

# Глобальная сферическая модель переноса излучения в системе "Земля – атмосфера с многослойными облаками"

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

*Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН,  
125047 Москва, Миусская пл., д. 4  
E-mail: [tamaras@keldysh.ru](mailto:tamaras@keldysh.ru)*

Впервые предлагается оригинальный универсальный математический аппарат для моделирования переноса излучения в многослойных неоднородных гетерогенных природных средах с существенно различными радиационными режимами в отдельных областях системы. Гетерогенной является, например, система "свободная атмосфера – многоярусная облачность – приземный слой атмосферы – океан (суша)". Подход основан на построении обобщенных решений в форме матричных функционалов, ядрами которых являются векторы функций влияния отдельных слоев системы. При этом функции влияния слоев с различными аэрозольными и молекулярными характеристиками рассеяния и поглощения и радиационными режимами можно рассчитывать разными методами в разных приближениях теории переноса излучения.

## Введение

Космические исследования - это такая область фундаментальных и прикладных работ, которая с первых шагов своего становления не могла развиваться без использования ЭВМ. Освоение космического пространства послужило значительным фактором совершенствования ЭВМ и формирования новых научных направлений, связанных с математическим моделированием радиационного поля Земли, теорией переноса изображения, теорией видения, теорией обработки и распознавания образов и т.д. Информационно-математическое обеспечение - обязательная составная часть любого космического проекта.

40 лет назад Т.А. Сушкевич разработала первую в мире модель переноса солнечного излучения в сферической атмосфере Земли в масштабах планеты [1], на основе которой были получены пионерские результаты по дистанционному зондированию аэрозольных и озоновых слоев, а также решены многие прикладные задачи освоения космического пространства и становления космических исследований.

Радиационное поле системы "атмосфера – земная поверхность" (САЗ) – это неотъемлемая компонента экосистемы и климата Земли. 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.). 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 [2].

## К истории атмосферно-оптических исследований из космоса

В течение тысячелетий человечество изучает звезды и планеты солнечной системы путем визуальных, а позднее фотографических и фотоэлектрических наблюдений. Только планета Земля до конца 50-х годов оставалась недоступной. Лишь по отраженному свету от поверхности Луны (пепельный свет) возможным оценить интегральное излучение Земли. Широкие возможности исследований радиационных

---

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 06-01-00666, 05-01-00202) и РАН (проект ОМН-3(4)).

характеристик нашей планеты появились в результате создания и развития ракетной и космической техники.

Опыт осуществления в СССР космической программы подтвердил реальность тех перспектив, которые связаны с использованием пилотируемых космических кораблей (ПКК), долгосрочных орбитальных станций (ДОС), автоматических межпланетных станций (АМС), космических аппаратов (КА), искусственных спутников Земли (ИСЗ) для исследования природной среды и природных ресурсов Земли из космоса. 20 ноября 1998 года состоялся запуск первого модуля "Заря" (Россия) первой Международной космической станции (МКС) - космической лаборатории настоящего и будущего.

Важной составной частью первых научных космических программ являлись оптические исследования: визуальные наблюдения, фотометрические и спектральные исследования сумеречной и дневной атмосферы с целью изучения вертикальных профилей оптически активных компонентов (аэрозоль, озон, газовые примеси), исследования спектров отражения различных типов природных образований на поверхности Земли и оценка влияния атмосферы на спектральные яркости и контрасты природных объектов при наблюдениях (съемке) из космоса. Анализ космических спектров природных образований (спектральных яркостей, коэффициентов спектральных яркостей, спектральных контрастов) показал принципиальную возможность решения ряда фундаментальных и практических задач "космического земледевия".

В достижениях советской космонавтики огромную роль сыграли ПКК и ДОС с экипажами космонавтов. Полет Ю.А. Гагарина 12 апреля 1961 г. на ПКК "Восток", который совершил один виток за 108 мин. вокруг Земли, - это был *первый взгляд из космоса на Землю*, т.е. первые визуальные наблюдения поверхности и ореола Земли. Полеты Г.С. Титова на ПКК "Восток-2" (август 1961), А.Г. Николаева на ПКК "Восток-3" и П.Р. Поповича на ПКК "Восток-4" (август 1962) расширили представления о возможностях визуальных наблюдений. Г.С. Титов 6 августа 1961 г. в начале второго витка ПКК "Восток-2" *впервые в мире провел киносъемку Земли из космоса*.

В.Ф. Быковский на ПКК "Восток-5" и В.В. Терешкова на ПКК "Восток-6" (июнь 1963) *впервые сфотографировали дневной и сумеречный горизонты Земли*. Было положено начало инструментальным исследованиям оптически активных компонентов атмосферы с ПКК. Теоретическое обоснование этого эксперимента провел Г.В.Р. озенберг. С ПКК "Союз-5" (январь 1969) под руководством К.Я. Кондратьева начались спектрографические эксперименты. Были получены первые в мире спектры излучения атмосферы и поверхности Земли в видимой области спектра. Фотографирование и спектрографирование космической зари позволило одновременно получать дополняющие друг друга сведения о пространственной и спектральной структуре излучения и атмосферы Земли, в частности, об аэрозольных и озоновых слоях. А.В. Филипченко и Н.Н. Рукавишников с ПКК "Союз-16" (декабрь 1974) впервые провели фотографирование земной поверхности и атмосферы в поляризованном свете на трассе протяженностью около 30 тыс. км. По программе "Союз-Аполлон" с ПКК "Союз-19" (июль 1975) оптические исследования проводились А.А. Леоновым и В.Н. Кубасовым.

16 марта 1962 г. запуск первого ИСЗ серии "Космос" положил начало осуществлению комплексной научной программы оптических исследований околоземного космического пространства и Земли. После запуска в апреле 1971 г. первой ДОС "Салют" значительно расширилась программа визуально-инструментальных оптических наблюдений Земли. 24 апреля 1971 г. произошла первая стыковка ПКК "Союз-10" (В.А. Шаталов, А.С. Елисеев, Н.Н. Рукавишников) с ДОС "Салют". Начиная с ДОС "Салют-3" (июнь 1974) и на всех последующих ДОС "Салют-4" (декабрь 1974), "Салют-5" (июнь 1976), "Салют-6" (сентябрь 1977), "Салют-7" (апрель 1982), "Мир" (1986) выполнялась программа "космического землеобзора".

## **Математическое моделирование и космические проекты**

Сферические многомерные модели переноса излучения, несмотря на их сложность и громоздкость численной реализации на первых поколениях ЭВМ (М-20, БЭСМ-4, БЭСМ-6), в 60-е - 70-е годы имели исключительную актуальность в связи с проектированием и созданием ракетно-космических систем, освоением ближнего и дальнего космического пространства, организацией и проведением космических

исследований и наблюдений из космоса. Параллельно развивались исследования по научно-фундаментальным проблемам метеорологии, океанологии, физики атмосферы, изучения природных ресурсов, дистанционного зондирования атмосферы, суши, океана, облачности, гидрометеоров.

Теоретико-расчетные исследования при проектировании и реализации первых КА, а также первых космических оптических экспериментов осуществлялись тремя ведущими коллективами специалистов по (математическому) моделированию переноса излучения в природных средах на ЭВМ. В Ленинградском Государственном Университете и Главной Геофизической Обсерватории работали группы под руководством В.В. Соболева и К.Я. Кондратьева. В.В. Соболев, И.Н. Минин и О.И. Смоктий разработали первую комбинированную плоско-сферическую модель земной атмосферы в приближении В.В. Соболева: однократное рассеяние для сферически-симметричного слоя, многократное рассеяние учитывалось частично в диффузионном приближении для плоского слоя.

В Вычислительном Центре СО АН СССР под руководством Г.И. Марчука и Г.А. Михайлова были разработаны первые алгоритмы локальных расчетов методом Монте-Карло для сферической модели Земли - неоднородной газовой-аэрозольной оболочки, освещаемой внешним параллельным потоком солнечных лучей. Весомую роль в эффективности этих алгоритмов сыграл математический аппарат сопряженных уравнений, предложенный Г.И. Марчуком и развитый в работах Г.А. Михайлова, М.А. Назаралиева, В.С. Антюфеева, Р.А. Дарбиняна. В сущности, в этих работах впервые были предложены алгоритмы решения прямых и обратных задач теории переноса излучения в поисках ответа на вопрос об интерпретационной ценности радиационной информации. Это был поворотный момент: впервые в мировой практике метод Монте-Карло применялся для моделирования переноса солнечного излучения в атмосфере Земли. В настоящее время уже нет сомневающихся в результативности и эффективности метода Монте-Карло, который покорило современные суперкомпьютеры с параллельной архитектурой. В 1979 году коллективу ученых в составе Г.И. Марчука (руководителя работы), Г.А. Михайлова, С.М. Ермакова, В.Г. Золотухина, Н.Н. Ченцова присуждена Госпремия "За цикл работ по развитию и применению метода статистического моделирования для решения многомерных задач теории переноса излучения".

Т.А. Сушкевич (Институт прикладной математики АН СССР) разрабатывала детерминированный подход к моделированию глобального поля излучения Земли [1-2]: итерационным методом характеристик (ИМХ) была реализована на ЭВМ глобальная сферическая модель радиационного поля системы "атмосфера-Земля" в масштабах планеты. Проводился сравнительный анализ методов, которые использовались для интерпретации первых космических данных, в частности, спектрофотометрических измерений горизонта и фона Земли, а также съемок "космических зорь". Для сферической системы с осевой симметрией впервые алгоритмы метода характеристик (без интерполяции и с интерполяцией) разработаны Т.А.Сушкевич [1]. Частные случаи (при значительных ограничениях на структуру рассеивающей и поглощающей среды, а также условий освещения и наблюдения) интегрирования уравнения переноса в приближении однократного рассеяния содержатся в работах О.А. Авасте и О.И. Смоктия. Позже и в настоящее время практически во всех реализациях решения сферической задачи методом Монте-Карло приближение однократного рассеяния рассчитывается методом интегрирования по характеристикам, которые совпадают с траекториями световых лучей. В.Г. Бондур, А.С. Викторов, А.М. Волков, А.С. Исаев, В.В. Козодеров, Г.Н. Коровин, Л.А. Макриденко, В.А. Малинников, Г.М. Полищук, В.И. Сухих, С.А. Ушаков, В.П. Савиных, О.И. Смоктий, Т.А. Сушкевич получили Премию Правительства РФ в области науки и техники 2002 года за работу "Разработка и внедрение методов и технологий аэрокосмического мониторинга природной среды".

Приближенные подходы разрабатывал О.А. Авасте. Метод В.В. Соболева развивался Л.Г. Титарчуком. Сферические модели излучения планетных атмосфер вошли в диссертации И.Н. Минина, О.И. Смоктия, Г.А. Михайлова, Т.А. Сушкевич, Л.Г. Титарчука, М.А. Назаралиева, В.С. Антюфеева. В постановке задач исследований и обсуждении результатов принимали участие Т.А. Гермогенова, М.В. Масленников, А.М. Обухов, М.С. Малкевич, Г.В. Розенберг, А.Б. Сандомирский, А.И. Лазарев, Е.О. Федорова, В.П. Козлов, В.Н. Сергеевич, И.И. Кокшаров, Ч.Й. Виллман, О.А. Авасте, В.Е. Плюта, Г.М. Гречко и др.

Попытки решения сферической задачи за рубежом (США) были предприняты Секерой и Ленобль (1961), которые предложили использовать метод последовательных приближений, соответствующих разложению решения по малому параметру, взяв в качестве первого приближения решение плоской задачи, а в качестве малого параметра - отношение эффективной высоты однородной атмосферы к радиусу Земли. Большинство работ за рубежом выполняется методом Монте-Карло или приближенными численными методами. На уровне теории без практической реализации остался метод инвариантного погружения. Многопоточное приближение реализовано в пакете DART (США).

До начала космической эры сферические модели планетных атмосфер рассматривались в теории сумеречных явлений, в астрофизических исследованиях и в связи с проблемой лучистого теплообмена и равновесия. По мнению С. Чандрасекара, задача лучистого переноса в планетных атмосферах с учетом их сферичности анализировалась в работах W. Местра (1928), Н.А. Козырева (1934), S. Chandrasekhar (1934), L. Gratton (1937). Это были модели однородной консервативной сферы с изотропным рассеянием. Астрофизики предпочитали приближенные явные способы решения задач теории переноса излучения. Численные методы, предложенные Е.С. Кузнецовым [3] и В.С. Владимировым, позволили существенно усложнить сферические модели и приблизить их к натурным условиям.

Проблема использования сумеречных явлений для оптического зондирования атмосферы впервые, после Альгазена (XI век) и Кеплера (1604), была выдвинута В.Г.Фесенковым (1923). Первые построения теории яркости, поляризации и рефракции света в атмосфере Земли основаны на геометрической картине освещения планеты солнечными лучами в условиях наблюдения с земной поверхности дневного и сумеречного неба. По мнению Г.В. Розенберга, впервые такая задача была сформулирована схематически Р. Груннер (1919). Приближения однократного рассеяния солнечного света в сферически симметричной земной атмосфере разрабатывались В.Г. Фесенковым (1923), F. Link (1933), Н.М. Штауде (1936), И.А. Хвостиковым (1936), Г.В. Розенбергом (1942) для применения фотометрических наблюдений сумерек как метода изучения стратосферы и верхней атмосферы.

Второй этап формирования сумеречного метода (с 1945 г.) связан с выяснением роли вторично рассеянного света и началом ракетных исследований верхней атмосферы.

Эпохальным оказался третий этап - этап становления и совершенствования сумеречных исследований планетных атмосфер с КА. Г.В. Розенберг не только первым сформулировал такую задачу, но и впервые реализовал теоретические построения в первом инструментальном исследовании земной атмосферы с ПКК: 17 июня 1963 г. с борта с ПКК "Восток-6" были получены космонавтом первые в мире фотографические снимки края Земли с окружающим ее сумеречным и заревым ореолом, позволившие впервые установить и обосновать существование динамичных стратосферных аэрозольных слоев оптическими методами и средствами дистанционного зондирования с космических орбит. Анализ и интерпретацию первых космических черно-белых, а позже цветных фотографических снимков независимо проводили три группы: К.Я. Кондратьев, О.И. Смоктий; Г.И. Марчук, Г.А. Михайлов, М.А. Назаралиев; Г.В. Розенберг, А.Б. Сандомирский, Т.А. Сушкевич. Публикации К.Я. Кондратьева, О.И. Смоктя и Г.И. Марчука, Г.А. Михайлова явились первыми в мире работами по численному имитационному моделированию условий проведения первых космических фотосъемок и спектрографии зари и сумерек. Космические оптические наблюдения, сопровождающиеся репрезентативным математическим моделированием, позволили не только обнаружить, но и впервые исследовать оптическую структуру и динамику стратосферных аэрозольных и озоновых слоев методами дистанционного зондирования. Эти пионерские работы подтвердили достоверность разработанных сферических моделей поля излучения Земли.

Запуск советской АМС "Зонд-5" впервые в мире позволил увидеть планету Земля с большого расстояния и осуществить ее фотометрирование, которое было продолжено с АМС "Зонд-6, 7, 8". Важным результатом научного фотографического (в нескольких спектральных интервалах) эксперимента было определение фотометрических характеристик планеты, коэффициентов яркости ее объектов, звездной величины Земли. При проектировании съемочной аппаратуры и фотометрическом анализе изображений Земли использовались результаты Т.А.Сушкевич по математическому моделированию яркостного поля сферической Земли с разными типами подстилающей поверхности.

Созданный в Институте прикладной математики имени М.В.Келдыша АН СССР в 60-е - 70-е годы вычислительный аппарат использовался для фундаментально-поисковых научных исследований по разработке методов и средств космических наблюдений, дистанционного зондирования из космоса, ориентации, стабилизации и навигации КА, астронавигации ракет, для интерпретации и анализа данных космических и комплексных экспериментов, проводимых на ПКК и ДОС, а также аэростатных, самолетных и наземных наблюдений. Впервые были получены теоретико-расчетные результаты по моделям излучения Земли для проектов: астронавигации по визированию восходящих и заходящих звезд; космических систем фиксирования стартов ракет; датчиков ориентации лунных аппаратов и космического комплекса "Луна-9", обеспечивающего возвращение ракеты с Луны на Землю, по яркостному лимбу Земли и планете Земля (впервые в мире были рассчитаны звездные величины и фазовые кривые планеты Земля для характерных состояний атмосферы и подстилающих поверхностей); приборов автоматической и ручной ориентации и стабилизации КА по яркостному горизонту Земли в ближнем космосе; фотосъемок и картографии Антарктиды ("Космос-2000"); оптико-электронных систем наблюдений и т.д.

В исследованиях по физике атмосферы и оптических свойствах различных компонентов атмосферы (аэрозоль, влажность, газовые примеси) с помощью космических экспериментов, проводимых на ПКК ("Восток-6", "Восход", "Союз-3, 4, 5, 6, 7, 8, 16", ДОС "Салют", "Мир", комплекс "Союз-Аполлон"), а также спектрофотометрии с ракет "Зонд-5, 7, 8" использованы численные результаты по глобальным моделям излучения сферической Земли и математическому моделированию для решения обратных задач восстановления высотной стратификации аэрозоля и озона в атмосфере Земли. Впервые были оценены условия применимости (в частности, размытие за счет многократного рассеяния и подсветки от подстилающей поверхности) рефрактометрического метода при лимбовых исследованиях состава атмосферы из космоса (фото- и киносъемки захода Солнца с ДОС "Салют") и при визировании звезд по горизонтальным трассам через атмосферу с учетом влияния рефракции на пространственную структуру яркости горизонта Земли.

### **Новые перспективы глобальной сферической модели**

В середине 70-х годов теоретико-расчетные исследования в области космических технологий принимают массовый характер. О приоритете отечественных работ по сферическим моделям планетных атмосфер свидетельствует и книга - обзор, подготовленный Жаклин Ленобль - Президентом Международной комиссии по атмосферной радиации Международной ассоциации метеорологии и физики атмосферы.

Сферические модели в последние годы, особенно после принятия "Конвенции по климату" (Рио-де-Жанейро, 1992) и ряда межправительственных соглашений по охране озоносферы и глобальному мониторингу, имеют повышенный интерес. Новые перспективные возможности математического моделирования атмосферной радиации Земли в масштабах планеты связаны с разработкой математического обеспечения для широкой области приложений на суперкомпьютерах с параллельной архитектурой. В США, Японии, Германии, Англии, Франции, России появились супер-ЭВМ нового поколения, ориентированные на массовый параллелизм.

Нас интересует проблема расчета поля яркости САЗ в масштабе всей планеты одновременно (различные условия освещения, горизонт, терминатор, сумерки, тень, полярные районы). За основу принято численное решение краевой задачи для стационарного уравнения переноса монохроматического или квазимонохроматического излучения в рассеивающей, поглощающей, излучающей сферической атмосфере (сферической оболочке) сложной пространственной структуры, ограниченной неоднородной отражающей подстилающей поверхностью, роль которой могут играть земная поверхность (суша, океан), верхняя граница облачности или гидрометеоров (осадки) [2].

Опыт работ со сферическими САЗ убедительно показал, что наш базовый метод - итерационный метод характеристик (совокупность метода интегрирования уравнения переноса по характеристикам и метода последовательных приближений по кратности рассеяния с процедурами ускорения сходимости итераций) оптимально реализуется в алгоритмах параллельных вычислений. Наличие такого аппарата позволяет

проводить эталонные расчеты, вычислительные эксперименты, имитационное моделирование, верификацию инженерных прикладных методик, приближения плоских слоев и быстрых алгоритмов, массово используемых для экспресс-анализа космических данных, а также совершенствовать радиационный блок для моделей циркуляции, прогноза, климата, фотохимической кинетики, динамики озоносферы и аэрозоля, трансграничного переноса загрязнений воздушного бассейна. 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 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 интегродифференциального 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.

Впервые предлагается оригинальный универсальный математический аппарат для моделирования переноса излучения в многослойных неоднородных гетерогенных природных средах с существенно различными радиационными режимами в отдельных областях системы. Гетерогенной является, например, система "свободная атмосфера – многоярусная облачность – приземный слой атмосферы – океан (суша)". Подход основан на построении обобщенных решений в форме матричных функционалов, ядрами которых являются векторы функций влияния отдельных слоев системы. При этом функции влияния слоев с различными аэрозольными и молекулярными характеристиками рассеяния и поглощения и радиационными режимами можно рассчитывать разными методами в разных приближениях теории переноса излучения.

Такая постановка задачи приобретает актуальность в связи с проблемами фоторадиационной химии атмосферы (тропосферы, стратосферы и озоносферы в условиях сумерек, зари, терминатора, полярных регионов); информационного обеспечения томографии атмосферы Земли, в том числе рефрактометрическими методами и космическими системами, работающими в условиях наблюдений по горизонтальным трассам; дистанционного зондирования полярных регионов; моделей спектрально-радиационного баланса Земли; фазовой яркости Земли для космической навигации (возврат КА на Землю, навигация КА по Земле, лунные проекты и т.п.); реализации проектов дополнительных источников энергии на КА путем использования солнечного излучения, отраженного Землей и т.д.

В настоящее время, в отличие от момента начала работ в 60-е годы, мы располагаем достаточно достоверными данными о тонкой структуре полос поглощения водяного пара и газовых компонент атмосферы и способах учета этих данных для математического моделирования радиационного переноса в поглощающей реальной атмосфере; о коэффициентах и индикатрисах рассеяния атмосферы с учетом аэрозольных примесей; об отражающих свойствах естественных поверхностей; о географических, сезонных, суточных распределениях, вариациях и статистических характеристиках влажности, давления, температуры, концентраций газовых и аэрозольных компонент и облачности, имеющих случайный характер и играющих основную роль в изменчивости радиационного поля Земли.

## Литература

1. Сушкевич Т.А. Осесимметричная задача о распространении излучения в сферической атмосфере // Отчет № О-572-66. М.: ИПМ АН СССР, 1966. 180 с.
2. Сушкевич Т.А. Математические модели переноса излучения // М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. 601 с.
3. Кузнецов Е.С. Избранные научные труды. Составитель и ответственный редактор Сушкевич Т.А. // М.: Физматлит, 2003. 784 с.