

# ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ В ЗАДАЧАХ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ И ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ МЕТОДАМИ ПОЛЯРИМЕТРИИ

Т.А. Сушкевич, С.А. Стрелков, В.В. Козодеров, С.В. Максакова, Б.А. Фомин, А.Н. Волкович, В.П. Шари, С.Д. Устюгов, А.К.Куликов

Суперкомпьютеры очень высокой производительности помогут разобраться как именно и почему климат меняется. В результате природных процессов или воздействия человека? В настоящее время ответ на эти вопросы чрезвычайной важности определяется, по сути, «научным голосованием» совокупности специалистов, изучающих и моделирующих климат. Однако есть надежда, что с помощью спутниковых и наземных поляриметрических наблюдений и глобального космического мониторинга точность и надежность таких прогнозов существенно возрастут. Радиационный форсинг на изменения климата составляет около 40%! Для чистой молекулярной атмосферы «голубой» Земли характерны рэлеевское рассеяние и высокий уровень степени поляризации излучения Земли, которая зависит от вклада многократного рассеяния, с преимущественно линейной поляризацией. Характеристики поляризации излучения атмосферы и поверхности являются тонкими индикаторами аэрозольного загрязнения атмосферы, суши, океана.

В 2010 году лесные и торфяные пожары, не только в Подмосковье и по всей России, но и в ряде стран Европы и Азии, а также извержение вулкана в Исландии показали, насколько опасны аэрозоли - мельчайшие частички различных веществ, взвешенных в атмосфере Земли. Накрывший Москву удушливый смог оказал негативное влияние на здоровье людей, а пепел проснувшегося вулкана парализовал авиаперевозки в Европе. Эти события лишний раз подтвердили: технический прогресс пока ничего не может противопоставить внезапному нашествию мириад пылинок природного или антропогенного происхождения. Как выясняется, их роль в нашей жизни весомее, чем считалось раньше. Судя по результатам исследований последних лет, атмосферный аэрозоль исключительно важен для формирования климата нашей планеты, поскольку он активно взаимодействует с солнечным излучением и способствует образованию облаков.

Для того чтобы оценить эффект влияния аэрозолей на развитие глобальных климатических изменений, в 2011 году запущен космический аппарат Glory. Научным руководителем этой космической миссии является наш соотечественник с Украины Михаил Мищенко, главный научный сотрудник Годдардовского института космических исследований НАСА. Ранее были запущены спутники Японии и Европейского космического агентства.

По оценкам специалистов, общая масса атмосферного аэрозоля составляет около 60 мегатонн, или около 10 микрограммов на каждый сантиметр земной поверхности. Наиболее важный интерес представляют аэрозоли, которые содержатся в атмосферном слое до высоты 5-6 километров от земной поверхности, где их больше всего. Это очень сложный компонент атмосферы, пестрое и динамичное сообщество частичек разного происхождения и размера. Здесь сосуществуют как природные, так и антропогенные аэрозоли - выброшенные океанами кристаллики соли, сульфаты от двигателей внутреннего сгорания, сажа от пожаров, песчинки и частицы почвы, тяжелые металлы, полихлорированные органические соединения, пыльца растений и т.д.

В то время как одни частицы поднимаются в воздух, а другие мигрируют в атмосфере, третьи оседают на Землю или вымываются дождями. Происходит своеобразный круговорот аэрозолей в природе. Количество частиц в атмосфере увеличивается не только после лесных пожаров или извержения вулканов, но и после пылевой бури в пустыне, введения в строй тепловой электростанции или роста числа автомобилей в каком-либо регионе. Например, активным поставщиком антропогенных аэрозолей сейчас являются бурно развивающиеся экономики Индии и Китая, где мало применяются современные технологии очистки промышленных выбросов. В то же время такого рода «вклад» постсоветских стран сократился из-за падения промышленного производства в 1990-х годах.

На протяжении 1990-х годов слой тропосферных аэрозолей в среднем значительно уменьшился, то есть атмосфера нашей планеты стала прозрачнее. Таковы результаты исследований, проведенных в рамках Global Aerosol Climatology Project - совместного научного проекта НАСА и World Climate Research Programme. Если этот результат верен, то он означает, что глобальное потепление климата вызвано не только парниковым эффектом, но отчасти и тропосферными аэрозолями - взвеси, содержащие черный углерод, например сажа, поглощают солнечное излучение, нагревая атмосферу.

Вероятность обнаружения частиц, которые остались взвешенными в атмосфере после пожаров и вулканов 2010 года, близка к нулю. Хотя во время этих событий содержание аэрозолей в определенных местах могло увеличиться очень существенно (в Москве по сравнению со средними значениями в 10 раз), глобальное влияние этих двух событий было относительно слабым. Не сопоставимым, например, с влиянием мощного извержения вулкана Пинатубо в 1991 году на Филиппинах, которое ощущалось на протяжении по меньшей мере двух лет. А вот если бы спутник Glory во время этих событий уже летал, то результаты наблюдений были бы

исключительно интересными.

Однако изучать аэрозоли со спутников невероятно сложно, поскольку оптический сигнал от частиц часто «замывается» шумами измерения и фоновыми компонентами. Именно здесь поляризация оказывается совершенно незаменимым и непревзойденным по информативности орудием исследования. Прежде чем обрабатывать и интерпретировать данные спутниковых измерений, необходимо проводить предварительный анализ на основе «сценарного» подхода с помощью комплексного математического моделирования.

Теоретическое исследование процессов переноса, поляризации и деполяризации электромагнитного излучения микроволнового диапазона длин волн (фотонов) с учетом многократного рассеяния и поглощения в природных и искусственных средах на основе математического моделирования и вычислительного эксперимента проводится в интересах фундаментальных проблем, связанных

- с повышением информативности измерений в задачах дистанционного зондирования, томографии и интроскопии объектов разной природы;
- с разработкой новых технологий мониторинга последствий естественно-природного и антропогенного воздействия на окружающую среду и т.п. с помощью оптико-электронных, спектровидеополяриметрических, многоугловых и гиперспектральных систем наблюдений;
- с расширением каналов радиовидения, спутниковой связи и дистанционного зондирования осадков и загрязнений в области миллиметровых волн;
- с исследованиями воздействия возмущений электромагнитного излучения на жизнедеятельность и здоровье человека, на флору и фауну под влиянием локальных и глобальных изменений окружающей среды;
- с расширением сферы приложений кинетической теории переноса фотонов в приближении линеаризованного уравнения Больцмана, в том числе в космических исследованиях, астрофизике (Солнце и солнечная система), нанотехнологиях, фотонике, материаловедении (чистота материалов, качество поверхности и т.п.), медицине, науках о живом и т.д.

Моделирование переноса поляризованного электромагнитного излучения (фотонов) – это одна из самых сложных и громоздких вычислительных проблем кинетической теории переноса с учетом многократного рассеяния и поглощения. Например, естественный солнечный свет поляризован, но в природных средах происходит его деполяризация. И напротив, неполяризованный свет от источника может стать поляризованным. Если уравнения Максвелла были сформулированы в 1873 г., то в кинетической теории векторное интегро-дифференциальное уравнение переноса поляризованного излучения было сформулировано только в 40-ые годы XX века (В.В.Соболев, С.Чандрасекар, Г.В.Розенберг) и только для частного случая с рэлеевским рассеянием. В последние годы возрос интерес к проблемам поляризации излучения в связи с новыми технологиями аэрокосмического дистанционного зондирования, а также разработкой методов и средств нанодиагностики природных и искусственных сред.

Авторы работы являются первыми разработчиками оригинальных детерминированных высокоточных численных методов расчета полного набора компонент вектора Стокса и интенсивности излучения с учетом многократного рассеяния и поглощения, поляризации и деполяризации [1-7]. В основе лежит единый методический подход - итерационный метод характеристик с квадратурами для интегралов столкновений и корректными процедурами ускорения сходимости итераций.

Исследования распространения света (электромагнитного излучения или фотона) и его взаимодействия со средами имеют длинную историю (более двух тысяч лет), но до сих пор появляются новые проблемы и новые сферы приложений, требующие дальнейших исследований фундаментального характера. В последние годы даже активизировались исследования излучения Солнца и космоса: на космических орбитах функционируют специальные спутники, ежегодно проводятся международные конференции и рабочие группы, посвященные проблемам поляризации излучения Солнца и космического излучения. Повышенный интерес к фотонному переносу проявляется в связи с расширением сферы приложений нанотехнологий и т.п.

Параметры Стокса в координатном пространстве ни вектора, ни тензора не образуют. Однако, распространение поляризованного излучения описывается векторными полями. Интенсивность излучения определяется через среднее значение вектора Пойнтинга. Если среда макроскопически оптически изотропна, то полный вектор параметров Стокса, описывающий состояние поляризации излучения при его распространении в оптически-активной среде, находится как решение векторной общей краевой задачи теории переноса – это система 4-х интегро-дифференциальных уравнений с частными производными и матрицей функций источников. В общем случае матрица функций источника содержит 36 скалярных интегралов столкновения, при блочно-диагональной матрице рассеяния  $M_i$  – 18 скалярных интегралов, а для рэлеевского случая – 14 скалярных интегралов. А это означает, что решение одной векторной задачи на каждой итерации по кратности рассеяния эквивалентно решению 36, 18, 14 скалярных задач соответственно. Такая математическая модель адекватно описывает физический процесс, но сложна для численных реализаций.

Для решения векторных краевых задач с учетом поляризации излучения могут быть использованы методы, применяемые для решения скалярного уравнения без учета поляризации. Наиболее разработанным как в аналитическом, так и в вычислительном плане является круг задач теории молекулярного (рэлеевского)

рассеяния. Расчет поляризованного излучения в средах с нерелевским рассеянием связан с большими вычислительными трудностями, вызванными сложным поведением элементов матрицы рассеяния, знакопеременностью компонент решения векторного уравнения переноса и их сложной пространственной и угловой зависимостью.

Дано обобщение и развитие оригинального авторского подхода решения скалярных и векторных общих краевых задач теории переноса излучения методом функций влияния, основанном на теории регулярных возмущений, теории обобщенных решений, теории оптического и квазиоптического передаточного оператора для гетерогенных систем. Важное приложение – это верификация и сравнительный анализ высокоточных и быстрых приближенных аналитических и численных методов и алгоритмов расчета вектора Стокса и интенсивности излучения для массового экспресс-анализа больших потоков данных аэрокосмического дистанционного зондирования и мониторинга окружающей среды.

Наличие универсального математического и программного аппарата позволит проводить эталонные расчеты, создавать базы расчетных данных радиационных характеристик, используемых при решении обратных задач дистанционного зондирования, проводить вычислительные эксперименты и имитационное моделирование каналов наблюдений и оценивать их информативность, верификацию приближенных методик, разработку и обоснование области применимости быстрых алгоритмов для массовых серийных расчетов, планирование экспериментов и оптимизацию систем измерений при решении научно-исследовательских и прикладных задач, а также исследовать процессы переноса фотонов и проводить тематический количественный анализ в задачах новых сфер приложений.

Роль математического моделирования задач теории переноса излучения в настоящее время возрастает в связи с новой международной концепцией развития международных космических систем наблюдений и мониторинга (без которых невозможно выполнение многих международных деклараций и соглашений, в частности, по озоновому слою, по охране лесов, по транснациональному переносу загрязнений, по климату, по выбросам газов с тепличным эффектом и т.д.).

Разработчики поляризационных методик всё те же (Россия, США, Нидерланды, Франция, Германия, Беларусь); за рубежом, особенно в США, поддерживается широкое распространение готовых (устаревших) компьютерных кодов (чтобы всё держать под контролем и не позволить проводить самостоятельные разработки); к сожалению, нигде не читаются лекции по теории переноса, тем более с учетом поляризации.

Разрабатывается многофункциональный универсальный комплекс физико-математических моделей и методов расчета характеристик системы переноса излучения и на его основе – информационно-математическая моделирующая система с широкой областью приложений для решения научно-исследовательских и прикладных задач. Теоретической основой являются многопараметрические многомерные векторные общие краевые задачи для интегро-дифференциального кинетического уравнения переноса электромагнитного излучения в рассеивающих, поглощающих, излучающих, поляризующих и деполаризующих природных и искусственных средах в диапазоне от ультрафиолетовых до миллиметровых волн [1-7].

Даже на современных высокопроизводительных вычислительных системах стоят проблемы скорости вычислений и оптимальной организации распараллеливания расчета при больших размерностях разностной сетки, а также передачи больших массивов результатов расчета по сетям от суперкомпьютера к рабочей станции оператора для последующей обработки. Новый подход к моделированию радиационных полей в оптически толстых и существенно неоднородных средах на базе модели переноса излучения в гетерогенных системах и метода векторных функций влияния обладает удивительными свойствами распараллеливания вычислений и построения новых алгоритмов декомпозиции: методом векторных функций влияния исходную задачу с областью определения решения большой размерности и большим размером разностной сетки фазового пространства задачи можно факторизовать на ряд малоразмерных подзадач, определенных на подобластях и разностных сетках меньшей размерности. При этом подобласти могут отличаться радиационными режимами и в них можно использовать разные приближения и методы решения векторных краевых задач теории переноса поляризованного излучения.

Используем следующие приемы распараллеливания вычислений:

- распределенные вычисления по физическим моделям: многоспектральные (по длине волны); оптико-геофизическая погода (по коэффициентам общей краевой задачи); по источникам;
- распределенные вычисления на основе методического распараллеливания - декомпозиции краевых задач: по подобластям; по параметрам вектора функций влияния; по параметрам вектора пространственно-частотных характеристик; по компонентам векторных функционалов;
- алгоритмическое распараллеливание для многомерных моделей: однократное рассеяние по характеристикам; многократное рассеяние по интегралам столкновений и по подобластям с разными сеточно-характеристическими схемами.

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 комплексом программ производится с помощью оболочек (wrapper's), написанных на языке описания сценариев Perl. Другими

словами, в многозадачной среде производится упаковка Fortran-программ внутрь модулей на языке Perl (Perl scripts).

Базовой для разработки выбрана операционная система LINUX, что обеспечивает полный набор штатных инструментальных средств, включая компиляторы с языков программирования C++ и Fortran, интерпретаторы языков описания «сценариев» Perl, Tcl/Tk, Python, которые 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. Например, в языках Tcl и Perl компоненты представляют собой специализированные команды, написанные на языке C++. Они выглядят точно так же, как и встроены команды языка, поэтому их использование при написании «сценария» не вызывает затруднений.

В последнее время в рамках Common Component Architecture развивается технология, использующая Interface Definition Language, аналогично CORBA и COM. В рамках Components Project разработан Scientific Interface Definition Language (SIDL), предназначенный для обеспечения научных параллельных вычислений. Программное средство Babel позволяет создавать SIDL-описания, описания языка программирования и платформы, генерировать код для связывания компонент. Babel состоит из набора связанных частей: SIDL, генератора кода, небольшой библиотеки поддержки и репозитория программного обеспечения. В настоящее время Babel поддерживает Fortran 77, C и C++ и предполагается реализовать поддержку Java, Python, Fortran 90 и Matlab. Babel читает спецификации SIDL интерфейса и генерирует XML-представление для взаимодействия между компонентами.

Монитор головной станции периодически сканирует файлы протоколов работ рабочих станций на предмет окончания работ и наличие сбоев. Для запуска на выполнение счетных заданий может использоваться аппарат XML-RPC (remote procedure call) или задания запускаются автоматически по мере поступления начальных файлов данных в директорию на станции-вычислителе по FTP. Такой подход позволяет проводить расчеты, не опираясь на какие-либо внешние средства (Distributed Processing Tools). Этот простейший вариант batch-processing может использовать пересылку и с помощью защищенных протоколов SSH и SFTP, в зависимости от того какой доступ разрешен на вычислительный комплекс. Такой подход требует, однако, непрерывной работы монитора, или нескольких копий монитора на головной станции и мониторов на всех используемых вычислителях. Мониторы на вычислителях большую часть времени «спят», периодически сканируя "горячие" директории. Мониторы реализованы на языке Perl. Для взаимодействия программ обработки на Fortran с программами на языке Perl DATA Language (объектно-ориентированное расширение языка Perl для манипулирования большими многомерными наборами данных и изображений) написаны оболочки на языке C с использованием `cfortran.h` и `PDL::PP`.

Комплекс математических моделей, методов и программного обеспечения представляет собой открытую развиваемую информационно-математическую систему моделирования.

Работа поддержана грантами РФФИ (проекты 09-01-00071, 11-01-00021).

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Т.А. Сушкевич, С.А. Стрелков, А.А. Иолтуховский. Метод характеристик в задачах атмосферной оптики, М., Наука, 1990, 296 с.
2. Т.А. Сушкевич. Математические модели переноса излучения, М., БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005, 661 с.
3. Т.А. Сушкевич, С.А. Стрелков. Учет диффузного отражения при решении векторного уравнения переноса, Доклады АН СССР, 1983, Т. 271, № 1, с. 89-93.
4. Т.А. Сушкевич, С.А. Стрелков, А.К. Куликов, С.В. Максакова. Модель переноса поляризованного излучения в плоском слое с границей раздела двух сред, Сиб. журн. вычисл. Математики, 1998, Т 1, № 2, с. 183-194.
5. Т.А. Сушкевич, С.А. Стрелков, С.В. Максакова. Математическая модель переноса поляризованного излучения, Математическое моделирование, 1998, Т 10, № 7, с. 61-75.
6. Т.А. Сушкевич, С.А. Стрелков. Функция влияния общей векторной краевой задачи теории переноса, Докл. РАН, 1999, Т 364, № 4, с. 457-461.
7. Т.А. Сушкевич, С.А. Стрелков. Модель переноса поляризованного излучения в системе атмосфера-земная поверхность, Сиб. журн. вычисл. Математики, 1999, Т 2, № 1, с. 89-98.