

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ СУПЕРВЫЧИСЛЕНИЙ В ПРОБЛЕМАХ МОНИТОРИНГА ЭКОСИСТЕМЫ, БИОСФЕРЫ И КЛИМАТА ЗЕМЛИ, ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ АВАРИЙ И ПРИРОДНЫХ КАТАСТРОФ НА ОСНОВЕ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

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

Посвящается 60-летию юбилею Института прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук, 50-летию первого в мировой практике научного эксперимента по дистанционному зондированию Земли (ДЗЗ), проведенного человеком в космосе, на космических кораблях «Восток-5» В.Ф.Быковским (14-19 июня 1963 г.) и «Восток-6» В.В.Терешковой (16-19 июня 1963 г.), когда из космоса впервые были обнаружены стратосферные аэрозольные слои в атмосфере Земли, а также Году охраны окружающей среды 2013 (Указ президента № 1157 от 10.08.2012).

Электромагнитное излучение как носитель информации о состоянии объектов. В настоящее время закладываются основы решения фундаментальных проблем, связанных с Землей как средой обитания человечества в XXI веке. От их решения зависят и проблема выживания человечества и ответ на вопрос, удастся ли избежать необратимых катастрофических изменений на Земле в обозримом будущем. На современном этапе развития человеческого сообщества благодаря достижениям природоведческих и естественных наук остро поставлен ряд проблем глобальных изменений окружающей среды, климата, экологии, без разрешения которых в недалеком будущем планета может оказаться на грани глобальной катастрофы:

- истощение озонового слоя и возрастание УФ радиации Земли, губительной для всего живого;
- увеличение выбросов в атмосферу соединений углерода и азота, метана и других газов, а также аэрозолей и связанное с этим изменение теплового режима на Земле, а также уровня Мирового океана;
- угрозы техногенных аварий и естественно-природных и антропогенных катастроф, а также нарушение естественной циркуляции веществ в природе, опустынивание, сокращение лесных и растительных покровов, деградация почвы и загрязнение земной поверхности, ледовых и снежных покрытий в Арктике.

Будучи Сторонами Венской конвенции об охране озонового слоя, руководители 55 стран 16 сентября 1987 года подписали Монреальский протокол по веществам, разрушающим озоновый слой. В международных программных документах “Конвенция по изменению климата” и “Повестка XXI века” (Рио-де-Жанейро, 1992), а также в “Концепции перехода Российской Федерации к устойчивому развитию” (см. Указ Президента Российской Федерации от 1 апреля 1996 года № 440) особое внимание уделяется проблеме устойчивого развития планеты. Эти международные обязательства приводят к вынужденным изменениям энергопроизводящих, энергопотребляющих и других технологий, которые потребуют миллиардных капиталовложений.

В теоретических и прикладных исследованиях стал применяться термин “глобальная система” (ГС): необходимы анализ и синтез знаний о развитии планетарной цивилизации. Особую значимость приобретает проблема адекватной оценки роли и веса моделируемых подсистем в долгосрочной эволюции всей ГС, в том числе связанных с радиационным полем Земли. Радиационные процессы играют центральную роль в тепло-энергообмене системы атмосфера-земная поверхность (суша, океан) и, как следствие, в формировании локального, регионального и глобального климата планеты. Нарушение радиационных процессов может спровоцировать разрушение самовосстановительного потенциала биосферы Земли и вызвать катастрофические последствия. Для эффективного использования современных информационных технологий по фундаментальным проблемам ГС требуются комплексные теоретико-расчетные работы, поскольку натурные условия практически не реализуемы в лабораториях, а натурные эксперименты либо невозможны, либо опасны, либо трудно контролируемы условия их проведения. Применение методов физико-математического моделирования и прогнозирования радиационных процессов, развитие информационной базы с использованием ЭВМ и данных всемирного мониторинга создают основу для системного подхода к изучению такой динамичной и сложной системы как планета Земля.

При дистанционном зондировании и мониторинге экологических, природных и технических объектов носителем информации об их состоянии является электромагнитное излучение, регистрируемое различными средствами. Радиация - одна из определяющих компонент земной экосистемы, для поведения которой характерно взаимодействие отдельных компонент с проявлением синергизма (обратных связей, которые приводят иногда к взаимоусилению различных процессов). Именно это обстоятельство определяет исключительную важность системного подхода, междисциплинарных исследований физических, химических и биологических процессов на основе математического моделирования, позволяющего с помощью

вычислительных экспериментов прогнозировать аварийные ситуации и последствия их влияния на природные объекты и окружающую среду. Кроме того, такие эксперименты предоставляют возможность выбора оптимальных условий и средств для оперативного мониторинга возникновения и развития аварий на базе расчетных моделей.

Создание физико-математических моделей высокоинформированных каналов атмосферно-оптических наблюдений при своем решении обеспечивает получение оперативных данных о широком круге оптических и метеорологических параметров атмосферы, контроль уровня загрязненности воздушного бассейна, возможность систематических исследований быстропротекающих процессов в системах атмосфера-земная поверхность, атмосфера-океан, атмосфера-гидрометеоры и т.д. В реальных условиях аэрокосмических наблюдений технологические возможности контроля состояния среды и изменения сигналов с необходимой точностью ограничены, поэтому в подобных условиях многие методические вопросы могут быть сняты путем численного моделирования. Нужны модельные вычислительные эксперименты, ориентированные на решение проблемы планирования и оптимизации измерительных комплексов, проведения системных исследований по использованию комплексных средств для восстановления наиболее полного набора параметров среды на момент измерения. Методическая и программная база для таких работ заложена [1-6].

Информационно-математическая модель радиационных процессов. Цель исследования - это разработка, развитие и совершенствование универсальных базовых физико-математических моделей, математического аппарата, программного комплекса для моделирования радиационных процессов и расчета угловых, пространственных, спектральных, интегральных характеристик радиационного поля на основе кинетического уравнения переноса электромагнитного излучения в природных средах. Система мониторинга и иерархия моделей - главные инструменты для прогнозирования изменений в природных процессах и разделения естественных и антропогенных воздействий.

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.

Теоретической основой этих работ являются решения задач теории переноса излучения с учетом поляризации и рефракции, аэрозольного и молекулярного рассеяния и поглощения солнечного и собственного излучения, анизотропии, пространственной неоднородности и стохастичности среды (параметров атмосферы, суши, океана, облачности, гидрометеоров). Приходится иметь дело с многомерными, многопараметрическими краевыми задачами для интегродифференциального кинетического уравнения переноса излучения в рассеивающих, поглощающих, излучающих, поляризующих и преломляющих средах в диапазоне длин волн от УФ до СВЧ.

Теория переноса - один из важных разделов физики с разнообразными приложениями в атмосферной оптике, астрофизике, теории диффузии и переноса рентгеновского, гамма и УФ-излучения через вещество, теории процессов сложного теплообмена, газодинамике с излучением, теории видения и теории переноса изображения через мутные среды, при изучении рассеяния и поглощения электромагнитного излучения в атмосфере, океане, водоемах, облаках, гидрометеорах, а также в сложных гетерогенных системах и т.д.

Основы информационно-математической системы моделирования радиационного поля Земли. Одна из целей - создание целостного представления о закономерностях существования Земли как планеты и среды обитания человечества, о реальном состоянии природной среды и направленности эволюции экосистемы Земли, оценка ее способности выдерживать антропогенные нагрузки, т.е. ее самовосстановительного потенциала. Определены задачи прямого моделирования, вычислительные средства для решения задач дистанционного зондирования, основные составные части математического обеспечения. 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, земной поверхности, океана; банк спектров поглощения атмосферных газов; банк характеристик аэрозольного рассеяния; формирование случайной модели атмосферы; пакеты данных к программам расчета радиационных характеристик и т.д.

Вторая группа программ - численное решение скалярного и векторного уравнения переноса излучения быстрыми приближенными и репрезентативными высокоточными методами: для сферической геометрии, для

плоской геометрии, для поляризационной задачи, для случайно-неоднородной атмосферы, для системы атмосфера-океан, для комплексного уравнения переноса, для функции пропускания атмосферы, отягощенной многократным рассеянием, и т.д.

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

Широко применимы подходы, основанные на решении некорректных задач с регуляризирующими алгоритмами и априорной, в том числе статистической, или иной информацией об искомом решении (например, архивы решений или базы данных для известных, контролируемых состояний зондируемой системы). Это может быть также свойство монотонности или фракталы, которые эффективны при восстановлении спектральных, высотных, пространственных, временных распределений оптических и метеорологических параметров атмосферы и поверхности на основе космических данных, априорная информация о которых известна с большой ошибкой.

Задачи прямого моделирования:

- вычислительные эксперименты на ЭВМ, моделирующие реальные физические процессы, происходящие в системах атмосфера-земная поверхность, атмосфера-облачность, атмосфера-водный бассейн, атмосфера-гидрометеоры;
- отработка методов решения обратных задач комплексного дистанционного зондирования антропогенных примесей и земной поверхности;
- разработка методики оперативного дистанционного зондирования аэрозольных и газовых примесей в атмосфере с использованием априорной (расчетной) информации в виде банков данных;
- апробирование комплексных методик и поиски ответов на методологические вопросы:
 - a) достоверность результатов решения обратных задач можно проверить с помощью решения прямых задач,
 - b) определение погрешностей знания параметров моделей и методик и их влияния на конечные результаты,
 - c) корректность и эффективность решения обратных задач, в частности, различимость причин через информативность измеряемых величин,
 - d) оценки априорной информации (репрезентативность, достаточность и необходимость), параметризация, сжатие информации;
- определение погрешностей инженерно-проектных и инструментальных методик;
- оценивание статистических характеристик оптического канала;
- имитационное моделирование эмпирических методик комплексных исследований, проводимых на аэрокосмических аппаратах в интересах природно-ресурсных и экологических проблем;
- тематическая обработка и интерпретация результатов натурных измерений и экспериментов и прогнозирование наблюдаемых ситуаций;
- развитие методик использования наземной и аэрокосмической информации для решения сложнейших задач, связанных с моделированием глобальных процессов окружающей среды, в частности, трансграничного переноса антропогенных примесей в атмосфере;
- развитие методик оперативного определения оптических и метеорологических параметров атмосферы с целью учета и устранения искажающего влияния атмосферы на результаты дистанционного зондирования земной поверхности и океана;
- выяснение основных закономерностей происходящих реальных физических процессов с целью получения научно обоснованных рекомендаций для моделирования глобальных проблем окружающей среды.

Решение прямой задачи позволяет на основе численного моделирования установить

- закономерности формирования спектрального, пространственного и углового распределений радиационных характеристик системы Земля-атмосфера, коэффициентов спектральной яркости земной поверхности, океана, их зависимости от физических и метеорологических параметров системы, условий освещения и наблюдения;
- чувствительность измеряемых спектро-энергетических и фотоспектрометрических характеристик, а также оптико-визуальных изображений к исследуемым физическим величинам, в частности, к концентрациям и пространственным распределениям всевозможных примесей антропогенного происхождения в атмосфере, на поверхности Земли и в водных бассейнах.

Результаты прямого моделирования можно использовать для оптимизации содержания и условий измерений с помощью аэрокосмических средств в целях контроля состояния системы Земля-атмосфера в момент измерений по большому набору параметров системы, а также для прогностического моделирования радиационных характеристик Земли, в том числе при возможных аномальных явлениях или в критических ситуациях, в экологическом смысле (например, при истощении озонового слоя, образовании "озоновых дыр",

промышленных газовых примесях, кислотных осадках, уничтожении растительных покровов, крупных пожарах и т.д.).

Обратные задачи дистанционного зондирования. Перечислим некоторые обратные задачи дистанционного зондирования параметров системы атмосфера-Земля, которые нуждаются в сопровождении прямым моделированием:

- оптические характеристики атмосферы;
- пространственное распределение оптической толщины атмосферы;
- пространственное распределение и концентрации природных малых газовых составляющих и антропогенных примесей в атмосфере;
- оптические характеристики распространения антропогенных примесей в атмосфере;
- глобальное распределение и распространение примесей, загрязняющих атмосферу (естественного и антропогенного происхождения);
- глобальные распределения и изменчивость атмосферного замутнения и факторов, его определяющих;
- восстановление вертикальных профилей температуры, влажности и коэффициента ослабления излучения атмосферным аэрозолям;
- изучение "озоновых дыр" по спутниковым данным лимбовых и надирных измерений;
- пространственное распределение и общее содержание озона;
- определение очагов локализации, области распространения антропогенного воздействия на биосферу;
- определение очагов, границ зон и интенсивности осадков со спутников;
- спектральные характеристики и горизонтальное распространение природных и антропогенных образований на поверхности суши и океана;
- спектральные коэффициенты яркости и альbedo неоднородной поверхности;
- границы и характер снега, льдов, растительного покрова, суши;
- состояние и характер сельскохозяйственных угодий, лесов;
- определение шлейфов антропогенных выбросов загрязняющих соединений во внутренние водоемы от промышленных предприятий и сельскохозяйственных производств;
- определение содержания хлорофилла и взвесей (органического и неорганического происхождения) во внутренних водоемах;
- проверка гипотез о механизмах изменения газового состава атмосферы.

Математическое обеспечение. *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 в плоской и сферической геометриях;
- 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 СВЧ;
- банки данных радиационных характеристик (пространственно-частотные характеристики и функции влияния локальных возмущений параметров или источников в атмосфере 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;
- справочно-информационная система;
- экспертные системы тематической направленности.

Библиотека программ численного решения краевых задач теории переноса излучения в рассеивающих, поглощающих и излучающих средах (атмосфера, океан, облачность, гидрометеоры, водные бассейны) состоит из набора программ на Фортране, 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:

- a) оптический диапазон, в том числе УФ (источник - Солнце, многократное рассеяние);
- b) ближний ИК-диапазон (источники - Солнце и собственное излучение, многократное рассеяние);
- c) ИК-диапазон (источник - собственное излучение, без многократного рассеяния, сложная структура спектров поглощения);
- d) ММВ и СВЧ 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, 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.

Предложенная архитектура банка знаний 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.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 11-01-00021, 12-01-00009).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Численное решение задач атмосферной оптики. Сборник научных трудов ИПМ им. М.В.Келдыша АН СССР, 1984, 234с.
2. Т.А. Сушкевич, С.А. Стрелков., А.А. Иолтуховский. Метод характеристик в задачах атмосферной оптики. М., Наука, 1990, 296с.
3. Т.А. Сушкевич, С.А. Стрелков, С.В. Максакова и др. Теоретические основы и расчетные модели для построения мониторинга возникновения и развития аварий и катастроф. Энциклопедия. Безопасность России. Т. 6. Функционирование и развитие сложных народнохозяйственных, технических, энергетических, транспортных систем, систем связи и коммуникаций. М., МГФ "Знание", 1998, с.419-430.
4. Т.А. Сушкевич. Математические модели переноса излучения. М., БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005, 661с.
5. Т.А. Сушкевич, С.А. Стрелков, С.В. Максакова. О перспективах аэрокосмического гиперспектрального дистанционного зондирования для нанодиагностики опасных явлений. Известия вузов, Физика, 2009, № 2/2, с.149-155.
6. Т.А. Сушкевич, С.А. Стрелков, С.В. Максакова и др. Информационно-математический аспект аэрокосмического гиперспектрального мониторинга окружающей среды. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Выпуск 6. Том II. М., ООО "Азбука-2000", 2009, с.552-559. ISSN 2070-7401.