

# ИНФОРМАЦИОННО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ РЕШЕНИЯ МНОГОМЕРНЫХ ЗАДАЧ ТЕОРИИ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ С РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЕМ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Т.А. Сушкевич, С.А. Стрелков, С.В. Максакова, А.Н. Волкович

С 1989 года коллектив проводит работы по проблемам распараллеливания вычислений при решении больших задач в атмосферно-оптических космических исследованиях, в проблемах климата, прогноза, радиационного баланса Земли и т.д., связанных с математическим моделированием переноса излучения в природных средах и радиационного поля Земли. Однако впервые параллельные вычисления были реализованы в 1966 году [1] на ЭВМ БЭСМ-6 путем специального разбиения разностной сетки на непересекающиеся подобласти и использования времени обмена с магнитными лентами. Накоплен огромный опыт по проблемам переносимости, адаптации, наследования программного обеспечения при освоении различных вычислительных систем. По-прежнему имеет место проблема соблюдения международных стандартов и универсальности операционного обеспечения и компиляторов Fortran. В мировой практике космической отрасли предпочтение отдается Fortran, чтобы обеспечить преемственность не только специального тематического программного обеспечения, но и масштабных баз данных как характеристик параметров атмосферы, земной поверхности, океана, так и архивов радиационных характеристик.

В интересах международной кооперации по аэрокосмическому глобальному мониторингу Земли, международного глобального проекта по изучению эволюции Земли, климата и опасных явлений требуется разработка нового математического обеспечения для решения прямых и обратных задач теории переноса излучения в природных средах, реализуемого на высокопроизводительных многопроцессорных супер-ЭВМ. В США, Японии, Германии, Англии, Франции, России появились супер-ЭВМ нового поколения, ориентированные на массовый параллелизм. Важнейшим направлением является расширение сфер внедрения нанотехнологий в космических проектах, в частности, развитие гиперспектральных систем дистанционного зондирования и нано-диагностики природно-техногенной сферы.

С одной стороны, радиационное поле – один из неотъемлемых факторов жизнеобеспечения человека, животного и растительного мира на Земле, одна из определяющих компонент земной экосистемы и биосферы, а также климата Земли, для поведения которых характерно взаимодействие отдельных компонент с проявлением синергизма. "Тепличный эффект" почти на 40% обусловлен радиационным форсингом, т.е. изменением радиационного поля Земли под влиянием естественно-природного и антропогенно-техногенного воздействия.

С другой стороны, при дистанционном зондировании объектов природно-техногенной сферы электромагнитное излучение, регистрируемое разными средствами, является основным источником информации о строении и физических свойствах планетных атмосфер и поверхностей, о состоянии окружающей среды и объектов, атмосферы, облачности, океана, гидрометеоров и всевозможных выбросов с загрязняющими примесями (последствия техногенных аварий, военных действий, лесных и степных пожаров, извержений вулканов и т.д.).

Сложность космических исследований и реализации космических проектов обусловлена тем, что приходится иметь дело с "замкнутым кругом":

- ◆ чтобы измерить характеристики радиационного поля Земли, нужны предварительные оценочные расчеты этих характеристик на основе моделей теории переноса излучения с учетом многократного рассеяния и поглощения солнечного излучения,
- ◆ чтобы смоделировать перенос излучения в системе "атмосфера - земная поверхность", нужны данные о пространственных и спектральных распределениях оптико-геофизических параметров атмосферы, описывающих взаимодействие солнечного и собственного излучения с компонентами земной атмосферы и земной поверхностью.

Следует обратить внимание на несогласованность теории переноса с реальными возможностями натурных измерений. Практически отсутствуют способы одновременного экспериментального определения всего комплекса входящих в теорию физических параметров среды и тем более их изменчивости для данных конкретных, непрерывно меняющихся ситуаций в реальной окружающей среде. Поэтому физико-математическое моделирование для восполнения знаний о реальных радиационных процессах, их анализа и прогнозирования является необходимой составной частью любого космического проекта и глобальных моделей циркуляции атмосферы и океана, климата или метеорологии.

Возрастает роль "космического земледевия" как той дисциплины, которая объединяет усилия различных специалистов и позволяет им всем вместе "заговорить" на общем языке космических исследований. "Космическое земледевие" - это оперативная информация о стихийных бедствиях и экологических катастрофах антропогенно-

техногенного и естественно-природного происхождения и космический мониторинг глобальных изменений окружающей среды, включая экологические катастрофы замедленного действия. В России около 30 Центров приема космической информации, а Центры обработки и анализа информации находятся в стадии формирования и становления. В марте 2003 года вышло Постановление Правительства РФ об организации государственного экологического мониторинга окружающей среды. В октябре 2005 вышла Федеральная программа по космосу и в настоящее время разрабатывается развитие этой программы на перспективу до 2020 года. Одно из важных направлений Федеральной программы по космосу связано с использованием космических данных для оптимального управления регионами с целью обеспечения их устойчивого развития.

Радиационное поле Земли формируется под влиянием двух компонент системы "атмосфера - земная поверхность (суша, океан)" (САП). Связи между радиационными характеристиками и параметрами атмосферы и земной поверхности описываются решениями общей краевой задачи теории переноса излучения в САП, когда важно использовать теорию многократного рассеяния [2, 3]. Сложность задачи заключается в многопараметричности модели среды, большом разнообразии процессов трансформации энергии Солнца, вариантов визирования и способов измерений. Приходится иметь дело с общими краевыми задачами для интегро-дифференциального кинетического уравнения, описывающего перенос излучения в рассеивающих, поглощающих, излучающих, преломляющих, поляризующих средах с одномерной, двумерной или трехмерной плоской или сферической геометрией. Используется линеаризованное уравнение Больцмана в приближении бинарных столкновений, основанном на дуализме "волна-частица". Теория переноса позволяет изучать влияние различных факторов на прохождение излучения в САП и получать связи конкретных параметров среды с характеристиками радиационного поля.

Для космических проектов и космических наблюдений с первых шагов освоения космического пространства необходимо было разрабатывать методологию решения двух основных классов многомерных задач теории переноса излучения:

- ◆ прежде всего для многомерной сферической оболочки (сферическая Земля с атмосферой),
- ◆ а позже для 3D плоского слоя (атмосфера над земной поверхностью),
- ◆ с двумя типами источников:
- ◆ внешним параллельным потоком солнечного (ультрафиолетового, коротковолнового) излучения,
- ◆ собственным (длинноволновым, инфракрасным, миллиметровым) излучением.

В рамках развития вычислительных средств рассматриваются следующие модели переноса излучения.

I. Спектральная, пространственная и угловая структуры поля яркости - интенсивности светового поля (оптического излучения) при известных условиях освещения рассчитываются как решения общей краевой задачи для уравнения переноса.

II. Спектральные и пространственные структуры интегральных характеристик поля излучения рассчитываются как решения задач, отвечающих (математически) точным или разной степени приближенности линейным и нелинейным моделям, которые получаются из интегро-дифференциального уравнения переноса с помощью аппарата разложений решения по сферическим функциям, при контролируемых условиях и ограничениях. В частности, отметим, что модели II представляют также интерес для разработки приемов ускорения сходимости итераций в модели I.

С первых шагов разработка информационно-математического обеспечения космических проектов проводилась на самых мощных в те времена ЭВМ. При этом один расчет радиационного поля Земли на БЭСМ-6 занимал около 300 часов. В современных условиях такие задачи эффективно реализуются на многопроцессорных высокопроизводительных компьютерах. Используются следующие приемы распараллеливания вычислений:

1. распределенные вычисления по физическим моделям:
  1. многоспектральные (по длине волны);
  2. по оптико-геофизической погоде (по коэффициентам общей краевой задачи);
  3. по источникам излучения;
2. распределенные вычисления на основе методического распараллеливания - декомпозиции краевых задач:
  1. по моделям переноса излучения, т.е. по приближениям теории переноса излучения;
  2. по подобластям;
  3. по параметрам вектора функций влияния;
  4. по параметрам вектора пространственно-частотных характеристик;
  5. по компонентам векторных функционалов;

### 3. алгоритмическое распараллеливание для многомерных моделей:

1. однократное рассеяние по характеристикам;
2. многократное рассеяние по интегралам столкновений;
3. по квадрантам угловых разностных сеток;

Разработанные авторами [2, 3] метод функций влияния и теория передаточного оператора обладают удивительными свойствами распараллеливания вычислений и построения новых алгоритмов декомпозиции. Методом функций влияния и передаточного оператора исходную задачу с областью определения решения большой размерности и большим размером разностной сетки фазового пространства задачи можно факторизовать на ряд более простых малоразмерных подзадач, определенных на подобластях и разностных сетках меньшей размерности.

## ОСНОВЫ ИНФОРМАЦИОННО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ

Создаваемая информационно-математическая модель носит универсальный характер и имеет широкую область применимости, в частности, для решения научно-фундаментальных и прикладных задач, связанных с проблемами глобальных изменений окружающей среды, климата Земли, изучения механизмов истощения озонового слоя, динамики биопродуктивности Мирового океана, прогнозирования, мониторинга и оценки последствий ряда техногенных и природных аварий и катастроф, развития методов и средств дистанционного зондирования атмосферы, водоемов, земной поверхности для экологического мониторинга наземными и аэрокосмическими комплексами, условий видения, освещения и радиационного (в том числе, спектрально-радиационного) баланса планеты, солнечной энергетики, солнечно-земных связей, глобальных циклов кислорода, углерода, азота и радиационной фото-химии атмосферы с учетом газовых и аэрозольных примесей природного и антропогенного происхождения, загрязнения ("мусора") космоса и верхней атмосферы, воздействия электромагнитного излучения на состояние и здоровье человека и т.д.

Вычислительные средства для решения задач дистанционного зондирования:

- ◆ физико-математические модели оптических свойств среды;
- ◆ физико-математические модели процесса трансформации излучения в системе "атмосфера-Земля";
- ◆ алгоритмы численного и полуаналитического решения краевых задач теории переноса;
- ◆ физико-математические модели обратных задач дистанционного зондирования;
- ◆ алгоритмы численного и аналитического решения обратных задач;
- ◆ математическое обеспечение, ориентированное на решение прямых и обратных задач дистанционного зондирования и контроля окружающей среды;
- ◆ дисплейные системы тематической обработки изображений и результатов измерений.

Основные составные части математического обеспечения:

- ◆ банки данных по оптико-метеорологическим моделям атмосферы и земной поверхности;
- ◆ система автоматизированного расчета спектро-энергетических и других радиационных характеристик атмосферы и Земли в различных диапазонах спектра от УФ до ММВ;
- ◆ банки данных радиационных характеристик (функции влияния локальных возмущений параметров или источников в атмосфере, дымах, облаках, гидрометеорах, океане и на земной поверхности, пространственно-угловые и спектральные распределения яркости системы "Земля-атмосфера", функции пропускания и сферическое альbedo атмосферы и т.д.);
- ◆ пакеты программ обработки и диагностики результатов численного эксперимента и аэрокосмических данных.

Библиотека программ численного решения краевых задач теории переноса излучения в рассеивающих, поглощающих и излучающих средах (атмосфера, океан, облачность, дымы, гидрометеоры, водные бассейны) состоит из набора программ на Fortran, каждая из которых позволяет рассчитывать радиационные характеристики при заданных модели и методике (краевая задача теории переноса, геометрия, численный метод и т.д.) в определенном диапазоне длин волн.

С учетом источников и процессов трансформации излучения выделяются четыре основные физико-математические модели, отвечающие следующим спектральным диапазонам:

- ◆ оптический диапазон (источник - Солнце, многократное рассеяние);
- ◆ ближний ИК-диапазон (источники - Солнце и собственное излучение, многократное рассеяние);

- ◆ ИК-диапазон (источник - собственное излучение, без многократного рассеяния, сложная структура спектров поглощения);
- ◆ ММВ диапазон (источник - собственное радиоизлучение, многократное рассеяние в гидрометеорах и облаках, сложные спектры поглощения).

Такая библиотека содержит наиболее универсальный конечно-разностный метод - это итерационный метод характеристик (ИМХ) [2, 3], в том числе для комплексных уравнений переноса, с использованием линейных и нелинейных приемов ускорения сходимости итераций, а также другие численные, полуаналитические и асимптотические методы, включая инженерные приближенные методы, предназначенные для экспресс-анализа.

#### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Одна из целей - разработка программного обеспечения для математического моделирования радиационного поля Земли на суперкомпьютерах с распараллеливанием вычислений на основе использования средств программирования высокого уровня.

Создаваемые вычислительные средства ориентированы на обеспечение преемственности реализуемого математического обеспечения и возможностей его развития и переноса на иные высокопроизводительные ЭВМ с операционными системами UNIX и LINUX. Использование оболочек на языке управления сценариями Perl, инкапсулирующих в себе вызовы Fortran-программ в многозадачной среде, обеспечивает переносимость и интероперабельность приложений. При этом полуавтоматически решается проблема построения современного сетевого интерфейса для нашего "унаследованного" математического обеспечения (программной системы).

Программные комплексы создаваемой системы автоматизированного расчета, обработки и анализа радиационных характеристик Земли и решения задач дистанционного зондирования разрабатываются на многопроцессорных супер-ЭВМ с параллельными вычислениями под управлением через сеть с "рабочего места", организованного на РС. Создаваемая система содержит три группы программных комплексов.

*Первая группа программ* - формирование оптико-метеорологических моделей среды: программы работы с архивом и базами данных моделей атмосферы, облаков, дымов, земной поверхности, океана; банк спектров поглощения атмосферных газов; банк характеристик аэрозольного рассеяния и поглощения; формирование модели атмосферы; пакеты данных к программам расчета радиационных характеристик и т.д.

*Вторая группа программ* - численное решение скалярного уравнения переноса излучения быстрыми приближенными и репрезентативными высокоточными методами: для плоской и сферической геометрии, для системы свободная атмосфера-дымовая завеса, для системы атмосфера-океан, для системы атмосфера с многоярусными облаками, для функции влияния атмосферы, дымов, облачности, гидрометеоров, океана, для функции пропускания атмосферы, отягощенной многократным рассеянием, и т.д.

*Третья группа программ* - обработка и диагностика результатов расчетов: аналитическая аппроксимация и параметризация табличных функций; компьютерная графика и визуализация; решение обратных задач по восстановлению параметров среды и т.д.

Предложенная архитектура программного обеспечения с функциональным наполнением, ориентированном на решение задач мониторинга развития и оценки последствий воздействия техногенных аварий и природных катастроф, а также природно-ресурсных, экологических, геоэкоинформационных и т.п. задач, позволяет осуществлять модификацию и адаптацию вычислительно-информационной системы применительно к конкретным проблемам математического моделирования радиационных процессов в системе Земля-атмосфера или восстановления набора параметров зондируемой среды.

#### ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СРЕДА

Цель разработки - обеспечить максимально возможную переносимость "унаследованного" комплекса программ и обеспечить прозрачную работу в распределенной сетевой среде. Комплекс должен без значительных переделок работать на кластере рабочих станций (workstation clusters) и/или массиве параллельных процессоров (massively parallel processor (ММР)). Параллелизм реализуется в системе массовых расчетов большого набора краевых задач теории переноса излучения в широком диапазоне спектра длин волн для наборов "оптической погоды", состояний подстилающей поверхности, источников излучения.

Результаты единичных расчетов накапливаются в архивах решений, которые переформируются в управляемые базы данных и используются в дальнейшем для расчета различных функционалов и для визуальной и графической обработки в интересах конкретных целевых приложений. Программы (вычислительные модули) для расчета "единичного" варианта реализованы на языке Fortran. Существенно, что в процессе счета варианта и при записи в архив решений используются операторы прямого доступа Fortran.

Реализация функции управления и сетевого взаимодействия "унаследованным" комплексом программ производится с помощью оболочек (wrapper's), написанных на языке описания сценариев Perl. Другими словами, производится упаковка Fortran-программ внутрь модулей на языке Perl (Perl scripts).

Базовой операционной системой выбрана свободно распространяемая операционная система LINUX (RedHat 9.0), что обеспечивает полный набор штатных инструментальных средств, включая компиляторы с языков программирования C++ и Fortran, интерпретаторы языков Perl, Tcl, Python. Под LINUX разработан большой набор программ для научных приложений, в том числе средства для организации многомашинных кластеров. Отечественные многопроцессорные вычислительные системы и высокопроизводительные PC также имеют в качестве операционной системы LINUX.

Языки описания "сценариев" (Perl, Python, Tcl/Tk) позволяют быстро разрабатывать приложения, ориентированные на объединение готовых компонентов и систем. В них реализован доступ к полному набору необходимых для этой цели функций операционной системы. Языки описания "сценариев", как правило, являются интерпретаторами, реализованными на языках C/C++. Их модель построения приложений основана на создании компонентов с помощью языков системного программирования (типа C/C++) и соединения таких компонентов посредством "сценариев".

Комплекс математических моделей, методов и программного обеспечения представляет собой открытую развиваемую систему математического моделирования. Использование в качестве основных языков программирования Fortran, C++ и структурирование математического обеспечения с выделением в отдельные модули фрагментов, зависящих от конкретных вычислительной и операционной систем, позволяют переносить пакеты программ на разные вычислительные системы и адаптировать к постоянно развивающимся операционным системам.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 06-01-00666).

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Т.А. Сушкевич Осесимметричная задача о распространении излучения в сферической системе // Отчет № О-572-66. М.: ИПМ АН СССР, 1966.
2. Т.А. Сушкевич, С.А. Стрелков, А.А. Иолтуховский Метод характеристик в задачах атмосферной оптики. М., Наука, 1990.
3. Т.А. Сушкевич Математические модели переноса излучения. М., БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005.