

Информационно-математическое обеспечение аэрокосмических систем дистанционного зондирования и радиационного форсинга на климат Земли для прогноза последствий освоения региона Арктики и суперкомпьютинг*

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

ФГБУН Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

В 2015 году мировая научная общественность отмечает дни памяти крупнейших ученых, которые стояли у истоков создания великого научного наследия теории переноса излучения в природных средах и её приложений в космических проектах, астрофизике, климатологии, метеорологии, дистанционном зондировании Земли, глобальном мониторинге опасных объектов и последствий природных и техногенных катастроф и т.д. Речь идет об отечественных достижениях мирового уровня и современном развивающемся в России научном потенциале, который в должной мере обеспечивает методические основы теоретико-расчетных исследований радиационных процессов и радиационных полей в регионе Арктики с использованием суперкомпьютеров и распределенных вычислительных инфраструктур с сетевым компьютерингом.

1. Введение

Работа посвящается «Международному Году света и световых технологий (IYL 2015)», который был провозглашен на 71-м пленарном заседании 68-й сессии Генеральной ассамблеи ООН. «Свет - это символ единения, символ мудрости», - подчеркнул глава ООН 19 января на церемонии в штаб-квартире ЮНЕСКО в Париже. Свет – это одна из фундаментальных форм электромагнитного поля, которая обладает свойством дуализма (электромагнитная волна и фотон) и описывается и волновой и корпускулярной квантовой теориями, в том числе кинетической теорией переноса излучения [1-7]. Международный Год света напоминает о роли света в жизни не только ученых, но и человечества в целом, и важно повысить всеобщий уровень исследований о том, *как световые технологии могут содействовать решению глобальных проблем и призваны привести преобразования в XXI век, подобные тем, которые привнесла электроника в XX век.* Как никогда остро стоит и проблема «электромагнитной безопасности».

Открытие света и его свойств и приложений связано с именами великих ученых, таких как Аристотель, Галилео Галилей, Иоганн Кеплер, Исаак Ньютон (теория света, цвета, рефракции), Христиан Гюйгенс («Трактат о свете»; теория отражения, преломления и двойного лучепреломления), Огюст Френель (понятие «световая волна», теория дифракции), М.В. Ломоносов (корпускулярно-кинетическая теория), Уильям Гершель (открыл инфракрасное излучение), Иоганн Вильгельм Риттер (открыл ультрафиолетовое излучение), Майкл Фарадей (предсказал существование электромагнитных волн), Джеймс Максвелл (теория электромагнитного поля в классической физике, теория электромагнитных взаимодействий, обоснование существования электромагнитных волн, кинетическая теория), Герман Гельмгольц (зрение и теория цветоощущения), А.Г. Столетов (фотоэффект, закон Столетова), П.Н. Лебедев (световое давление), Орест Хвольсон (диффузия света, актинометрия), Нобелевский лауреат Макс Планк (теория теплового излучения, излучение абсолютно черного тела, открытие квантовой энергии, начало квантовой физики, понятие «фотон»), Нобелевский лауреат Альберт Эйнштейн (корпускулярная теория света; интенсивность света как мера плотности световых квантов; теория рассеяния света на термодинамических флуктуациях в среде, понятие «фотон»), Нобелевский лауреат Макс Борн (квантовая теория, оптическая активность кристаллов, жидкости, газа, рассеяние

* Исследование поддерживается грантами Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 15-01-00783, 14-01-00197) и проектом Программы фундаментальных исследований РАН (ОМН-3(3.5) ПФИ РАН).

света и частиц), Людвиг Больцман (основатель молекулярно-кинетической теории, кинетическое уравнение переноса излучения и частиц), Нобелевский лауреат Субрахманьян Чандрасекар (перенос лучистой энергии), Нобелевский лауреат Чарльз Као (передача света и информации через волоконно-оптический кабель), Нобелевские лауреаты Арно Пензиас и Роберт Вильсон (открытие реликтового космического электромагнитного микроволнового излучения) и др.

Восприятие света в различных культурах эволюционировало сквозь века. Можно вспомнить вклад арабского ученого XI века Ибн аль-Хайсама в искусство эпохи Возрождения, который в 1015 г. основал теорию влияния естественного света и цветных лучей на зрение. Альтернативная энергия, медицина, сельское хозяйство, искусство, кинематограф, исследование космоса, астрофизика, нанодиагностика, нанотехнологии, фотоника, лазеры... Области применения световых технологий можно перечислять долго. Гигантский научно-технический прогресс и беспрецедентный рост влияния человека на природу в XX веке ещё в 70-е - 90-е годы привели ученых всего мира, занимающихся анализом нарастающих антропогенных и естественно-природных воздействий на окружающую среду, к выводу: всемирная система мониторинга и иерархия моделей - главные инструменты изучения и предсказуемости изменений природных процессов и разделения естественных и антропогенных воздействий на сложнейшую динамическую систему, какой является планета Земля. В теоретических и прикладных исследованиях внедрился термин «Глобальная система»: необходимы анализ и синтез знаний о развитии планетарной цивилизации. Особую значимость приобретает проблема адекватной оценки роли и веса моделируемых подсистем в долгосрочной эволюции всей «Глобальной системы», в том числе связанных с радиационным полем Земли [7-21].

С 2004 года более 40 стран участвуют в международном проекте GEOSS – Глобальная Система Наблюдений Земли (ГСНЗ). В повестке дня современной цивилизации ведущее место занимает освоение и покорение региона Арктики. Этот фундаментальный международный проект по сложности и масштабности почти такого же масштаба, как проект освоения и покорения космоса, и для его реализации чрезвычайно важно использовать приобретенный опыт и в теории и в практике при создании комплексных систем ПРО и ПВО, включая системы оперативного наблюдения и глобального мониторинга, принятия решения и управления с использованием суперкомпьютеров, информационных технологий и технологий Интернет, ГРИД, «облачных», ГЛОНАСС и т.п. компьютеринга. Немало аналогий: объект исследования труднодоступен, проект освоения комплексный и междисциплинарный, высокотехнологичный и фундаментальный, международный и цивилизационный, остро стоят несколько ключевых для планеты Земля вопросов, хотя история изучения Арктики насчитывает сотни лет. Почему изменяются океанические течения? Почему тает лед? Какова угроза «всемирного» потопа и «ледникового периода»? Как могут измениться климат и биосфера за полярным кругом под влиянием естественно-природного и антропогенно-техногенного воздействия? Какие угрозы связаны с увеличением добычи углеводородов на шельфе океана и последствиями расширения сферы нефте-газовой отрасли? Как обеспечить круглогодичный Северный морской путь для судов? Ответы на вопросы можно получить, только если всем миром вплотную заняться «Программой Арктика».

2. Постановка задачи

В связи с ростом риска естественно-природных и техногенных аварий, проведения военных операций и возможных крупномасштабных террористических актов экологическая и технологическая безопасность переходят в разряд стратегических и важнейших социально-экономических факторов, а математические модели становятся эффективным инструментом повышения качества и оперативности экологического прогнозирования и выявления, в упреждающем режиме, предпосылок экологических катастроф на основе компьютерного моделирования «сценариев» и дают значительный социально-экономический эффект за счет предупреждения и своевременного принятия мер по снижению их отрицательных последствий.

В течение тысячелетий человечество изучает звезды и планеты солнечной системы путем визуальных, а позднее фотографических и фотоэлектрических наблюдений. Только планета Земля до середины 20-го века оставалась недоступной. Лишь по отраженному свету от поверхности Луны (пепельный свет) представлялось возможным оценить интегральное излучение Земли. Широкие возможности исследований радиационных характеристик Земли появились в

результате создания ракетной и космической техники [8-21]. Электромагнитное излучение, регистрируемое разными средствами, является основным источником информации о строении и физических свойствах планетных атмосфер и поверхностей при дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ). 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). В активных системах источником инсоляции может быть лазерный или прожекторный луч. В.И. Вернадский : «Своеобразным, единственным в своем роде, отличным и неповторяемым в других небесных телах представляется нам лик Земли — ее изображение в космосе, вырисовывающееся извне, со стороны, из дали бесконечных небесных пространств. В лике Земли выявляется *поверхность* нашей планеты, ее *биосфера*, ее наружная оболочка, ограничивающая ее от космической среды. Лик Земли становится видимым благодаря проникающим в него световым излучениям небесных светил, главным образом Солнца» [22].

Солнечное излучение - один из неотъемлемых факторов жизнеобеспечения человека, животного и растительного мира на Земле, а также одна из определяющих компонент земной экосистемы и биосферы, для поведения которых характерно взаимодействие отдельных компонент с проявлением синергизма (обратных связей, которые иногда приводят к взаимоусилению различных процессов). Поле солнечного излучения влияет на механизмы изменчивости (динамические процессы: циркуляция, конвекция, турбулентный перенос; радиационные и фотохимические процессы) геофизического, метеорологического, климатического состояния Земли, которые обладают сложными нелинейными связями, затрудняющими предсказание возможных эффектов, оценку их величины и значимости. В.И. Вернадский : «Солнцем в корне переработан и изменен лик Земли... уже ясно огромное значение в биосфере коротких ультрафиолетовых волн солнечной радиации, длинных красных тепловых и промежуточных лучей видимого светового спектра. В строении биосферы... можем выделить ее части, играющие роль трансформаторов для этих трех различных систем солнечных колебаний» [22].

Информационно-математическое обеспечение — обязательная составная часть любого космического проекта. При подготовке аналитических обзоров изданы препринты [8-10], в которых собраны наиболее значимые публикации и пионерские издания, содержащие результаты и достижения в области ДЗЗ (более 800 ссылок до 1999 г.). Сейчас это воспринимается как история науки и научный потенциал. Освоение космического пространства послужило фактором формирования новых научных направлений, связанных с вычислительной математикой, математическим моделированием радиационного поля Земли, теорией переноса изображения, теорией видения, теорией обработки и распознавания образов, нанодиагностики и т.д.

В зависимости от длины волны, или частоты колебаний, и особенностей взаимодействия с веществом весь спектр электромагнитных волн делится на следующие основные диапазоны: радиоволны, микроволновое излучение, инфракрасное излучение, видимый свет, ультрафиолетовое излучение, рентгеновское излучение и жесткое гамма-излучение. Электромагнитное излучение способно распространяться практически во всех средах и в соответствии с приложениями может описываться разными физико-математическими моделями – это могут быть уравнения Максвелла, уравнение Гельмгольца, уравнение Ландау, уравнение Власова, уравнение Лиувилля, уравнение Шрёдингера, уравнение Фоккера-Планка, уравнение Чепмена-Колмогорова-Смолуховского, уравнение диффузии или квазидиффузии, уравнения Боголюбова, кинетические уравнения Больцмана, интегральное уравнение переноса и их приближения. В 1955 году в Институте Келдыша профессор Е.С. Кузнецов [3] создал единственный в мире отдел «Кинетические уравнения», в котором проводились исследования всех типов уравнений и классов моделей кинетической теории в разных приложениях, в том числе в атомных, реакторных и термоядерных проектах, высоко- и низкотемпературной плазме, атмосферной оптике, оптике океана, космических проектах, астрофизике и т.д. В настоящее время в России сохранились две научные школы, сформированные при выполнении стратегических атомных и космических проектов по созданию «ракетно-ядерного щита», освоения космоса и разработки ПРО: в ВЦ СО РАН (н. ИВМиМГ) Г.И. Марчук и Г.А. Михайлов [6] основали школу по методам статистического моделирования и Монте-Карло, а в ИПМ им. М.В.Келдыша РАН специализируются по детерминированным аналитическим и численным методам решения задач теории переноса, в том числе с параллельными алгоритмами на многопроцессорных вычислительных

системах и суперкомпьютерах. Эти коллективы занимают лидирующие позиции в мировой науке, а подходы, методы и алгоритмы взаимно дополняют и вместе создают всеобъемлющий научный потенциал, достаточный для решения стоящих задач.

Сложность задачи заключается в непрерывной динамической изменчивости и стохастичности модели среды, большом разнообразии процессов трансформации энергии Солнца, вариантов визирования и способов измерений. Имеем дело с краевыми задачами для интегродифференциального или интегрального кинетического уравнения, описывающего перенос излучения в рассеивающих, поглощающих, излучающих, преломляющих, поляризующих средах с 1D, 2D или 3D плоской или сферической геометрией. Учитывая масштабность, многопараметричность, многовариантность земных условий, а также размерность фазового объема задач (от 2 до 7 переменных) несомненно требуется широкое использование информационных технологий и суперкомпьютеров, освоение которых начали в 1989 году.

3. Параллельные алгоритмы

Для космических проектов и космических наблюдений с первых шагов освоения космического пространства необходимо было разрабатывать инструментарий решения двух основных классов многомерных задач теории переноса излучения, актуальность которых возросла [7]:

- для 2D и 3D сферической оболочки (сферическая Земля с атмосферой, сушей, океаном),
- для 3D плоского слоя (система «атмосфера - земная поверхность, океан»),

с двумя типами источников:

- внешний параллельный поток солнечного (коротковолнового) излучения,
- собственное (длинноволновое, инфракрасное, миллиметровое) излучение планеты.

Используются и апробированы следующие алгоритмы распараллеливания вычислений:

- 1) распределенные вычисления по физическим моделям (для ГРИД- и «облачных» систем):
 - многоспектральные (по спектру длин волн, до двух миллионов полос поглощения);
 - по оптико-геофизической погоде (по коэффициентам общей краевой задачи);
 - по источникам излучения;
- 2) распределенные вычисления на основе методического распараллеливания - декомпозиции краевых задач:
 - по моделям переноса излучения, т.е. по приближениям теории переноса излучения;
 - по подобластям гетерогенной среды;
 - 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;
 - по квадрантам угловых разностных сеток;
 - по подобластям с разными сеточно-характеристическими схемами.

4. Информационно-математическая система

Создаваемая информационно-математическая система содержит три группы программных комплексов, соответствующих трем этапам решения задачи.

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 – библиотека программ численного решения уравнения переноса излучения быстрыми приближенными и репрезентативными высокоточными методами.

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

Реализация функции управления и сетевого взаимодействия комплексом программ производится с помощью оболочек (wrapper's), написанных на языке описания сценариев Perl. Комплекс математических моделей, методов и программного обеспечения представляет собой открытую развиваемую систему математического моделирования.

Разработана универсальная вычислительная среда, включающая пакеты программ NACRE-M (New Automatic Code Radiation Earth – M-layers) для численного решения общих краевых задач теории переноса излучения в плоских гетерогенных системах и расчета радиационных характеристик (угловых, пространственных и спектральных распределений энергетической яркости и функций влияния, сферические и полусферические плотности и потоки излучения, коэффициенты диффузии и анизотропии полей излучения и т.п. функционалы) с учетом аэрозольно-молекулярного рассеяния и поглощения, сильной анизотропии рассеяния, а также средства автоматизации, написанные на языке описания сценариев Perl, для организации распараллеливания расчетов, архивации и тематической обработки результатов расчетов для широкой области приложений. Этот комплекс адаптирован к использованию на высокопроизводительных ПК и многопроцессорных вычислительных системах, в том числе на суперкомпьютерах в МСЦ. Комплекс математических моделей и методов представляет собой открытую развиваемую систему математического моделирования. Аналогов не существует.

5. Заключение

Космические средства создают уникальные условия для диагностики и мониторинга земных объектов и явлений в глобальном масштабе, а тем более в условиях Арктики. При дистанционном зондировании Земли из космоса фактически решаются обратные задачи, когда физические, химические, биологические, геометрические характеристики объектов наблюдения определяются с использованием функциональной зависимости между ними и измеряемыми параметрами. Для установления таких зависимостей необходимы полигонные испытания и решения прямых задач математического моделирования, в которых устанавливается чувствительность радиационных полей к параметрам и свойствам среды и объектов.

Это долгосрочная стратегия в области международной космической деятельности и «computer science». Основная фундаментальная проблема связана с развитием нового направления в науке, разработкой методов и средств для экспертизы, прогнозирования и критериев оценки опасности процессов, обусловленных глобальными изменениями климата, биосферы, экологии и последствиями катастрофических явлений, замена натуральных испытаний вычислительным экспериментом и имитационным моделированием. В перспективе экологическая и технологическая безопасность не только в масштабах России, но и всей планеты переходит в разряд стратегических и важнейших социально-экономических факторов, а математические модели становятся эффективным инструментом исследований и решения научных и практических задач.

В перспективе целесообразно разработать тематическую информационно-математическую систему с библиотекой компьютерных кодов и компьютеринга для моделирования электромагнитных задач и распространения света на основе разных физико-математических моделей в разных приближениях в разных средах для разных приложений. В настоящей работе ограничиваемся проблемами моделирования неравновесных радиационных процессов в природных средах Земли, находящихся в динамическом состоянии, в рамках классической кинетической теории Больцмана на основе интегро-дифференциального уравнения, которое может быть получено из классической системы уравнений Максвелла путем статистического усреднения с учетом только парных столкновений или взаимодействий.

Статья посвящается 90-летию основания Академии наук СССР (1925 г.) и памяти последнего Президента АН СССР академика Гурия Ивановича Марчука в связи с 90-летием со дня его рождения (08.06.1925 - 24.03.2013), академика Виктора Викторовича Соболева в связи со 100-летием со дня его рождения (02.09.1915 - 07.01.1999), академика Василия Сергеевича Владимировича (09.01.1923 - 03.11.2012) и моего учителя профессора Евграфа Сергеевича Кузнецова (13.03.1901 – 17.02.1966), с которыми я встретила, когда мне было всего 20 лет, и которые оказали колоссальное влияние на формирование моего пути в науке и работе.

Литература

1. Максвелл Дж.К. Труды по кинетической теории / Пер. с англ. под ред. В.В. Веденяпина и Ю.Н. Орлова. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. 406 с.
2. Иванов В.В. Столетие интегрального уравнения переноса излучения // Рассеяние и поглощение света в природных и искусственных средах. Минск: ИФ АН БССР, 1991. С. 10-36.
3. Кузнецов Е.С. Избранные научные труды / Отв. ред. и составитель Т.А. Сушкевич. М.: Физматлит, 2003. 784 с.
4. Чандрасекар С. Перенос лучистой энергии / Пер. с англ. издания Oxford, 1950, под ред. Е.С. Кузнецова. М.: Изд-во иностранной литературы, 1953. 432 с.
5. Соболев В.В. Перенос лучистой энергии в атмосферах звезд и планет. М.: Изд-во ГИТТЛ, 1956. 391 с.
6. Марчук Г.И., Михайлов Г.А. и др. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука, 1976. 283 с.
7. Сушкевич Т.А. Математические модели переноса излучения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. 661 с.
8. Сушкевич Т.А., Максакова С.В. Обзор методов учета земной поверхности в задачах дистанционного зондирования и расчетах радиационного поля Земли – 2 / Препринт № 52. М.: ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, 1999. 32 с.
9. Сушкевич Т.А., Максакова С.В. Обзор методов учета земной поверхности в задачах дистанционного зондирования и расчетах радиационного поля Земли – 3 / Препринт № 53. М.: ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, 1999. 32 с.
10. Сушкевич Т.А., Максакова С.В. Обзор методов учета земной поверхности в задачах дистанционного зондирования и расчетах радиационного поля Земли – 4 / Препринт № 54. М.: ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, 1999. 32 с.
11. Космическое земледование: Диалог природы и общества. Устойчивое развитие / Под ред. В.А. Садовниченко. М.: Изд-во МГУ, 2000. 640 с.
12. Гуди Р.М. Наблюдения Земли: дилемма Франкенштейна // Исслед. Земли из космоса. 1997. № 4. С. 93-99
13. Кондратьев К.Я. Глобальная система наблюдений суши (GTOS): обнаружение и мониторинг континентальных экосистем // Исслед. Земли из космоса. 1994. № 3. С. 122-125.
14. Григорьев Ал.А., Кондратьев К.Я. Спутниковый мониторинг природных и антропогенных катастроф // Исслед. Земли из космоса. 1996. № 3. С. 68-78.
15. Сушкевич Т.А. О решении задач атмосферной коррекции спутниковой информации // Исслед. Земли из космоса. 1999. № 6. С. 49-66.
16. Sushkevich T.A. Pioneering remote sensing in the USSR. 1. Radiation transfer in the optical wavelength region of the electromagnetic spectrum // International Journal of Remote Sensing. 2008. V. 29. P. 2585-2597.
17. Sushkevich T.A. Pioneering Remote Sensing in the USSR. 2. Global spherical models of radiation transfer // International Journal of Remote Sensing. 2008. V. 29. P. 2599-2613.
18. Сушкевич Т.А., Козодеров В.В. Информационно-математические проблемы космического земледования // Современные проблемы механики и физики космоса. М.: Наука, Физматлит, 2003. С. 563-584.
19. Сушкевич Т.А. О пионерских работах по математическому моделированию радиационного поля Земли при освоении космоса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Вып. 5. Т 1. М.: Азбука-2000, 2008. С. 165-180.

20. Сушкевич Т.А. Проблемы и перспективы дистанционного зондирования. Посвящается 50-летию начала космической эры // Будущее прикладной математики: Лекции для молодых исследователей. Поиски и открытия. М.: Книжный дом “ЛИБРОКОМ”, 2009. С. 31-58.
21. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В. 60 лет от первого совещания по ИСЗ до современных систем дистанционного зондирования и мониторинга Земли из космоса: информационно-математический аспект (история и перспективы) // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 7. С. 573-580.
22. Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера. М.: Наука, 1989. 261 с.