущем. В оперативной практике синоптики используют несколько методов, иногда несовпадающих по ряду параметров. Поэтому

последнее слово всегда остается за прогнозистом, выбирающим с его точки зрения лучший метод прогнозирования. Часто выбирается комплексный подход – использование сразу нескольких частных методов прогноза одной и той же характеристики состояния атмосферы с целью выбора окончательной формулировки прогноза.

Решаемые при прогнозе погоды уравнения относятся к наиболее сложным в гидродинамике. В комплекс прогностических уравнений входят уравнения, описывающие законы сохранения массы, энергии и количества движения, т. е. уравнение неразрывности, уравнение движения, уравнение сохранения энергии. Для полного описания реальной атмосферы здесь недостает учета увлажнения, запыленности, турбулентности и др. При решении системы уравнений приходится прибегать к упрощениям. В частности, в уравнении притока тепла не учитывают приток тепла извне, а ограничиваются предположением, что в короткие отрезки времени процессы развиваются по адиабатическому закону и т. п.

Для каждого конкретного прогноза записывается система уравнений, причем производятся некоторые упрощения применительно к поставленной задаче. В уравнениях оставляются только главные члены, а второстепенные из рассмотрения исключаются. Решением уравнений находятся такие неизвестные, как будущие значения полей давления, температуры, скорости ветра. Для этого задается начальное состояние атмосферы, т. е. поля тех же элементов (давления, температуры, скорости).

Решение системы прогностических уравнений до появления вычислительной техники практически было невозможно ввиду неимоверно большого количества вычислений. Например, для прогноза погоды на ближайшие сутки потребовалась бы работа нескольких тысяч вычислителей в течение суток.

Смысл расчета по шагам заключается в следующем. Необходимо, например, рассчитать поле давления на 24 часа вперед. Для этого имеются данные об исходном поле давления и о барической тенденции, т. е. об изменениях давления в различных частях взятого поля за последние 3 часа. Если, исходя из величины тенденции, рассчитать будущее поле давления сразу на 24 часа, то можно совершить грубые ошибки, так как изменение поля давления протекает не с постоянной скоростью. Поэтому промежуток 24 часа разбивается на малые отрезки времени (например, по 2 часа) и последовательно производится расчет ожидаемого поля давления сначала на первые 2 часа; затем по полученной прогностической карте давления расчет ведется на следующие 2 часа и т. д. В итоге на последней прогностической карте давления (после 12 предвычисленных промежуточных карт) оказываются учтенными все возможные изменения барического поля. Хотя эти изменения учитываются с приближением, все же при расчете промежуточных карт исключаются грубые ошибки.

Автоматизация работы службы погоды. Одновременно с развитием численных методов прогноза погоды предпринимаются практические шаги и

интересные исследования к автоматизации работы всей метеорологической службы. Идея состоит в том, чтобы все операции, начиная от метеорологических и аэрологических наблюдений и кончая предвычислением погоды, были бы автоматизированы. Иначе говоря, должны быть автоматизированы наблюдения, составление и передачи телеграмм в Главный радиометеорологический центр, ввод данных в машины, наноска карт, предвычисление карт различных метеорологических элементов и погоды.

1.11.3. Типы прогноза (долгосрочные и т.д.)

Выделяют следующие типы прогноза погоды по продолжительности:

- наукастинг (прогноз текущей погоды) — от 0 до 2 часов;
- сверхкраткосрочные (СКПП) — до 12 часов;
- краткосрочные (КПП) — от 12 до 72 часов;
- среднесрочные (СПП) — от 72 часов до 10 суток;
- с расширенным сроком — от 10 до 30 суток;
- долгосрочные (ДПП) — от 30 суток до двух лет; включают месячный, трехмесячный (или 90-суточный), сезонный ориентировочные прогнозы, которые представляют собой описание усредненных метеорологических параметров, выраженных в виде отклонения (девиация, колебание, аномалия) от климатических величин соответственно для этого месяца (не обязательно для предстоящего месяца), для этого 90-суточного периода (не обязательно для предстоящего 90-суточного периода), для этого сезона;
- прогноз климата — свыше двух лет;
- прогноз климата на год-десятилетие (описание ожидаемых параметров климата, связанных с изменением межгодовых и десятилетних климатических аномалий, а также аномалий нескольких десятков лет);
- прогноз климата (описание ожидаемого в будущем климата с учётом влияния естественных и антропогенных факторов).

Прогноз погоды на короткие сроки

К моменту начала составления прогноза на 1-3 дня имеются: анализ синоптического положения у поверхности Земли, будущие поля давления и температуры на пару дней вперед, полученные в результате численного интегрирования уравнений термодинамики атмосферы. Далее следует второй этап — составление непосредственно прогноза погоды для определенного участка территории. Пользуясь прогностическими полями геопотенциала и давления, синоптик определяет будущее положение циклонов и антициклонов, фронтов и воздушных масс. Также учитываются время года и/или месяц, которые влияют на поправки в расчетах. Для прогноза ливневых осадков и гроз используется информация от метеорологических радиолокаторов.

Современная оправдываемость прогноза довольно велика — в 4 раза выше, чем при отсутствии анализа состояния атмосферы. Еще более высока оправдываемость штормовых предупреждений об опасных явлениях природы (ветер, метель, туман, гололед, заморозки, шторма, наводнения); она оценивается примерно в 90-95%.

Среднесрочный прогноз погоды

Прогнозы на средние сроки (4—10 дней) опираются на текущую информацию о развитии синоптических процессов в течение всего сезона, а также на будущие поля давления (геопотенциала) и температуры на 1—5 суток вперед, рассчитанные с помощью интегрирования уравнений динамики и термодинамики атмосферы, с использованием в качестве начальных данных фактических наблюдений в момент времени, исходный для начала интегрирования. Однако в прогнозах на 5—10 дней уже нет возможности прогнозировать изменения погоды по дням, так как невозможно проследить за изменением свойств воздушных масс на протяжении всего прогнозируемого периода. Поэтому прогнозируются средняя температура (либо аномалия температуры) и среднее количество осадков на предстоящие 10 дней, а также величины максимальной и минимальной температуры в течение будущих 5—7 суток. Среднесрочный прогноз составляется с использованием статистических методов, которые требуют огромных вычислительных ресурсов, поэтому его осуществление возможно только при наличии достаточно производительных ЭВМ.

Долгосрочный прогноз погоды

В настоящее время установлено, что предсказуемость характера погоды в какой-то день в данном месте не превышает двух недель. Иными словами, как бы ни совершенствовались методы прогноза погоды, принципиально невозможно за пределами двух недель предсказать конкретное явление погоды, например, будет ли в таком-то месте дождь такого-то числа. Это связано, во-первых, с тем, что мы никогда не знаем точно начальное состояние атмосферы и, во-вторых, что при интегрировании уравнений динамики и термодинамики атмосферы мы допускаем определенные ошибки при их численном решении, при приближенном описании физических процессов, происходящих в атмосфере, ее взаимодействии с подстилающей поверхностью и космосом.

Таким образом, нет надежды получить метод прогноза, который бы позволил оценить погоду по дням на предстоящий месяц или сезон и тем более на большие сроки. Это, однако, не означает, что ставить задачу прогноза погоды на месяц или сезон бессмысленно. Просто под прогнозом погоды нужно понимать прогноз более общих характеристик погоды будущего: наиболее часто говорят о месячных и сезонных аномалиях температуры и осадков.

Но задача определения общих характеристик погоды на месяц и сезон пока еще далека от удовлетворительного разрешения. Поэтому главная задача метеорологии в настоящее время — создание надежного метода долгосрочного прогноза погоды. Самые первые попытки применения для долгосрочных прогнозов инерции в ходе атмосферных процессов, то есть сохранения знака текущей аномалии температуры на месяц и сезон вперед, не дали обнадеживающих результатов.

1.11.4. Система наукастинга

В настоящее время заблаговременность всего спектра авиационных прогнозов ограничена областью действия краткосрочного прогнозирования,

верхняя граница которого, по определению, составляет 72 часа. Прогнозы по маршруту, включающие поля ветра и температуры, выпускаются с заблаговременностью от 6 до 36 ч с интервалом каждые 3 ч.

Наукастинг (прогноз текущей погоды) представляет собой детализированный прогноз погоды на ближайшие часы (до 2-6 часов).

Продолжительность жизненного цикла некоторых погодных явлений (например, шквалов, ливней и т.д.) варьирует от минут до десятков минут. Возможности прямого прогноза такого рода явлений с помощью гидродинамических моделей атмосферы сегодня весьма ограничены, поэтому понятие «наукастинг» обычно ассоциируется с экстраполяцией последних тенденций, выявленных в данных метеорологических наблюдений.

Так как контактные наблюдения за состоянием атмосферы, как правило, распределены в пространстве недостаточно плотно, они не всегда способны обеспечить желаемую степень детализации для оценки параметров перемещения погодообразующих структур и зон отдельных погодных явлений. По этой причине помимо контактных метеорологических наблюдений для подготовки прогнозов текущей погоды и сверхкраткосрочных прогнозов активно привлекаются площадные данные дистанционного зондирования атмосферы (радарные, спутниковые), которые активно помогают при составлении прогноза погоды.

Термин «наукастинг» был введен в активный обиход в 1980-х в Метеофисе Великобритании К. Браунингом при описании технологии экстраполирования последовательности радарных образов для целей прогноза осадков. Первые попытки компьютерной экстраполяции были довольно примитивными, но к концу 1960-х были разработаны более сложные алгоритмы отслеживания отдельных конвективных ячеек.

Вначале наукастинг ограничивался в основном временной экстраполяцией радарных и спутниковых образов, но постепенно в его сферу стали входить атмосферные численные модели. В настоящее время отмечается тенденция к сближению наукастинга с численным прогнозом погоды и усвоением данных наблюдений с высоким разрешением. В настоящее время наукастинг («прогноз текущей погоды» в русском переводе, согласно Наставлению ВМО) представляет собой прогноз с заблаговременностью от нескольких минут до нескольких, как правило не более 6 часов. Часто при прогнозировании какого-либо явления перекрываются границы наукастинга и сверхкраткосрочного прогноза (до 12 ч). Прогнозы на временных масштабах наукастинга носят название наукастов (по аналогии с forecast – прогноз вперед, nowcast – прогноз на текущий момент). Термин «наукастинг» характеризует не только определенные интервалы заблаговременности, но и, прежде всего, информационную основу и техническую реализацию прогнозирования. Это предполагает использование мощной вычислительной техники, позволяющей реализовать численный прогноз по одной или нескольким негидростатическим моделям, а также обязательное наличие большого объема исходных данных наблюдений и развитой системы их передачи и усвоения.

В настоящее время реализация прогнозов на очень короткие сроки базируется на широком спектре информации наземной, 118 радарной, спутниковой систем наблюдения. Это автоматические станции погоды, которые передают сведения о давлении, температуре, влажности скорости и направлении ветра (с осреднением от нескольких секунд до нескольких минут), радарные измерения. Кроме этого, реализация включает в себя технологическую организацию непрерывных потоков данных, усвоение этих данных численными моделями с высоким горизонтальным разрешением (порядка километра). Для этого необходимо наличие больших вычислительных мощностей, так как речь идет о непрерывном усвоении огромных потоков информации. Например, геостационарные спутники имеют горизонтальное и временное разрешение порядка нескольких километров и нескольких минут соответственно. Спутниковые измерения могут поставлять данные о радиации, о восстановленных профилях температуры и влажности, о скорости ведущего потока в тропосфере (так называемый «облачный ветер») и других характеристиках.

Современные метеорологические радиолокаторы имеют радиус обзора 250–300 км и позволяют осуществлять циклические наблюдения с периодичностью от 3 до 15 мин в круглосуточном автоматизированном режиме, предоставляя данные об облачности, осадках, радиальном ветре с высоким пространственным разрешением (0,5–1,0 км) на площади до 200 тыс. км². Помимо сетевых приборов, осуществляющих непрерывную регистрацию параметров атмосферы в автоматическом режиме, информацию получают от специально установленных несетевых средств дистанционного зондирования – температурных и ветровых профилемеров, лидаров и т. д.

Данные приборов, производящих непрерывные измерения, как правило, подвергаются осреднению (от нескольких секунд до 10 минут). Так, непрерывный волновой лидар ПЛВ-2000 каждые 4 с обновляет информацию о скорости и направлении ветра в диапазоне высот от 10 м до 2 км.

Пространственное разрешение данных измерений по вертикали с помощью подобных приборов находится в диапазоне от нескольких метров до нескольких десятков метров. Например, температурный профилемер МТП-5 проводит измерения температуры в вертикальном направлении до высоты примерно 1000 м с разрешением примерно 50 м. Реализация усвоения всей вышеописанной информации – сама по себе очень непростая наукоемкая задача. Она усложняется еще и тем, что на масштабах наукастинга данные измерений должны усваиваться практически непрерывно.

В настоящее время для этой цели применяют техники «квазинепрерывного» усвоения типа наджинга или ансамблевого фильтра Калмана. К предиктантам методов авиационного наукастинга и сверхкраткосрочного прогноза погоды относятся, прежде всего, те характеристики погоды, которые наиболее сильно влияют на безопасность взлета, посадки и полета ВС – явления, связанные с мощной (грозовой) конвекцией (гроза, град, ливни, шквал, порывы ветра), те явления, что

понижают видимость до значений ниже категорийных минимумов (осадки, туман и т. п.). Кроме того, для авиации актуальной является информации об изменении высоты нижней границы сплошной облачности, времени перехода температуры через 0 °С, периодах значительных скоростей и порывов ветра и т. п.

Исходя из особенностей предиктантов, часто системы наукастинга бывают локальными, т. е. предназначенными для прогнозирования одного опасного явления (например, сдвига ветра) или неблагоприятной погоды в конкретный сезон (условия «зимней погоды»), либо универсальными, дающими информацию о любых неблагоприятных явлениях в любое время года.

Применяемые в мировой практике методы сверхкраткосрочного прогноза и наукастинга преимущественно основаны на статистической обработке рядов данных о предикторах (в качестве которых используются измерения с дискретностью 10–30 мин на аэродроме и на достаточно большом числе окрестных станций, а также модельные прогностические величины и данные дистанционных измерений, прежде всего с помощью радаров и спутников) и о предиктантах, охарактеризованных выше.

Разработка таких методов производится как в крупных метеорологических центрах, так и в подразделениях, непосредственно занятых обеспечением авиации, в том числе на международных аэродромах с интенсивным воздушным движением. Обычной практикой в системах наукастинга является формулировка вероятностных прогнозов, где в качестве предикторов привлекаются ансамблевые численные прогнозы. Это достигается с помощью ансамбля моделей и/или вариантов одной и той же модели, отличающихся либо слегка измененными начальными условиями, либо другими характеристиками. Каждый член ансамбля (количество их обычно составляет несколько десятков) производит прогностические поля, в которых имеются различия. Повторяемость в пределах ансамбля различных градаций какого-либо явления затем интерпретируется как оценка вероятности возникновения этих градаций в реальных условиях.

При наличии достаточных вычислительных ресурсов и необходимой исходной информации технология наукастинга с помощью ансамблевого прогнозирования разрабатывается для конкретных аэродромов. Такая система, например, развита для аэропорта Шарль де Голль (Париж, Франция) с целью прогнозирования эпизодов понижения высоты нижней границы облачности ниже 60 м и видимости менее 600 м с заблаговременностью 0–12 ч.

1.12. СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТЕО- И ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ

1.12.1. Гидрологические модели

Гидрологическое моделирование – это упрощённое, абстрактное представление части гидрологического цикла. Гидрологические модели в основном используются для прогнозирования, а также для понимания гидрологических процессов. Для детального анализа гидрологического

моделирования необходимо рассмотреть некоторые примеры моделей. Речной бассейн может рассматриваться как динамическая система с сосредоточенными (т. е. неизменными в пределах бассейна) параметрами, которые преобразуют входные факторы – жидкие осадки и снеготаяние – в гидрограф стока с бассейна. Такой же подход принимается и для участка реки, кроме случаев, когда приток в точке или точках выше по течению реки должен трактоваться как дополнительный входной фактор.

Концептуальные модели. Такой подход к моделированию, включающий решение систем уравнений, в основу которых положены различные концепции описания физических процессов формирования стока. Одним из наиболее трудных аспектов применения концептуальных моделей является калибровка выбранной модели применительно к конкретному водосбору. Большинство параметров модели определяются итерационным способом, вручную или автоматически, на основе исторических рядов входных и выходных данных.

Из-за ограниченности данных, несовершенства модели и наличия внутренних связей между параметрами даже небольшое увеличение их количества способно значительно повысить трудности, связанные с калибровкой модели. Поэтому необходимо, чтобы число параметров соответствовало степени достоверности исходных данных и требуемой точности. Несколько концептуальных моделей включены в Гидрологическую оперативную многоцелевую систему (ГОМС) ВМО.

Модель Сакраменто. Модель Сакраменто была разработана в Центре речных прогнозов Национальной службы погоды США в Сакраменто, штат Калифорния. Эта модель включает сложный алгоритм расчета влажности почвы, предназначенный для получения значений объемов нескольких компонентов речного стока, в то время как достаточно простой и почти полностью эмпирический подход используется для преобразований этих входных данных в гидрограф стока. Почвенная толща разделена на две части — верхнюю зону и нижнюю зону, каждая из которых имеет емкости для капиллярной и свободной воды. Капиллярная вода тесно связана с почвенными частицами и извлекается из почвы только в процессе испарения. Гравитационная вода, согласно принятому условию, стекает в процессе дренирования вертикально вниз и в горизонтальном направлении. Размеры емкостей для капиллярной и гравитационной воды в каждой зоне рассматриваются в качестве модельных параметров. Вода, поступившая в зону, суммируется с запасом капиллярной влаги до тех пор, пока не превысит капиллярную влагоемкость; излишек воды в этом случае идет на пополнение запаса свободной воды. Одна часть осадков любого вида немедленно поступает в русловую систему в виде прямого стока. Это те осадки, которые выпадают в пределах русловой системы, а также на прилегающих водонепроницаемых площадях. Размеры этих площадей в модели изменяются во времени. Как дождевые осадки, так и осадки, образовавшиеся в результате снеготаяния, кроме тех, которые перешли непосредственно в прямой сток, проникают в верхнюю зону. Гравитационная вода в верхней зоне расходуется либо на

внутрипочвенный сток, либо на фильтрацию в нижнюю зону. Если пополнение влаги в верхней зоне происходит быстрее ее истощения, излишек воды расходуется на поверхностный сток. Свободная вода в нижней зоне перераспределяется между первичной (медленный дренаж) и вторичной ёмкостями. Фильтрация из верхней зоны в нижнюю определяется по уравнению:

$$PRATE = PBASE \left[1 + ZPERC * RDC^{REXP} \right] \frac{UZFWC}{UZFWM},$$

где PRATE — скорость фильтрации; PBASE – скорость, с которой будет происходить фильтрация в случае насыщения нижней зоны и при неограниченном запасе влаги в верхней зоне. Численно она равна максимальной скорости оттока из нижней зоны и рассчитывается как сумма запасов свободной воды в первичной и вторичной емкостях, каждый из которых умножается на свой коэффициент оттока. RDC – отношение дефицита влаги нижней зоны к влагоемкости. То есть $RDC = 0$, когда нижняя зона полностью насыщена, и $RDC = 1$, когда она полностью сухая. ZPERC – параметр модели, который определяет диапазон изменений скорости фильтрации.

При неограниченной подаче свободной воды в верхнюю зону скорость фильтрации будет изменяться от PBASE (нижняя зона насыщена) до $PBASE (1 + ZPERC)$, когда нижняя зона опорожнена. REXP – параметр модели, определяющий форму кривой зависимости между максимальным и минимальным значениями скорости фильтрации, указанными выше. UZFWC — содержание свободной влаги в верхней зоне. UZFWM — влагоемкость верхней зоны. Отношение $UZFWC/UZFWM$, является движущей силой влагообмена в верхней зоне.

Резервуарная модель. Эта модель разработана в Национальном исследовательском центре по предотвращению стихийных бедствий в Токио, Япония (Sugawara and others, 1974).

Как следует из названия модели, почвенная толща представляется в виде системы резервуаров, расположенных один над другим. Предполагается, что все дождевые осадки и талые воды поступают в самый верхний резервуар. Каждый резервуар имеет одно выпускное отверстие в дне и одно или два боковых отверстия, расположенных на некотором расстоянии от дна. Вода, вытекающая через донное отверстие любого из резервуаров, поступает в следующий нижележащий резервуар; исключение составляет самый нижний резервуар, т. к. поступившая в него вода является потерей для системы. Вода, вытекающая из любого резервуара через боковое отверстие (боковой сток), рассматривается как входной импульс по отношению к русловой системе.

Количество и размер резервуаров, а также расположение выходных отверстий являются параметрами модели. Описанная конфигурация резервуаров применяется для моделирования процесса «осадки–сток» во влажных районах; для бассейнов, расположенных в аридных и полуаридных районах, требуется более сложное расположение резервуаров. Если для каких-

либо водосборов характерны продолжительные засушливые периоды, то в модель включаются два или более параллельно расположенных рядов резервуаров. Сток из самого нижнего резервуара каждого ряда соответствует стоку из отдельного резервуара в простой резервуарной модели.

Из самых верхних резервуаров каждого ряда дополнительно предусмотрен боковой сток непосредственно в русловую сеть. Предполагается, что каждый ряд резервуаров представляет определенную зону водосбора, причем самый нижний соответствует зоне, ближайшей к русловой сети. По мере изменения гидрологических условий от влажных к засушливым в зависимости от сезона, зона, ближайшая к русловой сети, может оставаться относительно влажной, в то время как более удаленная зона становится достаточно сухой.

Разработчики модели не считают, что представленное описание ёмкостных элементов модели является совершенно реалистичным, скорее принятое расположение резервуаров является приближением к методу конечных разностей. Более того, математические выражения, описывающие движение воды через резервуары, имеют сходство с классическими концепциями гидрологии.

Математическое моделирование в гидрологии обычно было представлено моделями с сосредоточенными параметрами, постоянными для всего водосбора. Однако недавно были разработаны некоторые модели с полураспределенными и распределенными параметрами. Они предназначены для более надежного описания природных гидрологических процессов и поэтому могут включать некоторые метеорологические переменные и параметры водосбора.

Эти модели позволяют получать ряды данных о поверхностном стоке, характеристиках качества воды и расходах грунтовых вод. Основными входными данными в таких моделях являются ряды по дождевым осадкам, но могут использоваться данные о снегозапасах, температуре, радиации, потенциальном суммарном испарении и т. д.

Модели для урбанизированных водосборов могут включать описание дренажной сети. Модели для водосборов, подверженных сельскохозяйственному использованию, могут включать единичные гидрографы, распределения площадей по времени добегания или кривые трансформации стока.

WRF-Hydro. WRF-Hydro, модель с открытым исходным кодом, которая используется для ряда проектов, включая прогнозирование ливневых паводков, оценку воздействия регионального гидроклимата, сезонное прогнозирование водных ресурсов и исследования взаимосвязи между сушей и атмосферой. Система гидрологического моделирования моделей погодных исследований и прогнозирования (WRF-Hydro) была разработана как основанная на сообществе основанная на открытом исходном коде структура объединения моделей, предназначенная для связи многомасштабных моделей процессов атмосферы и гидрологии суши, чтобы обеспечить:

– возможности многомасштабного и «мультифизического» моделирования «земля-атмосфера» для консервативной, связанной и несвязанной ассимиляции и прогнозирования основных компонентов водного цикла, таких как осадки, влажность почвы, снежный покров, грунтовые воды, речной сток и затопление.

– точный и надежный прогноз речного стока в масштабах (от водосборов верхних вод нулевого порядка до бассейнов континентальных рек и от минут до сезонов).

Выходные данные модели WRF-Hydro могут предоставить прогнозистам и лицам, принимающим решения, местонахождение и время быстрого повышения уровня воды в реке, а также продолжительность паводка и затопления с учетом динамики ландшафта, необходимой для рисков наводнений, таких как изменение земного покрова, а также эффекты контроля инфраструктуры, такой как плотины и водохранилища.

Категория динамических гидрологических моделей очень широка и охватывает полный спектр подходов. Крайними из них являются, с одной стороны, полностью эмпирические подходы типа «черного ящика», не предназначенные для моделирования процессов, происходящих внутри бассейна и определяющих его реакцию, а устанавливающие соответствие потока на входе в бассейновую систему и выходе из нее. Особой категорией моделей типа «черный ящик» являются искусственные нейронные сети. С другой стороны — подходы, предусматривающие решение сложных систем уравнений, базирующихся на физических закономерностях и теоретических концепциях, определяющих гидрологические процессы — так называемые «гидродинамические модели».

1.12.2. Совместное использование

Глобальные модели климата, в основе которых — модели общей циркуляции атмосферы и океана, содержат упрощенную параметризацию процессов гидрологического цикла суши. Это приводит к существенным погрешностям в воспроизведении водного режима речных бассейнов за период имеющихся наблюдений, что, в свою очередь, увеличивает неопределенность оценок возможных будущих изменений водного режима. Перспективы уточнения таких оценок связаны с использованием проверенных по данным наблюдений физико-математических моделей гидрологического цикла речных бассейнов, граничными условиями для которых служат сценарии будущих гидрометеорологических воздействий на речной водосбор.

Способность физико-математических гидрологических моделей воспроизводить характеристики водного режима реки и другие составляющие гидрологического цикла речного бассейна за период наблюдений, которая оценивается в процессе разработки моделей с применением специальных тестов в изменившихся условиях, рассматривается гидрологическим сообществом как необходимое (хотя не достаточное) условие получения физически обоснованных оценок гидрологических последствий изменения климата и снижения неопределенности полученных оценок.

Все большее распространение в последние годы получают методы оценки возможных изменений водного режима крупных рек с помощью гидрологических моделей, в которых в качестве граничных условий задаются сценарии будущих гидрометеорологических воздействий на речной водосбор, рассчитанные с помощью моделей климата.

Эта тенденция связана, с одной стороны, с совершенствованием гидрологических моделей учитывающих региональные особенности гидрологических процессов, с углублением знаний о физических механизмах реакции речных бассейнов на климатические воздействия, с другой стороны – с улучшением пространственного разрешения моделей климата, с его приближением к характерным масштабам изменчивости гидрологических процессов, с повышением точности воспроизведения метеорологических характеристик в приземном слое, с увеличением производительности моделей климата.

Вместе с тем оценкам, основанным на совместном использовании гидрологических и климатических моделей, присуща значительная неопределенность, которая в большей степени связана с изменчивостью рассчитанных по моделям климата данных и с неопределенностью изменений радиационных факторов (эмиссии парниковых газов, вулканических процессов, солнечной активности), чем с неопределенностью гидрологического моделирования. Возможность уменьшения неопределенности расчетных данных климатических моделей связана с заданием в качестве граничных условий гидрологической модели вместо этих данных будущих сценариев гидрометеорологических воздействий на речной водосбор, которые рассчитываются путем преобразования имеющихся рядов метеорологических наблюдений.

Один из методов такого преобразования (в англоязычной литературе – “deltachange method” – далее “DC-метод”) впервые был применен для анализа чувствительности гидрологических систем с помощью физико-математических моделей гидрологического цикла в работе.

Суть метода – в построении искусственных рядов метеорологических переменных путем внесения в фактические ряды этих переменных малых постоянных возмущений, которые соответствуют прогнозируемым изменениям климатических норм соответствующих переменных. При этом считается, что другие вероятностные свойства (внутрисезонная и межгодовая изменчивость, внутрирядные автоковариации и кросс-ковариации между переменными, пространственные ковариационные функции и др.), присущие фактическим рядам этих переменных, не изменятся в будущем; иными словами, линейно трансформированные фактические ряды могут служить приближением проекций изменения климата.

Можно предположить, что такое допущение применимо при большом временном осреднении оцениваемых характеристик водного режима (например, при оценках многолетней нормы стока) и/или при малых горизонтах

прогнозирования, когда вероятностные свойства прогнозируемого климата еще мало отличаются от свойств современного климата.

Однако более определенные выводы о применимости ДС-метода могут быть сделаны при сравнении оценок, полученных с помощью этого метода, с результатами гидрологического моделирования по данным климатических моделей. Каждое озеро обладает особенностями морфометрической, гидрологической, гидрохимической, гидробиологической структуры.

При индивидуальном подходе к изучению гидрологического режима конкретного озера имеет смысл рассматривать его как результат воздействия "формирующих" климатических факторов. Такой схеме соответствует модель динамической системы с климатическими показателями на входе и гидрологическими - на выходе. В работе эти модели используются для оценки реакции озер на различные климатические сценарии. Реализация такого подхода начинается с простейших динамических систем с одним входом и выходом.

Уточнение механизма взаимодействия гидрологического режима озер и климата осуществляется при годовой развертке по среднемесячным данным. На этом этапе модель используется для оценки гидрологического режима озер в условиях изменения климата. Наиболее полно иллюстрируется необходимость учета внутригодового хода климатических и гидрологических процессов. Выполненные расчеты при различных сценариях изменения климата показывают, что только за счет внутригодовой перестройки климатической системы могут произойти существенные изменения гидрологических показателей озер.

1.13. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ

1.13.1. Проблемы численного анализа атмосферных процессов

Центральной проблемой современной теории климата является проблема предсказания изменений климата, вызванных антропогенной деятельностью. В силу специфических особенностей климатической системы, эта проблема не может быть решена традиционными методами, многократно опробованными в естественных науках. Можно констатировать, что главной методологической основой решения данной задачи является в настоящее время численное моделирование климатической системы с помощью глобальных климатических моделей, основой которых являются глобальные модели общей циркуляции атмосферы и океана. Естественно, что формулирование моделей климата требует проведения натурных экспериментов, анализ результатов которых позволяет формулировать все более точные модели конкретных физических процессов, определяющих динамику климатической системы. Однако, такие эксперименты не решают главной задачи - определение чувствительности реальной климатической системы к малым внешним воздействиям.

К важнейшим проблемам современного этапа развития науки относится решение задачи прогноза изменений климата. Согласно оценкам

межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), в последние десятилетия значительный вклад в эти изменения вносит антропогенное воздействие. Не менее важна и естественная изменчивость климата. К наиболее значимым проявлениям собственной изменчивости климатической системы Земли следует отнести Эль-Ниньо – Южное колебание, Северо-Атлантическое колебание, Арктическую осцилляцию. Математически климат определяется как статистический ансамбль состояний, принимаемый климатической системой за достаточно большой интервал времени. Согласно Всемирной метеорологической организации, классический период осреднения составляет 30 лет. В общем случае под ансамблем понимается не только множество состояний, но и некоторая вероятностная мера, заданная на этом множестве и определяющая вероятность того, что система может находиться на некотором подмножестве данного множества.

На проблеме определения климата следует остановиться более подробно, так как многочисленные дискуссии вызываются тем, что люди имеют в виду разные его дефиниции. Вышеприведённое определение подразумевает, что к климатическим характеристикам относятся любые параметры, осреднённые по вероятностной мере (статистические характеристики). В частности, если рассматривать прогноз погоды как расчёт траектории системы на конечном промежутке времени, а под предсказуемостью траектории понимать характерное время сходимости локализованного начального распределения точек в фазовом пространстве, характеризующего ошибки исходного состояния, к равновесному (климатическому) распределению, то эта характеристика, усреднённая по всему ансамблю начальных данных, будет климатической характеристикой. Характерное время определяет чувствительность системы к малым внешним воздействиям. В этом смысле понятия “климатическая модель” и “модель прогноза погоды” должны совпадать. В настоящее время при естественных ограничениях, обусловленных большой разницей во временных масштабах интегрирования, модели сильно различаются точностью пространственно-временной аппроксимации (выбором пространственного и временного разрешения) и, как следствие, также описанием процессов подсеточного масштаба.

Проблемы воспроизведения и прогноза изменений климата, в отличие от классических проблем физики, имеют свою особенность: они не допускают прямого физического эксперимента. Более того, в силу специфических характеристик климатической системы (например, атмосфера и океан – это тонкие плёнки), лабораторные эксперименты представляются также весьма проблематичными. Для детального изучения реальной климатической системы имеется лишь ограниченный набор параметров траектории системы протяжённостью в несколько десятков лет, в течение которых проводились достаточно полные натурные измерения.

Дальнейшее развитие климатических моделей и методов прогноза погоды связано с повышением пространственного разрешения и совершенствованием физических параметризаций процессов подсеточных масштабов. Уровень

пространственного разрешения и в значительной степени сложность физических параметризаций лимитируются производительностью наиболее мощных вычислительных систем (суперкомпьютеров).

Максимальная производительность имеющихся в распоряжении разработчиков климатических моделей вычислительных комплексов (несколько сотен, в лучшем случае тысяч триллионов арифметических операций в секунду) позволяет вести длительные (на сотни лет) расчёты лишь на сетке с разрешением порядка 100 км. Это разрешение не даёт возможности оценивать эффекты изменения климата на региональном уровне, в то время как именно региональные различия в будущем климате представляют особенный интерес.

Для получения региональных прогнозов широко используются мезомасштабные модели с разрешением 1–10 км и размером расчётной области от нескольких сотен до нескольких тысяч километров. Мезомасштабные модели упомянутого разрешения, в свою очередь, не способны явно воспроизводить структуру атмосферных течений с пространственным масштабом менее нескольких километров. Такие течения могут быть воспроизведены методом вихреразрешающего моделирования, который позволяет явно описать нестационарную динамику крупных трёхмерных вихрей, вносящих основной вклад в энергию турбулентных потоков в пограничном слое атмосферы.

Пространственное разрешение вихреразрешающих моделей пограничного слоя атмосферы, в зависимости от типа турбулентного течения, составляет от нескольких метров до нескольких десятков метров, а размеры расчётной области – до нескольких десятков километров. В настоящее время всё более широкое распространение получают петафлопные (10¹⁵ арифметических операций в секунду) вычислительные системы, а в перспективе текущего десятилетия ожидается, что производительность суперкомпьютеров достигнет экзафлопного (10¹⁸ операций в секунду) уровня. Это означает, что глобальные атмосферные модели будут иметь разрешение, характерное для современных мезомасштабных моделей (1–10 км), а шаг сетки моделей, используемых для прогноза атмосферной циркуляции на региональном уровне, составит ~ 100 м. Такое же разрешение (от 1 км до 100 м) будет доступным и для дискретизации уравнений гидротермодинамики по вертикальной координате.

Опыт, полученный японскими исследователями в моделировании глобальных климатических процессов с горизонтальным разрешением 3.5–10 км, заложил основу для активного экспериментирования с моделями очень высокого разрешения и привёл к необходимости разработать стратегию дальнейшего развития климатических моделей с учётом перспектив высокопроизводительных вычислений.

В связи с этим потребуются пересмотр многих параметризаций подсеточных процессов, используемых в современных моделях общей циркуляции атмосферы и океана. В первую очередь это касается параметризации конвекции, поскольку она начинает воспроизводиться явно при разрешениях несколько километров и менее.

Всё большее внимание уделяется созданию “бесшовных” (с улучшенным локальным разрешением и физическим описанием) моделирующих систем, позволяющих в рамках единой вычислительной технологии создать более широкий спектр атмосферных движений.

Переход на очень детальное разрешение не может быть осуществлён «механически» (только за счёт отказа от гидростатического приближения), без масштабной переработки существующих вычислительных технологий и в некоторых случаях переформулировки параметризаций и систем уравнений, использующихся в настоящее время для приближённого описания гидротермодинамики климатической системы, а в перспективе – Земной системы.

1.13.2. Перспективы развития численного моделирования

В последние годы глобальные модели атмосферы развиваются по следующим направлениям. Во-первых, происходит постепенное стирание границ между моделями, предназначенными для численного прогноза погоды, и моделями, предназначенными для моделирования изменений климата. В рамках этого процесса модели обогащаются новыми либо усовершенствованными параметризациями процессов подсеточного масштаба. Во-вторых, в ряде ведущих центров осуществляются проекты по замене блоков решения уравнений динамики атмосферы (разрешаемой явно на данной сетке). В рамках этих проектов также реализуется программная инфраструктура моделей, способная адаптироваться к перспективным архитектурам вычислительных систем. Действительно, в атмосфере не существует искусственных временных границ, разделяющих мезомасштабные, синоптические, сезонные и межгодовые масштабы.

Глобальная модель атмосферы, ориентированная на прогноз в некотором временном диапазоне, должна воспроизводить процессы всех временных масштабов. В этом заключается идея бесшовного прогноза, впервые сформулированная в 2005 году. Часто это влечет за собой необходимость подключения к модели атмосферы новых компонентов в Земной системы (океана, морского льда, деятельного слоя почвы, малых газовых составляющих и т. д.).

Ведущие прогностические центры – Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды, метеослужба Великобритании уже в ближайшие годы планируют применять совместные модели атмосферы, океана, морского льда для среднесрочного прогноза погоды. Отметим, что развитие систем бесшовного прогноза в настоящее время является одной из главных задач Всемирной метеорологической организации.

Стирание границ между моделями прогноза погоды и моделями климата означает, среди прочего, что в модели прогноза погоды постепенно включают блоки переноса и трансформации (химических реакций, осаднения, коагуляции и т.д.) малых газовых составляющих и аэрозолей. Климатические модели, в свою очередь, включают параметризации процессов подсеточного масштаба, которые ранее считались важными лишь для краткосрочного прогноза погоды.

Например, в климатическую модель атмосферы CAM5 (Community Atmospheric Model), развиваемую консорциумом во главе с Национальным центром атмосферных исследований США (эта модель является частью совместной модели Земной системы CESM1), включают продвинутую параметризацию микрофизических процессов в облаках с прогностической концентрацией дождевых капель и снежинок, планируется усовершенствование параметризации торможения гравитационных волн в атмосфере.

Такие параметризации широко и достаточно давно применяются в моделях численного прогноза погоды. Большинство центров планирует повысить горизонтальное и вертикальное разрешение используемых моделей в ближайшие годы.

Некоторые центры планируют использовать в оперативной практике совместные модели атмосферы, океана и морского льда даже для среднесрочного прогноза погоды. Это потребует повышения производительности применяемых вычислительных систем примерно на порядок.

Крайне важным вопросом при этом является эффективное использование таких массивно-параллельных систем. В связи с этим в ряде ведущих центров начались работы по созданию перспективных глобальных моделей, чьи программные комплексы могли бы масштабироваться на десятки и сотни тысяч процессорных ядер. В немецкой метеослужбе такой проект был успешно завершён в 2014 году: была реализована глобальная негидростатическая модель на треугольной сетке ICON.

Показано, что программный комплекс ICON масштабируется вплоть до 96000 процессорных ядер. В метеослужбе Великобритании (UK MetOffice) в 2011 году стартовал проект GUNGHO – Global UNstructured Grid Highly Optimized по разработке динамического блока нового поколения. После обширного тестирования различных вариантов сеток и пространственных аппроксимаций для дальнейшей реализации был выбран метод смешанных (миметических) конечных элементов на треугольной сетке.

В рамках проекта значительные усилия прилагаются и к эффективной программной реализации этого блока (подпроект LfRic). Целью проекта является реализация к 2020 г. в оперативном режиме модели, которая бы, в отличие от нынешней версии модели, сохраняла массу переносимых субстанций и позволяла использование до 100000 процессорных ядер. Схожие цели преследует и американский проект разработки глобальной модели атмосферы нового поколения (New Generation Global Prediction System, NGGPS) стартовавший в январе 2015 года под руководством Национальной метеорологической службы (NWS). Согласно, проект посвящён разработке и внедрению Глобальной системы прогнозирования следующего поколения (NGGPS), которая будет легко приспособляема и масштабируема при развитии архитектуры высокопроизводительных вычислительных систем (HPC). Конечной целью разработки NGGPS декларируется повышение полезной заблаговременности прогноза до 30 дней, а также создание

инфраструктуры для развития системы прогноза в течение следующих нескольких десятилетий.

Исследования и разработки ведутся в сотрудничестве с лабораториями Национальной администрации по атмосфере и океану (NOAA), Национальным центром атмосферных исследований (NCAR), а также университетским научным сообществом. Текущая оперативная Глобальная Система Прогноза (GFS) в США основана на Глобальной Спектральной Модели (GSM). Ее динамический блок имеет известные ограничения по масштабируемости и адаптируемости к будущим архитектурам вычислительных систем. Будущая система NGGPS потребует блока решения уравнений динамики атмосферы (т. н. динамического ядра – *dyncore*), который будет негидростатическим, хорошо масштабируемым и архитектурно совместимым с будущими вычислительными системами. В настоящее время в проекте рассматриваются шесть динамических ядер, разработанных участниками проекта. Среди кандидатов, в частности, динамический блок модели MPAS. Выработан протокол тестирования этих блоков.

В Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды также озабочены ограничениями на масштабируемость программного 27 комплекса модели, которые налагает применение спектрального метода решения уравнений динамики атмосферы в силу необходимости одновременной пересылки данных между всеми процессорами (т. н. глобальные коммуникации). В докладах А. Торпа (открытая конференция ВПМИ ВМО), Н. Веди и других сотрудников этого центра в 2014 году приводился любопытный факт: для модели с горизонтальным разрешением порядка 1 км, использующей около 100000 процессов MPI, время выполнения одной такой пересылки примерно равно предельному времени, которое модель может затратить на выполнение всего шага по времени исходя из требований оперативности. В этой связи в ближайшей версии модели ЕЦСПП решено повысить разрешение сетки по горизонтали в два раза без повышения спектрального разрешения (т. н. кубическая сетка, для которой число узлов сетки по кругу широты равно $4N+1$, где N – число гармоник). Численные эксперименты показали, что при этом качество прогноза все равно улучшается. В Европейском центре среднесрочных прогнозов разработан экспериментальный конечно-объемный модуль решения негидростатических уравнений динамики, позволяющий использовать произвольную неструктурированную сетку. Одной из задач при разработке этого модуля являлась определенная совместимость с существующей структурой программного комплекса модели ЕЦСПП.

Численные модели, как правило, содержат большое количество подпрограмм с кодом, понятным вычислительной машине. Результаты вычислений в большинстве случаев визуализируются, т.е. представляются в виде графиков, полей, диаграмм. Избежать ошибок на всех этапах вычислений невозможно. С помощью аккуратного тестирования программ можно скорректировать выдаваемые результаты, однако гарантировать точность вычислений нельзя. Кроме того, точность вычислений определяется (т.е. не

может превышать) точностью чисел с плавающей запятой и количеством разрядов целых чисел, с которыми может работать данная машина. Также нельзя забывать об ошибках округления.

Перспективные модели атмосферы должны будут иметь горизонтальное разрешение порядка нескольких километров. Развитие моделей численного прогноза погоды будет требовать эффективного использования десятков и сотен тысяч процессорных ядер. Поэтому программный комплекс прогностической модели атмосферы должен хорошо масштабироваться на компьютерах с массивно-параллельной архитектурой.

Уменьшение ошибок прогноза может быть достигнуто за счет совершенствования описания (параметризации) процессов подсеточного масштаба, таких как приземный пограничный слой, и повышения пространственного разрешения. Однако повышение пространственного разрешения модели неизбежно влечет уменьшения шага интегрирования по времени. Высокой скорости расчетов в задачах моделирования атмосферы можно достичь при использовании полунеявного полулагранжева подхода к дискретизации уравнений динамики. Полулагранжев подход заключается в рассмотрении движения набора лагранжевых (перемещающихся вместе с воздухом) частиц, приходящих в конце шага по времени в узлы фиксированной вычислительной сетки и дискретизации уравнений на траекториях этих частиц. В полунеявной схеме интегрирования по времени линейные части уравнений динамики атмосферы, отвечающие за распространение быстрых инерционно-гравитационных волн, интегрируются по абсолютно устойчивой неявной схеме.

Глобальные модели общей циркуляции используются для моделирования климата, исследований влияния внешних факторов на климатические вариации на различных временных масштабах, для изучения обратного влияния на атмосферу подстилающей поверхности, покрытой льдами, растительностью и т. п. Тем не менее, они имеют ряд ограничений своей применимости, связанные с недостаточностью разрешения региональных особенностей.

Одним из подходов, который позволяет обойти эти трудности, является моделирование регионального климата. Пространственное разрешение в региональных моделях климата увеличивается так, чтобы можно было явно описать мезомасштабные явления, которые обусловлены, в том числе и мезомасштабными особенностями подстилающей поверхности региона. На боковых границах в качестве краевых условий используются либо результаты глобального анализа наблюдений, либо данные численного моделирования общей циркуляции атмосферы.

1.13.3. Ансамблевый и детерминистический методы численного прогноза погоды

Ансамблевое прогнозирование – это метод, используемый в численном прогнозировании погоды или внутри него. Вместо того, чтобы делать один прогноз наиболее вероятной погоды, составляется набор (или ансамбль) прогнозов. Этот набор прогнозов направлен на то, чтобы указать диапазон возможных будущих состояний атмосферы. Ансамблевое прогнозирование -

это форма анализа Монте-Карло. Множественное моделирование проводится для учета двух обычных источников неопределенности в моделях прогноза: (1) ошибок, вносимых использованием несовершенных начальных условий, усиленных хаотической природой уравнения эволюции атмосферы, которые часто называют чувствительной зависимостью от начальных условий; и (2) ошибки, возникшие из-за недостатков в формулировке модели, такие как приближенные математические методы решения уравнений. В идеале подтвержденное будущее состояние атмосферы должно находиться в пределах прогнозируемого ансамбля spread, а величина разброса должна быть связана с неопределенностью (ошибкой) прогноза. В общем, этот подход можно использовать для создания вероятностных прогнозов любой динамической системы, а не только для прогноза погоды.

Наиболее перспективными и современными методами численного прогноза погоды являются ансамблевые методы. Они позволяют не только более точно прогнозировать состояние атмосферы, но и оценить неопределённость (достоверность) прогноза. В ансамблевом прогнозе, в отличие от детерминированного прогноза, выполняется многократное интегрирование одной или нескольких моделей атмосферы с использованием нескольких наборов «возмущённых» в пределах ошибки наблюдений данных о начальном состоянии атмосферы.

Впервые ансамблевые системы прогноза погоды были внедрены в оперативную практику Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП) и метеорологической службой США в 1992 г., и с тех пор ансамблевые методы постоянно развиваются. Для прогноза метеорологических элементов используют чаще всего ансамбль двух или трёх моделей: для температуры - UKMO (Великобритания), NCEP (США) и REGION (Россия) или UKMO и NCEP; для осадков - UKMO, NCEP и ПЛАВ (Россия) или UKMO и NCEP.

Есть два основных источника неопределенности, которые необходимо учитывать при составлении ансамблевого прогноза погоды: неопределенность начальных условий и неопределенность модели.

Начальные условия неопределенность.

Неопределенность начальных условий возникает из-за ошибок в оценке начальных условий для прогноза, как из-за ограниченных наблюдений за атмосферой, так и из-за неопределенностей, связанных с использованием косвенных измерений, таких как спутниковые данные, для измерения состояния атмосферных переменных. Неопределенность начальных условий представлена нарушением начальных условий между различными элементами ансамбля. Это исследует диапазон начальных условий, соответствующих нашим знаниям о текущем состоянии атмосферы, а также ее прошлой эволюции. Есть несколько способов генерировать эти возмущения начальных условий. Модель ECMWF, система ансамблевого прогнозирования (EPS), использует комбинацию сингулярных векторов и ансамбль ассимиляции данных (EDA) для имитации начальной плотности вероятности. Возмущения

сингулярного вектора более активны во внетропиках, а возмущения EDA более активны в тропиках. Ансамбль NCEP, Глобальная система ансамблевого прогнозирования, использует метод, известный как векторное разведение.

Неопределенность модели

Неопределенность модели возникает из-за ограничений модели прогноза. Процесс представления атмосферы в компьютерной модели включает в себя множество упрощений, таких как разработка схем параметризации, которые вносят ошибки в прогноз. Было предложено несколько методов для представления неопределенности модели.

Схемы возмущенных параметров

При разработке схемы параметризации вводится много новых параметров для представления упрощенных физических процессов. Эти параметры могут быть очень неопределенными. Например, «коэффициент уноса» представляет турбулентное перемешивание сухого окружающего воздуха в конвективное облако и, таким образом, представляет собой сложный физический процесс с использованием одного числа. В подходе с возмущенными параметрами неопределенные параметры в схемах параметризации модели идентифицируются, и их значение изменяется между членами ансамбля. В то время как в вероятностном моделировании климата, таком как climprediction.net, эти параметры часто поддерживаются постоянными глобально и на протяжении всей интеграции, в современных численных прогнозах погоды более распространено стохастическое изменение значений параметров во времени и Космос. Степень возмущения параметра можно определить с помощью экспертной оценки или путем непосредственной оценки степени неопределенности параметра для данной модели.

Стохастическая параметризация

Традиционная схема параметризации стремится представить средний эффект движения субсеточного масштаба (например, конвективные облака) на разрешенное состояние масштаба (например, крупномасштабные поля температуры и ветра). Схема стохастической параметризации признает, что может быть много состояний масштаба подсетки, совместимых с конкретным разрешенным состоянием масштаба. Вместо прогнозирования наиболее вероятного движения в масштабе подсетки схема стохастической параметризации представляет одну возможную реализацию подсетки. Это достигается путем включения случайных чисел в уравнения движения. Это выборка из распределения вероятностей, присвоенного неопределенным процессам. Стохастическая параметризация значительно улучшила навыки моделей прогнозирования погоды и теперь используется в центрах оперативного прогнозирования по всему миру. Стохастические параметризации были впервые разработаны в Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды.

Многомодельные ансамбли

Когда для создания прогноза используется много разных моделей прогнозов, такой подход называется многомодельным. ансамблевое

прогнозирование. Этот метод прогнозирования может улучшить прогнозы по сравнению с подходом на основе одной модели. Когда модели в многомодельном ансамбле корректируются с учетом их различных смещений, этот процесс известен как «суперсамблевое прогнозирование». Этот тип прогноза значительно снижает количество ошибок в выходных данных модели. Когда модели различных физических процессов комбинируются, например, комбинации моделей атмосферы, океана и волн, многомодельный ансамбль называется гипер-ансамблем.

Ансамблевой прогноз обычно оценивается путем сравнения среднего значения отдельных прогнозов для одной переменной прогноза с наблюдаемым значением этой переменной («ошибка»). Это сочетается с учетом степени согласия между различными прогнозами в рамках ансамблевой системы, которая представлена их общим стандартным отклонением или «разбросом». Разброс ансамбля можно визуализировать с помощью таких инструментов, как спагетти-диаграммы, которые показывают разброс одной величины на прогностических диаграммах для определенных временных шагов в будущем.

Другой инструмент, в котором используется ансамблевый разброс, - это метеограмма, которая показывает разброс прогноза одной величины для одного конкретного местоположения. Обычно разброс по ансамблю слишком мал, так что наблюдаемое состояние атмосферы выходит за рамки ансамблевого прогноза. Это может привести к излишней уверенности прогнозиста в своем прогнозе. Эта проблема становится особенно серьезной для прогнозов погоды примерно на 10 дней вперед, особенно если в прогнозе не учитывается неопределенность модели.

Надежность и разрешающая способность (калибровка и резкость)

Разброс ансамблевого прогноза показывает, насколько уверенным прогнозист может быть в своем прогнозе. Когда разброс по ансамблю невелик и решения прогноза согласованы в рамках нескольких прогонов модели, прогнозисты воспринимают прогноз в целом с большей уверенностью. Когда разброс большой, это указывает на большую неопределенность в прогнозе. В идеале должна существовать взаимосвязь «разброс – квалификация», при которой разброс ансамбля является хорошим предиктором ожидаемой ошибки среднего ансамбля. Если прогноз надежный, наблюдаемое состояние будет вести себя так, как если бы оно было получено из распределения вероятностей прогноза. Надежность (или калибровку) можно оценить путем сравнения стандартного отклонения ошибки в среднем по ансамблю с разбросом прогноза: для надежного прогноза они должны совпадать как в разное время выполнения прогноза, так и для разных мест.

Также можно оценить надежность прогнозов конкретного погодного явления. Например, если 30 из 50 участников указали, что количество осадков превышает 1 см в течение следующих 24 часов, вероятность превышения 1 см может быть оценена как 60%. Прогноз будет считаться надежным, если, учитывая все прошлые ситуации, когда прогнозировалась 60%-ная вероятность, в 60% этих случаев количество осадков действительно превышало

1 см. На практике вероятности, полученные на основе оперативных ансамблевых прогнозов погоды, не обладают высокой надежностью, хотя с набором прошлых прогнозов (повторных или ретроспективных) и наблюдений оценки вероятности из ансамбля могут быть скорректированы для обеспечения большей надежности.

Еще одно желаемое свойство ансамблевых прогнозов - разрешающая способность. Это показатель того, насколько прогноз отклоняется от частоты климатологических событий – при условии, что ансамбль надежен, увеличение этого отклонения повысит полезность прогноза. Это качество прогноза также можно рассматривать с точки зрения резкости или того, насколько мал разброс прогноза. Ключевой целью синоптика должно быть максимальное повышение резкости при сохранении надежности. Прогнозы на длинных шагах неизбежно не будут особенно точными (с особенно высоким разрешением), поскольку неизбежные (хотя обычно небольшие) ошибки в начальных условиях будут расти с увеличением опережения прогноза до тех пор, пока ожидаемая разница между двумя состояниями модели не станет такой же большой, как разница между двумя случайными состояниями из климатологии модели прогноза.

Калибровка ансамблевых прогнозов

Если ансамблевые прогнозы должны использоваться для предсказания вероятностей наблюдаемых метеорологических переменных, они обычно нуждаются в калибровке для создания объективных и надежных прогнозов. Для прогнозов температуры одним простым и эффективным методом калибровки является линейная регрессия, часто известная в этом контексте как Статистика выходных данных модели. Модель линейной регрессии принимает среднее по ансамблю в качестве предиктора для реальной температуры, игнорирует распределение членов ансамбля вокруг среднего и прогнозирует вероятности, используя распределение остатков из регрессии. В этой настройке калибровки значение ансамбля в улучшении прогноза состоит в том, что среднее по ансамблю обычно дает лучший прогноз, чем любой отдельный член ансамбля, и не из-за какой-либо информации, содержащейся в ширине или форме распределения элементов в ансамбль вокруг среднего. Однако в 2004 г. было введено обобщение линейной регрессии (теперь известное как Неоднородная Гауссовская регрессия), в котором используется линейное преобразование ансамблевого разброса для получения ширины прогнозируемого распределения, и было показано, что это могут давать более точные прогнозы, чем прогнозы, основанные только на линейной регрессии. Это впервые доказало, что информация в виде распределения членов ансамбля вокруг среднего, в данном случае суммированного разбросом ансамбля, может быть использована для улучшения прогнозов относительно линейной регрессии. То, можно ли преодолеть линейную регрессию с помощью ансамблевого разброса таким образом, зависит от системы прогноза, переменной прогноза и времени выполнения заказа.

Прогнозирование размера изменений прогноза

Помимо использования для улучшения прогнозов неопределенности, разброс ансамбля также может использоваться в качестве предиктора вероятного размера изменений в среднем прогнозе от один прогноз к другому. Это работает, потому что в некоторых системах ансамблевых прогнозов узкие ансамбли имеют тенденцию предшествовать небольшим изменениям среднего значения, в то время как широкие ансамбли имеют тенденцию предшествовать более значительным изменениям среднего значения. Это имеет применение в торговых отраслях, для которых может быть важно понимание вероятных размеров будущих изменений прогнозов.

Эксперимент по исследованию и предсказуемости системы наблюдений (THORPEX) - это 10-летняя международная программа исследований и разработок, направленная на ускорение повышения точности от одного дня до двух недель. прогнозы погоды со значительными воздействиями на благо общества, экономики и окружающей среды. Он устанавливает организационную основу для решения проблем погодных исследований и прогнозов, решение которых будет ускорено за счет международного сотрудничества между академическими учреждениями, центрами оперативных прогнозов и пользователями прогностической продукции.

Одним из его ключевых компонентов является Интерактивный большой глобальный ансамбль THORPEX (TIGGE), всемирная программа погодных исследований, призванная ускорить повышение точности прогнозов погоды со значительными воздействиями от 1 дня до 2 недель. прогнозы на благо человечества. Централизованные архивы данных прогнозов ансамблевых моделей из многих международных центров используются для обеспечения широкого обмена данными и проведения исследований.

Детерминизм – это принцип, в котором каждое событие является неизбежным результатом предшествующих ему событий, соблюдение причинно-следственной связи. Среди потребителей прогнозов есть укоренившееся мнение, о том, что суть хорошего и правильного прогнозирования погоды в том, что синоптик должен дать точный, определенный прогноз на конкретное географическое место и на конкретное время. Если синоптик вдруг ошибается, или если он не может сделать уверенный прогноз погоды - то мы считаем, что он плохо выполняет свою работу. Детерминированные прогнозы осуществляются на основе чисто локальной информации, поступающей в обработку непосредственно от контролируемого (изучаемого) объекта. В линейных детерминированных системах действует принцип суперпозиции (наложения), согласно которому суммарный коррозионный эффект от действия нескольких входных воздействий равен сумме эффектов от действия каждого входного воздействия в отдельности.

Проведение учебных занятий сопровождается презентациями в формате PDF (Приложение 1).

Литература по теме:

1. Матвеев Л.Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1965. – С.5-365.
2. Лекции по численным методам краткосрочного прогноза погоды. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – С. 637–700.
3. Гандин Л.С. Объективный анализ метеорологических полей. – Л.: Гидрометеиздат, 1963.
4. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д. Численные прогнозы по негидростатическим моделям общего пользования WRF-ARW и WRF-NMM // 80 лет Гидрометцентру России. – М. : Триада ЛТД, 2010. – С. 94–135.
5. Вельтищев Н.Ф., Степаненко В.М. Мезометеорологические процессы – М.: 2006. – 104 с.
6. Аргучинцев В.К. Динамика атмосферы – Иркутск: 2006. – 130 с.
7. Берлянт А.М. Геоиконика. - М.: 1996
8. Кошкарев А.В., Тикунов В.С. Геоинформатика / Под.ред. Лисицкого Д.В. - М.: Картгеоцентр - Геодезиздат, 1993.
9. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли - М.: Мир, 1988.
10. Крэкнелл А.П. Дистанционное зондирование в метеорологии, океанографии и гидрологии - М.: Мир, 1984.

2. ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

2.1. ВЕРИФИКАЦИЯ ДАННЫХ РАСЧЕТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Лабораторная работа состоит из двух частей и рассчитана на выполнение в течение 4 часов.

Часть 1. Анализ результатов реальных данных и данных модельных расчетов по приведенным примерам (cases)

Цель работы: научить практически анализировать и сопоставлять результаты метеонаблюдений (синоптического описания ситуации и прогноза) с результатами проведенного численного моделирования в системе WRF.

Поскольку расчет и визуализация проводятся в системе Linux и занимают определенное время, студентам для анализа предоставляются данные расчета, выполненные предварительно в соответствии с выбранной погодной ситуацией («кейсом»).

Выполнение работы:

Сравнить реальные данные метеонаблюдений и результаты численного моделирования на примере одно из метеоявлений и провести анализ возможностей применения численного анализа для данного атмосферного явления (что получилось, что получилось недостаточно точно, возможные причины расхождения результатов, анализ примененных микрофизик, пути улучшения и т.д.).

План выполнения:

Тема: (дается предварительный анализ выбора темы)

Цель: (формулирование цели исследования – какое метеоявление будет исследоваться и что в нем интересного для исследования)

Методы: (какие данные нужны для анализа явления).

Задания на выполнение работы по теме:

- 1) Дать подробное описание метеорологического явления и его территориального распространения (на какой территории) и временного периода развития;
- 2) Описание реальных данных (с сайта погоды взять на конкретное число) – выбрать точки (или изображения) для сопоставления с расчетными данными;
- 3) Описание полученных модельных данных, анализ такой же как в п. 2);
- 4) Сравнительный анализ реальных и модельных данных;
- 5) Выводы о возможности совместного использования данных реальных и модельных данных для численного анализа атмосферных процессов.

Варианты: на начальном этапе в работе предусмотрено сопоставление отдельных метео параметров (по выбору преподавателя, или студента):

Вариант 1. Анализ температурных данных

Вариант 2. Анализ данных ветра

Вариант 3. Анализ облачности

Вариант 4. Анализ данных давления

Часть 2. Анализ результатов расчетных и модельных данных

План выполнения (аналогичен части 1):

Тема: (дается предварительный анализ выбора темы)

Цель: (формулирование цели исследования – какое метеоявление будет исследоваться и что в нем интересного для исследования)

Методы: (какие данные нужны для анализа явления).

Задания в отличие от Части 1 проводится полный анализ метеорологической ситуации с использованием всех доступных параметров (облачность, осадки, вертикальные профили и т.п.):

- 1) Описание метеорологического явления и его территориального распространения (на какой территории);
- 2) Описание расчетных данных (с прикрепленных карт);
- 3) Описание модельных данных;
- 4) Сравнительный анализ расчетных и модельных данных;
- 5) Выводы о возможности совместного использования данных расчетных и модельных данных для численного анализа атмосферных процессов.

Приветствуется, если на данном этапе будет применен какой-либо программный продукт для сравнительного анализа, использованы индексные или разностные изображения. Возможно использование приложения MET – это приветствуется и оценивается особо.

По итогу студенты прикрепляют или высылают на почту преподавателю выполненную работу в электронном виде!

2.2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПРЕД-ПРОЦЕССНОЙ ПОДГОТОВКИ И ПОСТОБРАБОТКИ ДАННЫХ В СИСТЕМЕ WRF

Лабораторная работа по двум заданиям, рассчитанным на выполнение в течение 4 часов

Задание № 1

- 1) Скачать из интернета приложение «WRF Domain Wizard» for Windows, находящееся в свободном доступе.

Начать можно с сайта (есть и другие):

<https://www.esrl.noaa.gov/gsd/wrfportal/DomainWizard.html>

- 2) Установить у себя на компьютере и ознакомиться с его работой.

Задание № 2

- 1) Практически освоить формирование input-файлов с помощью WRF Domain Wizard.
- 2) Ознакомиться с возможностями визуализации выходных файлов wrf

3) Пользуясь WRF Domain Wizard и файлами, рассчитанными для проекта, попробовать осуществить их визуализацию.

Рекомендация: Воспользоваться сведениями из файла Дополнение 2 к предыдущей лекции.

Цель и результат выполнения работы – приобретение практических навыков для работы с современными методами автоматизации расчетов в системе WRF.

Оценка работы – устный опрос и обсуждение результатов.

2.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАРТОГРАФИЧЕСКОЙ ПРОЕКЦИИ ПО СПУТНИКОВЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Цель работы: Ознакомиться с картографическими проекциями, используемыми для географической привязки и представления результатов спутниковых (орбитальных) систем наблюдения.

Содержание: Практически изучить виды картографических проекций, применяемых для географической привязки орбит спутников и спутниковых изображений

Задание:

1. Изучить виды картографических проекций (вспомнить) и дать их подробную характеристику.

2. Описать основные принципы применения картографических проекций для максимально точной привязки различных географических регионов. Проанализировать характер основных искажений.

3. Определить географические проекции, которые используются для представления спутниковых данных в виде картированных изображений на любых известных сайтах, а также привести пример сайта.

Подтвердить результаты определения примерами изображений с данных и др. сайтов

4. Сделать выводы о применении картографических проекций в спутниковой метеорологии.

5. Ответить на контрольные вопросы:

– Какие картографические проекции применяют для визуализации трасс спутников и почему?

– Как осуществляется географическая привязка спутниковых изображений? Перечислить основные этапы привязки.

– Перечислить основные источники геометрических искажений, возникающих при съемке спутниковых изображений и методы их устранения?

2.4. РАЗРАБОТКА ФАЙЛА ВХОДНЫХ ДАННЫХ, ОТВЕЧАЮЩИХ ЗА ПРЕ-ПРОЦЕССНУЮ ПОДГОТОВКУ РАСЧЕТА СИСТЕМЫ WRF

Цель работы: Практически освоить работу с файлами входных данных используемыми в системе WRF.

Содержание: Сформировать входные файлы, обеспечивающие необходимые параметры рабочего домена и статических параметров подложки системы WRF

Задание:

- 1) Раскрыть понятие входных данных. Дать характеристику входным данным;
- 2) Выбрать картографическую проекцию и обосновать свой выбор;
- 3) Анализ домена предлагаемой территории;
- 4) На основе приведенных примеров разработать input файлы для построения и характеристики домена по региональным центрам Беларуси;
- 5) Проанализировать полученный файл и его географическую привязку.

Варианты (построить входные домены, с центрами в основных областных городах Республики Беларусь): 1) Минск; 2) Гомель; 3) Гродно; 4) Могилев; 5) Витебск; 6) Брест.

2.5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СКРИПТОВ NCL ДЛЯ АНАЛИЗА МЕТЕОУСЛОВИЙ

Цель работы: Практически освоить работу с системой визуализации и анализа результатов численного моделирования, используемой в системе WRF.

Содержание:

Для анализа метеоусловий на рассматриваемой территории студентам необходимо с сайта NCL NCARG скачать скрипты (образцы сценариев) и графики (картинки) метеоявлений, в соответствии с выбранным вариантом задания, описать их, проанализировать возможности использовать данные сценарии для численного анализа метеоусловий.

Привести подробное описание возможности использования данных скриптов для каждого метеоявления (как использовать, что необходимо изменить и т.д.).

По итогу студенты прикрепляют выполненное задание на образовательную платформу в виде файла, который включает пример сценариев для метеоявлений, графические материалы выбранных метеоявлений (картинки находятся там же, где примере сценариев) описание сценариев и графического материала, их анализ и возможности использования.

Варианты заданий (визуализация пространственного распределения метеопараметров):

Для всех случаев дать характеристику выбранного метеопараметра (что характеризует, как определяется, в каких единицах измеряется, зачем он нужен – как используется)

- Давление и высота изобарической поверхности;
- Вращательные движения, вихри (Helicity и Vorticity);
- Температура воздуха и вертикальный профиль;
- Поля скоростей ветра и вертикальные сечения.

3. РАЗДЕЛ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ

3.1. Общие правила

В течение учебного периода по изучению дисциплины «Численный анализ атмосферных процессов» проводятся индивидуальные консультации. Основными видами занятий являются лекции, семинарские, практические и лабораторные занятия. Лекционные занятия проводятся в форме информационных сообщений с максимальным использованием раздаточного материала и средств мультимедиа. Практические и лабораторные занятия проводятся в форме семинаров-практикумов, дискуссий, индивидуальных выступлений-презентаций студентов, решения поставленных задач, расчетов погодных условий с применением компьютерных средств. Для промежуточной и итоговой диагностики знаний и компетенций студента по учебной дисциплине возможно применение следующего диагностического инструментария: письменный тестовый опрос; устный индивидуальный опрос; устный фронтальный опрос; аудиторный контрольный диктант; тематические презентации; индивидуальные и групповые расчетно-графические работы. Для оценки знаний по дисциплине применяются следующие виды контроля знаний: Текущий контроль: оценка активности работы студента на семинарах и лабораторных - проведение экспресс-опросов, выполнение индивидуальных заданий, расчетные работы. Промежуточный контроль: оценка знаний студентов с помощью проведения промежуточных тестов, контрольных диктантов. Итоговый контроль: итоговая оценка по результатам выполнения практических, устных ответов студентов, подготовки рефератов, проведение итогового экзамена. Используется рейтинговая оценка знаний студента, дающая возможность проследить и оценить динамику процесса достижения целей обучения. Рейтинговая система по курсу «Численный анализ атмосферных процессов» предполагает систематическую работу студентов на протяжении семестра и учитывает: посещаемость занятий, правильность и своевременность выполнения практических и лабораторных работ, качество ответа на семинарских занятиях и инициативность студента. Выполнение практикума считается обязательным основанием для допуска к экзамену. Результат рейтинга студента учитывается при выставлении итоговой оценки на экзамене.

Итоговая оценка формируется на основе: Правил проведения аттестации студентов, утвержденных Постановлением Министерства образования Республики Беларусь № 53 от 29 мая 2012 г.; Положения о рейтинговой системе оценки знаний, разработанного в Белорусском государственном университете (Приказ ректора БГУ № 382–ОД от 18.08.2015г.), критериям 48 оценки знаний и компетенций студентов, утвержденных приказом Министерства образования Республик Беларусь № 21–04–1/105 от 22.12.2003г.

3.2. Примерный перечень вопросов к экзамену и зачету

1. Современное состояние теории и практики анализа и прогноза погоды.
2. Физические основы численного моделирования погоды и климата. Общая характеристика типов применяемых моделей.
3. Наземные методы исследования параметров атмосферы, земной поверхности и метеорологических явлений.
4. Орбитальные методы исследования атмосферных процессов, параметров атмосферы и подстилающей поверхности.
5. Общая характеристика основных наблюдаемых метеорологических явлений. Понятие о временных и пространственных масштабах атмосферных процессов.
6. Моделирование атмосферных процессов различных масштабов. Связь между пространственными и временными масштабами при выборе моделей различных типов.
7. Процессы глобальной циркуляции атмосферы и океана. Современные глобальные модели анализа и прогноза атмосферных процессов.
8. Региональные модели краткосрочного и среднесрочного прогноза погодных явлений.
9. Проблемы долгосрочного прогноза погоды. Обобщенные модели процессов атмосферы и океана.
10. Погода и климат. Проблемы прогноза изменений климата. Общая характеристика климатических моделей.
11. Моделирование атмосферных процессов среднего масштаба. Основные принципы разработки детерминистических моделей погоды.
12. Классификация и общая характеристика атмосферных процессов среднего (мезо) и малого (микро) масштабов. Связь пространственных и временных масштабов погодных явлений.
13. Использование данных глобальных моделей в качестве начальных и граничных условий мезомасштабных моделей. Система GFS, форматы данных, работа с архивом.
14. Микрофизические процессы. Понятие процессов и явлений, «подсеточных» для основного (мезо) масштаба.
15. Модель численного прогноза мезомасштабных атмосферных процессов WRF (Общая характеристика, характерные особенности и отличия).
16. Математическая модель атмосферы и земной поверхности в системе WRF. Понятие рабочего домена. Вертикальная координата.
17. Картографические проекции в системе WRF. Принципы их использования.
18. Понятие сплошной среды. Физическая и математическая модели сплошной среды. Атмосфера как сплошная среда.
19. Система уравнений мезомасштабной модели WRF (Общая характеристика).
20. Уравнения динамики атмосферы.

21. Переменные Лагранжа и Эйлера.
22. Силы, действующие в атмосфере.
23. Уравнение непрерывности.
24. Уравнение состояния атмосферного воздуха.
25. Фазовые переходы и состояния воды в атмосфере.
26. Радиационные процессы в атмосфере и на подстилающей поверхности
27. Структура и рабочие модули системы WRF (Общая характеристика)
28. Методика проведения расчетов в системе WRF. Форматы данных.
29. Основные принципы выбора рабочего домена. Выбор пространственного и временного масштабов расчета.
30. Программы «пре-процессной» подготовки данных расчета (система WPS). Промежуточные файлы обмена данных между модулями системы WRF.
31. Приемы работы с файлом namelist.wps.
32. Файл geog. Работа программы geogrid.exe.
33. Работа с архивными файлами системы GFS. Программа ungrib.exe.
34. Работа программы metgrid.exe.
35. Методика проведения расчета в системе WRF (Общие положения).
36. Управление параметрами расчета. Работа с файлом namelist.input.
37. Виды микрофизических моделей, применяемых в системе WRF.
38. Основные правила использования микрофизик.
39. Микрофизики облачности
40. Микрофизики осадков
41. Микрофизики радиационных процессов
42. Микрофизики приповерхностного слоя атмосферы. Конвективные процессы.
43. Микрофизики почвенного слоя
44. Понятие о начальных и граничных условиях расчета. Работа с программой real.exe.
45. Файлы протоколирования и контроля.
46. Распараллеливание процессов вычисления (Общая характеристика).
47. Визуализация результатов численного моделирования в системе WRF.
48. Формат результирующих файлов. Общая характеристика формата netCDF.
49. Визуализация помощью командного процессора ncl.
50. Основные стандартные сценарии ncl.
51. Диагностические сценарии ncl.
52. Приемы анализа барических образований (циклонов).
53. Анализ струйных течений.
54. Краткосрочный прогноз погодных явлений в системе WRF.
55. Оценка «оправдываемости» прогнозов.
56. Проблемы долгосрочного прогноза погодных явлений. Общее понятие об ансамблевых методах прогноза.

3.3. Примерная тематика рефератов

1. История развития численного анализа атмосферных процессов.
2. Численные модели – средства компьютерного моделирования погоды.
3. Развитие климатических моделей (вчера – сегодня – завтра).
4. Современные методы анализа погодных условий.
5. Прогнозирование погоды и климата.
6. Моделирование климата прошлого.
7. Численные модели атмосферных процессов (привести современные примеры и описать их).
8. Роль облачности в климатическом моделировании.
9. Развитие гидрологических моделей.
10. Картографические проекции и их значение.
11. Выбор участка численного моделирования.
12. Глобальные численные модели атмосферы.
13. Региональные численные модели атмосферы.
14. Мезомасштабные модели атмосферы.
15. Помощь орбитальных систем при численном анализе погоды.
16. Средства визуализации прогноза погоды.
17. Языки программирования и их роль для численного анализа.
18. Виртуальные машины.
19. Численный анализ погодных условий на территории Беларуси.
20. Проблемы развития численного моделирования.
21. Перспективы развития численного моделирования.
22. Верификация и валидация результатов численного анализа.
23. Статистический метод анализа климатических данных.
24. Роль гидрологических процессов в формировании численного прогноза погоды.
25. Совместное использование гидрологических и климатических численных моделей.

3.4. Требования к рефератам

Объем реферата 8–10 страниц компьютерного текста (шрифт 12–14). Реферат должен содержать титульный лист, оглавление, введение, основную часть, заключение, список использованных источников и литературы. Все фактические данные, приведенные в реферате, должны содержать должным образом оформленные ссылки на соответствующий источник.

4. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ

Дисциплина «Численный анализ атмосферных процессов» читается для специальности «Гидрометеорология» и относится к циклу специальных дисциплин (государственный компонент). Изложение изучаемой дисциплины предполагает знание таких дисциплин специальности, как «Моделирование гидрологических и метеорологических процессов», «Физическая метеорология», «Синоптическая метеорология» и «Динамическая метеорология». Цель предмета заключается в подготовке специалистов, владеющих основами теоретических знаний в области развития моделей численного анализа атмосферных процессов, а также практическими навыками проведения расчетов с использованием наиболее современных программ и компьютерных технологий. В задачи дисциплины входят:

- формирование у студентов знаний о физических основах, принципах и методах построения численных моделей атмосферы и анализа метеорологических явлений,
- знакомство с самыми передовыми разработками в области численных моделей атмосферных процессов
- получение студентами практических навыков по использованию современных компьютерных систем для численного моделирования, анализа и прогноза реальных погодных ситуаций.

Изучение дисциплины базируется на основе знаний, полученных при изучении цикла специальных дисциплин государственного компонента и компонента учреждения высшего образования: физической метеорологии, синоптической метеорологии и динамики атмосферы.

В результате изучения дисциплины обучаемый (студент) должен: знать:

- физические основы возникновения и развития атмосферных процессов;
- основные физические характеристики метеорологических явлений
- основные признаки и критерии опасных явлений погоды;
- основные принципы и методы численного анализа и компьютерного моделирования
- основы программирования на компилируемых и «скриптовых» языках
- общее устройство и приемы проведения расчетов и распараллеливания вычислений на многопроцессорных системах;
- основные методы получения и использования метеорологической информации с помощью различных систем и интернет источников;
- основные принципы построения систем автоматизированного прогноза метеорологических явлений различных пространственных и временных масштабов;

уметь:

- получать необходимую информацию из открытых интернет источников;

- готовить входные данные для проведения модельных расчетов в системе мезомасштабного прогнозирования WRF;
- проводить численное моделирование реальных погодных ситуаций в системе WRF, в том числе и с использованием суперкомпьютеров;
- оценивать информацию, получаемую в результате проведенных расчетов, производить ее первичную обработку;
- использовать полученные данные при анализе физических процессов и явлений, происходящих в атмосфере.

владеть:

- навыками и методами применения информации, полученной численным моделированием, в научно-исследовательской и практической (прогностической) деятельности.

Связи с другими учебными дисциплинами. Данная учебная дисциплина органически связана со следующими дисциплинами: «Гидрология», «Гидрологические расчеты» и «Моделирование гидрологических и метеорологических процессов».

Цель дисциплины заключается в подготовке специалистов, владеющих основами теоретических знаний в области развития моделей численного анализа гидрологических и атмосферных процессов, а также практическими навыками проведения расчетов с использованием наиболее современных программ и компьютерных технологий.

В задачи дисциплины входят:

- формирование у студентов знаний о физических основах, принципах и методах построения численных моделей атмосферы и гидросферы, а также методах анализа гидрологических и метеорологических явлений,
- знакомство с самыми передовыми разработками в области численных моделей атмосферных и гидрологических процессов
- получение студентами практических навыков по использованию современных компьютерных систем для численного моделирования, анализа и прогноза реальных погодных и гидрологических ситуаций

Изучение дисциплины базируется на основе знаний, полученных при изучении цикла специальных дисциплин государственного компонента и компонента учреждения высшего образования: гидрологии, гидрологических расчетов, физической метеорологии, моделировании гидрологических и метеорологических процессов, синоптической метеорологии и динамики атмосферы.

В результате изучения дисциплины обучаемый (студент) должен:

знать:

- физические основы возникновения и развития атмосферных процессов;
- основные физические характеристики метеорологических и гидрологических явлений;
- гидроэкологические особенности формирования стока рек;

- основные признаки и критерии опасных гидрологических и погодных явлений;
 - основные принципы и методы численного анализа и компьютерного моделирования;
 - основы программирования на компилируемых и «скриптовых» языках
 - общее устройство и приемы проведения расчетов и распараллеливания вычислений на многопроцессорных системах;
 - основные методы получения и использования метеорологической и гидрологической информации с помощью различных систем и интернет источников;
 - основные методы численного моделирования стока и водного баланса водоемов;
 - основные методы оценки и численного моделирования метеорологических явлений, оказывающих влияние на гидрологические процессы;
 - основные принципы построения систем автоматизированного прогноза гидрологических и метеорологических явлений различных пространственных и временных масштабов;
- уметь:
- получать необходимую информацию из открытых источников, включая интернет;
 - готовить входные данные для проведения модельных расчетов в системах прогноза метеорологических и гидрологических явлений WRF и GSFLOW;
 - проводить численное моделирование реальных погодных и гидрологических ситуаций в системах WRF и GSFLOW, в том числе и с использованием суперкомпьютеров
 - оценивать информацию, получаемую в результате проведенных расчетов, производить ее первичную обработку
 - использовать полученные данные для анализа физических процессов и явлений, происходящих в атмосфере, а также для оценки их влияния на гидрологические объекты.

владеть:

- навыками и методами применения информации, полученной численным моделированием, в научно-исследовательской и практической (прогностической) деятельности.

В результате изучения учебной дисциплины формируется следующая компетенция:

БПК-7 – Быть способным применять приемы численного моделирования гидрологических и метеорологических процессов их визуализации и анализа в практике гидрометеорологического прогнозирования.

Форма получения высшего образования – дневная, очная. Занятия проводятся в седьмом семестре на четвертом году обучения.

Всего на изучение учебной дисциплины «Моделирование гидрологических и метеорологических процессов» для специальности «Гидрометеорология» отведено: 200 часов, в том числе 88 аудиторных часов, из них лекции составляют 34 часа, лабораторные занятия – 38 часа, лабораторные занятия для дистанционного обучения – 8 часов, контроль учебной самостоятельной работы обучения – 8 часов.

Трудоемкость учебной дисциплины составляет 6 зачетные единицы.

Форма текущей аттестации – экзамен.

4.1. СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

4.1.1. Современное состояние теории и практики численных методов моделирования, анализа и прогноза погоды

Краткий исторический обзор развития методов анализа климатических процессов и развития численных моделей. Подходы к численному анализу климатических систем. Область применения численных методов при моделировании атмосферных процессов. Объект, предмет и задачи численного моделирования погодных условий. Возможности прогнозирования климатических систем.

4.1.2. Физика численного моделирования атмосферных процессов

Атмосфера – система численного моделирования атмосферы. Физические процессы атмосферы, применяемые в численном анализе. Принципы построения физических и численных моделей климата и океана.

4.1.3. Орбитальные методы исследования атмосферных процессов, параметров атмосферы и подстилающей поверхности

Методы дистанционного зондирования Земли. Основные приборы ДЗЗ. Техника и способы получения атмосферных данных. Использование орбитальных наблюдений метеопараметров. Перспективные направления применения орбитальных методов исследования атмосферных процессов, параметров атмосферы и подстилающей поверхности в численном анализе.

4.1.4. Виды численных моделей. Моделирование атмосферных процессов различных масштабов

Виды численных моделей атмосферы. Классификация и основные типы современных систем для численного моделирования гидрологических и метеорологических процессов.

Моделирование атмосферных процессов различных масштабов. Модели атмосферы и численное моделирование атмосферных процессов на примере мезомасштабной региональной системы WRF.

4.1.5. Модель численного прогноза мезомасштабных атмосферных явлений WRF

Общий обзор и характеристика мезомасштабной модели прогноза погоды и анализа атмосферных процессов WRF. Основные компоненты системы мезомасштабного прогноза погоды и анализа атмосферных процессов WRF.

Используемые форматы данных. Расчетный модуль AWR системы WRF. Выбор участка и использование вложенных расчётных сеток. Система дискретизации и основные принципы выбора и построения рабочего домена для численного моделирования атмосферных процессов.

4.1.6. Практическое использование системы WRF

Компиляция и сборка системы WRF. Программный код системы. Адаптация для работы под Windows (на примере виртуальных машин). Анализ других компьютерных систем. Основные преимущества и недостатки использования.

4.1.7. Применение подсеточных параметризаций при проведении расчетов погоды численными методами

Подсеточные микрофизики. Численное моделирование температурного режима земной поверхности и приповерхностного слоя атмосферы в системе WRF. Оценка температурного режима, связанного с процессами переноса солнечного излучения и воздушных масс в атмосфере. Понятие теплового баланса поверхности. Роль радиационных процессов. Моделирование процессов приземного слоя атмосферы в системе WRF. Образование крупномасштабных осадков и пограничный слой.

4.1.8. Системы постпроцессной обработки и визуализации результатов расчета

Возможности представления результатов численного моделирования атмосферных процессов. Постпроцессная обработка (общие сведения). Использование сценарного языка NCL для обработки и анализа данных в системе WRF. Система VAPOR. Разработка сценариев для визуализации и статистической обработки результатов численного моделирования.

4.1.9. Верификация моделей и валидация результатов численного моделирования

Верификация моделей. Погрешность результатов. Валидация результатов моделирования. Методы статистики, применяемые при анализе численных расчетов атмосферных процессов. Численный и статистический анализ результатов прогнозирования. Оправдываемость реального и модельного прогноза погоды. Программный продукт MET.

4.1.10. Использование орбитальных наблюдений для валидации численных моделей

Метеорологические спутники Земли. Геостационарные спутники. Орбитальные спутники. Типы приборов МИСЗ. Получение метеопараметров по спутниковым данным. Использование спутниковой информации для валидации численных моделей. EUMETSAT.

4.1.11. Прогноз погоды с применением численных моделей

Понятие прогноза погоды. Методы прогноза. ВМО. Типы прогноза погоды. Прогноз погоды по срочности. Контактные наблюдения за атмосферой. Система наукастинга. Комплексное использование методов прогноза погоды. Ансамблевые прогнозы погоды. Температурный профиль атмосферы.

4.1.12. Совместное использование метеорологических и гидрологических численных моделей

Гидрологические модели. Возможности совместного использования гидрологических и атмосферных численных моделей на примере систем WRF и GSFLOW. Оценка возможности использования прогнозных данных системы WRF для анализа возможных осадков, температурного режима и т.п. в рабочем домене программ PRMS и GSFLOW.

Анализ работы и обсуждение перспектив развития систем численного моделирования метеорологических и гидрологических процессов. Постановка научных проблем.

4.1.13. Проблемы и перспективы развития численного анализа атмосферных процессов

Проблемы численного анализа атмосферных процессов. Проблемы воспроизведения изменения климата. Проблемы повышения оперативности и оценка точности прогноза. Прогноз и траекторный анализ опасных атмосферных явлений различных пространственных и временных масштабов в системе WRF.

Перспективы развития численного моделирования. Ансамблевый и детерминистический методы численного прогноза погоды. Неопределенность моделей. Стохастическая параметризация. Надежность и разрешающая способность модели.

4.2. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Вестра Э. Разработка геоприложений на языке Python / пер. с англ. А.В. Логунова. – М.: ДМК Пресс, 2017 – 446 с.
2. Груздов В. В. Новые технологии дистанционного зондирования Земли из космоса / В. В. Груздов [и др.]. - Москва: Техносфера, 2019. - 482 с.

Дополнительная

3. Андерсон Р.К. Использование изображений со спутников в анализе и прогнозе погоды. / под ред. Р.К. Андерсона и Н.Ф. Вельтищева.// Техн. записка ВМО – Л., Гидрометеиздат, 1984 – 275 с.
4. Аргучинцев В.К. Динамика атмосферы – Иркутск: 2006. – 130 с.
5. Бакулин П.И. Курс общей астрономии/ И.П. Бакулин, Э.В. Кононович, В.И. Мороз. – М.: Наука, 1977 – 545 с.
6. Вельтищев Н.Ф., Степаненко В.М. Мезометеорологические процессы – М.: 2006. – 104 с.
7. Гандин Л.С. Объективный анализ метеорологических полей. – Л.: Гидрометеиздат, 1963. – 288 с.
8. Герман М.А. Космические методы исследования в метеорологии – Л., Гидрометеиздат, 1985 – 352 с.
9. Говердовский В.Ф. Космическая метеорология с основами

астрономии :Учеб. для вузов по направлению "Гидрометеорология", специальности "Метеорология" / В. Ф. Говердовский; Рос. гос. гидрометеорол. ин-т. – СПб.: РГГМИ, 1995. – 216 с.

10. Использование спутниковой информации в синоптической практике /под ред.Н.П. Леонова. // Метод. Пособие – Моск. отд. Гидрометеоздата – 1982

11. Калинин Н.А., Толмачева Н.И. Практикум по космическим методам исследований в метеорологии. – Пермь, изд. Пермского университета, 2003 – 235 с.

12. Кондратьев К.Я. Спутниковая климатология – Л.: Гидрометеоздат, 1986 – 263 с.

13. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли – М.: Мир, 1988 – 351с.

14. Крэкнелл А.П. Дистанционное зондирование в метеорологии, океанографии и гидрологии – М.: Мир, 1984 – 547 с.

15. Лекции по численным методам краткосрочного прогноза погоды. – Л.: Гидрометеоздат, 1969. – С. 637–700.

16. Матвеев Л.Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. – Л.: Гидрометеоздат, 1965. – С.5-365.

17. Руководство по использованию спутниковых данных в анализе и прогнозе погоды / Под ред. И.П. Ветлова, Н.Ф. Вельтищева. - Л.: Гидрометеоздат, 1987.

18. Симакина Т.Е. Получение и обработка спутниковых снимков. Учебное пособие. – СПб.: РГГМУ, 2010. –127 с.

19. Барашкова Н.К. Атмосферные процессы: динамика, численный анализ, моделирование / Н.К. Барашкова, Л.И. Кижнер, И.В. Кужевская./ Учебное пособие. – Томский государственный университет. – Томск, 2010.

20. Д.Л. Лайхтман. Динамическая метеорология. – Л., Гидрометеоздат, 1976 – 606 с.

21. Марчук Г.И. Облака и климат/ Г.И. Марчук и др. – Л.: Гидрометеоздат, 1986 – 512 с.

22. Матвеев Л. Т. Физика атмосферы. – СПб.: Гидрометеоздат, 2000 – 752 с.

23. Физическая метеорология: Учебник/ Б.А. Семенченко. – М.: Аспект Пресс, 2002. – 415 с.

4.3. ЭЛЕКТРОННЫЕ РЕСУРСЫ

1. Венский институт геодинамики, концептуальные модели синоптических спутниковых систем, теория и описание отдельных случаев [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.zamg.ac.at>. – Дата доступа: 13.04.2020.

2. Данные ИСЗ Терра и Аква [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ecmwf.int/products/forecasts/d/charts/monitoring/satellite/airs>. – Дата доступа: 13.04.2020.

3. Научно-исследовательский Центр мониторинга Земли из Космоса [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ntzomz.ru>. – Дата доступа: 13.04.2020.

4.4. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА

Дневная форма получения образования с применением дистанционных технологий

№ п/ п	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Кол-во часов ДО	Кол-во часов УСР	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Иное			
1	2	3	4	5	6	7	8		9
	<i>Численный анализ атмосферных процессов (88ч)</i>	34	–	–	38	–	8	8	
1.	Современное состояние теории и практики численных методов моделирования, анализа и прогноза погоды	2	–	–	2	–	2	–	Устный опрос, оценка лабораторной работы
2	Физика численного моделирования атмосферных процессов	2	–	–	2	–	–	2	Устный опрос, оценка лабораторной работы
3	Орбитальные методы исследования атмосферных процессов, параметров атмосферы и подстилающей поверхности	2	–	–	4	–	2	–	Устный опрос, оценка лабораторной работ
4	Виды численных моделей. Моделирование атмосферных процессов различных масштабов	4	–	–	4	–	–	–	Устный опрос, оценка лабораторной работ
5	Модель численного прогноза мезомасштабных атмосферных явлений wrf .	2	–	–	6	–	–	2	Устный опрос, отчет по экскурсии

6	Практическое использование системы wtf	2	—	—	2	—	—	—	Устный опрос, оценка лабораторной работы
7	Применение подсеточных параметризаций при проведении расчетов погоды численными методами	2	—	—	4	—	2	—	Устный опрос, оценка лабораторной работы
8	Системы постпроцессорной обработки и визуализации результатов расчета	2	—	—	2	—	2	—	Устный опрос, оценка лабораторной работы
9	Верификация моделей и валидация результатов численного моделирования	4	—	—	4	—	—	—	Устный опрос, оценка лабораторной работы
10	Использование орбитальных наблюдений для валидации численных моделей	2	—	—	4	—	—	—	Устный опрос, оценка лабораторной работы
11	Прогноз погоды с применением численных моделей	4	—	—	2	—	—	—	Устный опрос, оценка лабораторной работы
12	Совместное использование метеорологических и гидрологических численных моделей	4	—	—	2	—	—	—	Устный опрос, оценка лабораторной работы
13	Проблемы и перспективы развития численного анализа атмосферных процессов.	4	—	—		—	—	4	Устный опрос, оценка лабораторной работы