

Перенос излучения в природных и искусственных средах и супервычисления*

Т.А. Сушкевич, С.А. Стрелков, С.В. Максакова, В.В. Козодеров, Б.А. Фомин,
А.Н. Волкович, А.Б. Гаврилович, Е.В. Дмитриев, Л.Д. Краснокутская,
С.Д. Устюгов, В.П. Шари, В.А. Фалалеева, П.П. Григорьева, А.К. Куликов

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

Настоящая работа ориентирована на приложения в аэрокосмических системах наблюдений теории переноса излучения в диапазоне спектров солнечного и собственного излучения от жесткого ультрафиолета до миллиметровых волн. Особое внимание уделяется современным проблемам информационно-математического обеспечения нанодиагностики природных и техногенных сред, опасных явлений и объектов на основе аэрокосмического гиперспектрального дистанционного зондирования.

1. Введение

С 1992 года, когда на "Саммите Земли" в Рио-де-Жанейро была торжественно принята Рамочная конвенция ООН об изменении климата, РКИК (Framework Convention on Climate Change, UN FCCC) — Соглашение, подписанное более чем 180 странами мира, включая Россию, все страны бывшего СССР и все промышленно развитые страны, об общих принципах действия стран по проблеме изменения климата, практически все страны, входящие в ООН, приобщились к климатическим проблемам. РКИК вступила в силу 21 марта 1994 года (Россия ратифицировала РКИК в 1994).

С 7 по 18 декабря 2009 года в Копенгагене проходил климатический саммит ООН. Войдет ли данное событие в новейшую глобальную историю? И если войдет, то, с какими глобальными процессами будет связан прошедший климатический саммит? Задолго до начала саммита планируемая международная конференция преподносилась как всемирно-историческое событие, способное предопределить вектор развития человечества на десятилетия вперед. Итог известен. По мнению широкого круга аналитиков и экспертов крупнейший в истории международный климатический форум, в котором приняли участие около 20 000 участников, а также более 100 глав государств из 193 стран-членов ООН, завершился провалом. "Лучше, чем ничего" — так оценили итоги своей почти двухнедельной работы участники климатической конференции.

Непозволительная роскошь в кризисное время — заседать в широком составе довольно длительный срок и не принимать важных документов. Тем не менее, кое-каких результатов достичь удалось. Например, понимания, что *климатические проблемы в силу глобальности характера, "не имеют ответственных и виноватых"*, в связи с чем, весьма сложно договориться о том, кто и в каком размере будет компенсировать ущерб окружающей среде. "Тень мирового кризиса витала над Копенгагеном". Для широкого круга лидеров суверенных государств, прибывших на климатический саммит в Копенгаген, тема парниковых выбросов и всемирного потепления была не столь важна по сравнению с перспективой долгового кризиса 2008 года.

Ученых — специалистов по глобальным изменениям окружающей среды и климата пригласили, но к их мнению не прислушивались... В настоящее время мировое научное сообщество располагает практически достаточными фундаментальными знаниями и научным потенциалом, чтобы, объединив совместные усилия, провести достоверные комплексные и системные исследования на основе "сценариев", реализуемых на суперкомпьютерах

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 09-01-00071, 11-01-00021).

с привлечением данных длительных временных рядов космических наблюдений двойного назначения. Однако такого объединения ученых не происходит...

И сейчас, когда в России объявлены приоритеты "модернизации" и прорывные направления, среди которых видим "Информационно-телекоммуникационные системы", в том числе "супервычисления" и "грид-системы", а также "Рациональное природопользование" (в частности, влияние на экологическую и климатическую систему последствий естественно-природных и техногенных катастроф), НЕОБХОДИМО консолидироваться (поскольку задачи комплексные) и вновь занять ведущие позиции в компьютерном моделировании радиационных задач дистанционного зондирования Земли и других планет, радиационного баланса Земли, радиационного форсинга и радиационных блоков в моделях климата и прогноза (где до сих пор используются упрощенные плоские приближения для расчета переноса солнечного излучения) [1, 2].

2. Постановка задачи математического моделирования

Радиационное поле системы "атмосфера – земная поверхность (суша, океан)" — это *неотъемлемая компонента* биосферы, экосистемы и климата Земли, с одной стороны. С другой стороны, радиационные характеристики системы являются *носителями информации* о состоянии окружающей среды, атмосферы, облачности, океана, гидрометеоров и всевозможных выбросов с загрязняющими примесями (последствия техногенных аварий, военных действий, лесных и степных пожаров, извержений вулканов и т.д.), а также промышленной и транспортной инфраструктуры. *Электромагнитное излучение*, регистрируемое разными средствами, является *основным источником информации* о строении и физических свойствах планетных атмосфер и поверхностей при дистанционном зондировании. Для пассивных систем наблюдений *источниками излучения* являются *внешний солнечный поток* коротковолнового диапазона спектра (ультрафиолетовый, видимый, ближний инфракрасный) и *собственное излучение* планеты длинноволнового диапазона спектра (инфракрасный, миллиметровый), когда применимо квазиоптическое приближение теории переноса излучения.

В рамках развития вычислительных средств рассматриваются следующие модели переноса излучения.

I. Спектральная, пространственная и угловая структуры поля яркости — интенсивности светового поля (солнечного 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.

Нас интересует проблема расчета радиационного поля Земли в масштабах всей планеты. Радиационные проблемы требуют учета эффектов, связанных с поверхностью Земли. Проблемы энергетики и радиационного баланса Земли, когда Солнце играет роль источника излучения, обычно решаются в приближении плоского слоя без разделения вкладов атмосферной радиации и излучения земной поверхности, которое учитывают с некоторым усредненным альбедо. В нашем подходе атмосфера рассматривается как элемент "оптической" системы переноса излучения и суммарное излучение САЗ рассчитывается с использованием оптического передаточного оператора (ОПО), который формулируется на базе математического аппарата линейно-системного подхода и интеграла "суперпозиции".

Рассматривается общая краевая задача (ОКЗ) для кинетического уравнения переноса излучения в сферической системе атмосфера-Земля, освещаемой внешним параллельным солнечным потоком. На основе теории передаточного оператора и метода функций влия-

ния САЗ факторизуется на подобласти с различными оптическими свойствами и разными радиационными режимами. На основе линейно-системного подхода построено обобщенное решение задачи с оптическим передаточным оператором (ОПО), позволяющим учитывать пространственно неоднородную (мозаичную) подстилающую поверхность, а также гетерогенную структуру атмосферы (приземный слой, многоярусная облачность, стратосфера, мезосфера). Ядрами ОПО являются функции влияния. Функция влияния каждой подобласти определяется как решение первой краевой задачи (ПКЗ) для кинетического уравнения и является универсальной характеристикой системы переноса излучения, инвариантной относительно конкретных структур неоднородностей на границах, отражающих и пропускающих излучение.

Теоретическое построение и алгоритмы расчета оптического передаточного оператора основаны на теории обобщенных решений, теории интегральных преобразований обобщенных функций и рядов общей теории регулярных возмущений (асимптотический метод, когда решение выражается в виде рядов по малому параметру). Подход, разработанный на этих строгих математических основах, называем методом функций влияния [2]. Общность разработанной методики состоит в том, что она распространяется на разные диапазоны и условия дистанционного зондирования. Важно, чтобы "сценарий" и атмосферный канал рассматривались в рамках теории переноса излучения. Поэтому предпочтительнее избегать частого употребления термина "оптический", который сужает область применимости.

3. Нанодиагностика и супервычисления

Важнейшей современной тенденцией развития подходов и технологий дистанционного аэрокосмического зондирования, наряду с улучшением пространственного и спектрального разрешения, является переход от измерений относительных градаций яркостей, представляемых с помощью многоспектральных изображений (обычно не более десятка спектральных каналов), к получению абсолютно калиброванных данных в нескольких десятках, сотнях и даже тысячах каналов (гиперспектральные измерения). Информационная продукция, получаемая в результате обработки многоспектральных и гиперспектральных данных, открывает широкие возможности реализации инновационных технологий, главная особенность которых — получение количественных оценок параметров состояния наблюдаемых объектов природно-техногенной сферы в сравнении с их качественными оценками в традиционных подходах, а также установление элементного состава объектов. В изображениях от условных "псевдо-цветов" можно перейти к "природным" цветам. Цель исследований — теоретически обосновать возможности новых перспективных гиперспектральных методик аэрокосмического и наземного дистанционного зондирования системы атмосфера-Земля по спектрам солнечного и собственного излучения.

В настоящее время возросла актуальность таких исследований в связи с подписанием Международного Соглашения (более 40 стран) по организации международного глобального проекта по изучению Земли, международной космической системы аэрокосмического и наземного глобального мониторинга, международных Центров оперативной космической информации по катастрофическим и экологически опасным явлениям, а также в связи с новым этапом развития нанотехнологий для космических исследований, в частности, гиперспектрального (высокого спектрального разрешения) дистанционного зондирования объектов разной природы. Возможно, уже и не такая далекая перспектива - использование данных аэрокосмического дистанционного зондирования для решения проблем оперативного и системного управления территориями для обеспечения их устойчивого развития.

Новые перспективные возможности математического моделирования атмосферной радиации Земли связаны с разработкой информационно-математической системы для широкой области приложений на суперкомпьютерах и многопроцессорных вычислительных кластерах с распараллеливанием вычислений и распределением ресурсов, а также внедрением

GRID-технологий. В США, Японии, Германии, Англии, Франции, России появились суперкомпьютеры нового поколения, ориентированные на массовый параллелизм. Необходимо отметить, что сложные большие трудоемкие многомерные задачи пока что использовались для выполнения стратегических космических проектов.

Для диагностики и прогнозирования требуется серьезное исследование глобальных систем наблюдений и численное моделирование возможности дистанционного зондирования и мониторинга на основе "сценариев" развития в атмосфере и на земной поверхности техногенных чрезвычайных аварий и естественно-природных катастроф.

4. О супервычислениях и параллельных алгоритмах

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.

Библиотека программ численного решения краевых задач теории переноса излучения в рассеивающих, поглощающих и излучающих средах (атмосфера, океан, облачность, думы, гидрометеоры, водные бассейны) составляется 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.

Предложенная архитектура программного обеспечения с функциональным наполнением, ориентированным 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.

Используем следующие приемы распараллеливания вычислений:

- (1) распределенные вычисления по физическим моделям:
 - многоспектральные (по длине волны);
 - оптико-геофизическая погода (по коэффициентам общей краевой задачи);
 - по источникам;
- (2) 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;
- (3) алгоритмическое распараллеливание для многомерных моделей:
 - однократное рассеяние по характеристикам;
 - многократное рассеяние по интегралам столкновений и по подобластям с разными сеточно-характеристическими схемами.

БОЛЬШИЕ многомерные вычислительные задачи в теории переноса излучения не адаптировались к алгоритмам решения задач алгебры с использованием теории графов, которые разрабатывал В.В. Воеводин, с одной стороны. С другой стороны, архитектура и ресурсы памяти первых отечественных многопроцессорных вычислительных систем не позволяли реализовать эффективно параллельные алгоритмы. В задачах космических исследований используется Фортран (с прямым доступом к файлам) для обеспечения преемственности и наследования огромного накопленного потенциала. Не было подходящих

компиляторов.

В течении 20 лет мы искали свои подходы к организации супервычислений с распараллеливанием алгоритмов и проводили опытные испытания программной системы на всех доступных суперкомпьютерах. С 2002 года приспособились к суперЭВМ в МСЦ, но при переходе на многоядерные процессоры и 64-разрядную память обнаружили потерю точности. Тестовыми являются результаты, полученные на БЭСМ-6 и на основе которых шла апробация переносимости программного обеспечения на разные ЭВМ. Скорее всего, проблема в компиляторах Фортрана, которые почему-то оказываются некачественными (подавали несколько рекламаций разным разработчикам). Но исправленных компиляторов не могли дожидаться, поскольку ЭВМ уже выводили из строя...

Последние надежды на гибридные суперкомпьютеры с приличными компиляторами фирмы Portland Group (США). Данное программное обеспечение не имеет аналогов, а многолетняя репутация фирмы-разработчика позволяет надеяться на высокое качество упомянутого продукта. Надеемся, что использование этих компиляторов позволит как значительно упростить и ускорить разработку, переносимость и адаптацию прикладных программ для создаваемого суперкомпьютера, так и активировать и направить в нужную сторону отечественные исследования и разработки в данной области.

В последние годы, наконец-то, создали суперкомпьютеры соответствующего уровня производительности, в том числе и в России, а не только в США, Японии, Китае, ЕС, Индии и т.д.! В космосе сейчас присутствуют более 40 стран, а проблемами климата, прогноза погоды и экологической безопасности озабочены все страны ООН. У военных интерес к космосу поддерживался с начала космической эры. Если в Японии первый суперкомпьютер установили в "Центре по изучению климата", то в США самые мощные суперкомпьютеры устанавливают в Центрах NASA...

Стоит ЗАДАЧА оценивания информационного содержания гиперспектральных аэрокосмических измерений и заполнения существующего пробела в понимании реальных особенностей формирования спектральных образов наблюдаемых объектов и процессов для НАНОДИАГНОСТИКИ их состояния. *Необходимо обосновать оптимальное число измерительных каналов гиперспектрометров, их ширины и расположения по спектру длин волн и миниспутников на основе введенных информационных мер распознавания объектов и опасных явлений.*

НАУЧНАЯ ИДЕЯ основана на использовании существенных различий в спектральном ходе поглощения, рассеяния, излучения и пропускания основных компонент системы атмосфера-Земля и спектральных характеристик отражения объектами природно-техногенной сферы для выделения интервалов длин волн спектра многократно рассеянного солнечного и собственного излучения, информативных в отношении конкретных компонент, и на этой основе ИДЕНТИФИЦИРОВАТЬ КОМПОНЕНТЫ ПО ИХ СПЕКТРАЛЬНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ.

5. Заключение

СОВРЕМЕННАЯ ЗАДАЧА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И МОНИТОРИНГА состоит уже не столько в том, чтобы сделать космический снимок с использованием оптико-электронных аппаратов и цифровых каналов передачи космических данных на землю, определить альbedo или яркость земной поверхности (объектов) или провести радиационную коррекцию, ВАЖНЕЕ ВОССТАНОВИТЬ параметры состояния и количественные данные природных и других объектов по их спектральным образам.

В масштабах планеты стоит актуальная проблема создания международного глобального мониторинга Земли с целью исследования её эволюции и прогнозирования естественно-природных стихийных бедствий и антропогенно-техногенных катастрофических процессов.

Это ГРАНДИОЗНЫЕ ЗАДАЧИ, которые охватывают ряд важных направлений фун-

даментальных исследований в разных областях знаний (математики, физики, химии, биологии, геофизики, метеорологии, инженерно-конструкторских разработок), имеющих междисциплинарный характер и тематически объединяемых задачами комплексного изучения окружающей природной, космической и техногенной среды с использованием кинетической теории переноса излучения, спектральных методов молекулярной физики, методов и средств космических исследований и космического земледения с использованием перспективных гиперспектральных технологий дистанционного зондирования и НАНОДИАГНОСТИКИ, МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ и эффективных ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ с распараллеливанием СУПЕРВЫЧИСЛЕНИЙ на современных и перспективных суперкомпьютерах.

В масштабах планеты стоит актуальная проблема создания международного глобального мониторинга Земли с целью исследования её эволюции и прогнозирования естественно-природных стихийных бедствий и антропогенно-техногенных катастрофических процессов.

Для диагностики и прогнозирования требуется серьезное исследование глобальных систем наблюдений и численное моделирование возможности дистанционного зондирования и мониторинга на основе "сценариев" развития в атмосфере и на земной поверхности техногенных чрезвычайных аварий и естественно-природных катастроф.

Всемирная система мониторинга и иерархия моделей — главные инструменты для прогнозирования изменений в природных процессах и разделения естественных и антропогенных воздействий.

В последние годы специалисты в области климата и глобальных изменений окружающей среды признали важность радиационного форсинга, который может быть не менее 40%, что привело к необходимости совершенствования радиационных блоков в моделях климата, циркуляции и т.д.

Одно из важных направлений Федеральной программы по космосу связано с использованием космических данных для оптимального управления регионами с целью обеспечения их устойчивого развития.

Естественно стоит вопрос: а в каких вузах готовят молодых специалистов для работы в этих перспективных высокотехнологичных направлениях? И достаточно ли для их подготовки овладение только персональными компьютерами или графическими системами и ГИС? Мой ответ — без супервычислений и суперкомпьютеров прорывных достижений в глобальном мониторинге Земли не получится!

Литература

1. Сушкевич Т.А. О пионерских работах по математическому моделированию радиационного поля Земли при освоении космоса / Методы и алгоритмы обработки спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Институт космических исследований РАН. Сборник научных статей. Выпуск 5. Том 1. М.: ООО "Азбука-2000", 2008. С. 165–180. ISSN 2070-7401.
2. Сушкевич Т.А. Математические модели переноса излучения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. 661 с.