

# Информационно-математический аспект аэрокосмического гиперспектрального мониторинга окружающей среды

Т.А. Сушкевич, С.А. Стрелков, В.В. Козодеров, А.Б. Гаврилович,  
С.В. Максакова, Б.А. Фомин

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

Настоящая статья 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.

**Ключевые слова:** аэрокосмическое дистанционное зондирование, информационно-математический аспект, гиперспектральный мониторинг и нанодиагностика природной и техногенной среды.

## Введение

В 1954 году М.В. Келдышем, С.П. Королевым и М.К. Тихонравовым было представлено письмо в ЦК КПСС и Совет министров СССР с предложением о создании и запуске искусственного спутника Земли. В 1955 году заговорили о космических исследованиях, идеологом и организатором которых являлся академик М.В. Келдыш. По его указанию летом 1955 года из Академии наук разослали письма ученым разных специальностей с одним вопросом: **"Как можно использовать космос?"** Этот ключевой вопрос всей космонавтики и в настоящее время остается актуальным и требуются на него ответы, отвечающие современным вызовам. Мнений и предложений тогда было много и разных. Такая же ситуация с многообразием мнений сохраняется и в наши дни. Для убеждения руководителей СССР в необходимости освоения космического пространства и запусков космических спутников и кораблей **М.В. Келдыш выделил две главные задачи: разведка и наблюдения Земли, вокруг которых сформировались многие научно-исследовательские проекты, коллективы ученых, конструкторов и техников, научно-исследовательские институты, специальные конструкторские бюро, промышленность.**

Прошло немного более 50 лет космической эры и некоторые космические технологии (телевидение, связь, метеорологические спутники и мировая погода, космические системы навигации и позиционирования, международная космическая система SOS и др.) так вошли в повседневное массовое пользование, что большинство уже не замечает, что по-прежнему перспективы развития космонавтики связаны с главными задачами, сформулированными великим ученым и организатором науки академиком М.В. Келдышем. Свидетельством тому являются использование космической поддержки при проведении военных операций в последние десятилетия, а также международная кооперация по аэрокосмическому глобальному мониторингу Земли и международные глобальные проекты по изучению эволюции Земли, климата, опасных явлений, стихийных бедствий и природных катастроф с привлечением высокопроизводительных суперкомпьютеров.

Сложность космических исследований и реализации космических проектов обусловлена тем, что приходится иметь дело с "замкнутым кругом":

- чтобы запустить на космические орбиты аппараты и измерить характеристики радиационного поля Земли, нужны предварительные оценочные расчеты этих характеристик на основе моделей теории переноса излучения с учетом многократного рассеяния и поглощения солнечного излучения, а также собственного излучения атмосферы и поверхности Земли;

- чтобы смоделировать перенос излучения в системе атмосфера-земная поверхность (САП), нужны данные о пространственных и спектральных распределениях оптико-геофизических параметров атмосферы, описывающих взаимодействие солнечного и собственного излучения с компонентами земной атмосферы и земной поверхностью.

***Специфика космических технологий такова, что теория, как правило, опережает практику и привлекается для объяснения наблюдаемых явлений.***

Фундаментальная научная проблема, на которую ориентирована работа, – это разработка фундаментальных основ применения нанотехнологий в космических исследованиях, связанных с перспективами использования аэрокосмических и наземных систем гиперспектрального дистанционного зондирования природных, техногенных и искусственных сред с целью их нанодиагностики. При дистанционном зондировании природных и техногенных объектов электромагнитное излучение Земли, которое регистрируется разными средствами, является носителем информации о состоянии окружающей среды и объектов. На материалах аэрокосмических систем космического землеобзора и тематических наблюдений видны объекты природно-техногенной сферы: объекты энергетики, промышленной и транспортной инфраструктуры; лесные, болотные, луговые, сельскохозяйственные и другие экосистемы; водоемы; сельские и городские поселения и т.д.

Стоит задача теоретически обосновать возможности новых перспективных гиперспектральных методик аэрокосмического и наземного дистанционного зондирования системы атмосфера-Земля (подстилающая поверхность - суша, океан, в том числе различные объекты) по спектрам солнечного и собственного излучения. Научная идея состоит в том, чтобы исследовать возможности использования существенных различий в спектральном ходе поглощения и пропускания основных компонент системы атмосфера-Земля для выделения интервалов длин волн спектра многократно рассеянного солнечного и собственного излучения, информативных в отношении конкретных компонент, и на этой основе дискриминировать компоненты не только по их яркостным изображениям, но и по их спектральным характеристикам.

Одна из фундаментальных задач - это разработка новых моделей для теоретических и методических основ математического моделирования радиационного поля Земли с высоким пространственным и спектральным разрешением в диапазоне от ультрафиолета до миллиметровых волн с учетом многократного рассеяния, поглощения, поляризации и рефракции и последних достижений в молекулярной спектроскопии атмосферных газов, аэрозолей, примесей и загрязнений земной поверхности (суша, океан), объектов техногенной сферы и т.п. с целью обеспечения теоретико-расчетных исследований процессов переноса электромагнитного излучения (фотонов) в природных средах и формирования спектральных радиационных характеристик системы атмосфера-земная поверхность в рамках кинетической теории переноса на базе общих краевых задач для интегро-дифференциального уравнения переноса – линеаризованного приближения уравнения Больцмана с бинарными столкновениями [1, 2].

Важным становится рассмотрение информационно-математических основ междисциплинарных исследований, связанных

- оценкой информационного содержания данных дистанционных измерений,
- с разработкой методов анализа и интерпретации аэрокосмических изображений,
- с оценкой состояния и пониманием проблем предсказуемости глобальных и региональных изменений природных сред на базе временных рядов регулярных спутниковых наблюдений,
- с исследованиями по оптимизации и эффективности систем наблюдений в интересах различных областей приложений.

## Линейно-системный подход и дистанционное зондирование

К середине 70-ых годов благодаря работам советских и американских ученых фактически уже были заложены методические основы современных космических технологий дистанционного зондирования, которые в настоящее время являются массовыми и в них принимают участие ученые и специалисты из более 50 стран. 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. Существенное отличие современных технологий от предыдущих касается, преимущественно, технологий приема, обработки и представления космических данных, т.е. лежит в области информационных технологий. *Информационно-математическое обеспечение - обязательная составная часть любого космического проекта.*

*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.

Можно выделить следующие типы радиационных задач, требующих учета влияния поверхности планеты, отражающей излучение.

Первый тип - это задачи энергетики и радиационного баланса Земли, когда источником служит радиация Солнца и собственное излучение планеты. Второй тип - это задачи дистанционного зондирования атмосферы и облачности, когда земная поверхность является помехой. Третий тип - это задачи дистанционного зондирования земной поверхности (суша, океан, объекты разных инфраструктур), когда необходимо устранить (провести атмосферную коррекцию) или достоверно учесть влияние атмосферы.

Для космических проектов и космических наблюдений с первых шагов освоения космического пространства необходимо было разрабатывать методологию решения двух основных классов многомерных задач теории переноса излучения [1, 2]:

- прежде всего для сферической оболочки (сферическая Земля с атмосферой),
- а позже для 3D плоского слоя (атмосфера над земной поверхностью или океаном), с двумя типами источников:
  - внешним параллельным потоком солнечного (коротковолнового) излучения,
  - собственным (длинноволновым, инфракрасным, миллиметровым) излучением.

Концепция линейно-системного подхода в задачах дистанционного зондирования разработана Т.А.Сушкевич [2]. В любой активной или пассивной системе дистанционного зондирования земной поверхности всегда присутствуют четыре главные компоненты:

- (1) "сценарий", "сцена", т.е. распределение яркости наблюдаемых объектов;
- (2) атмосферный канал передачи изображения;
- (3) прибор регистрации электромагнитных волн;
- (4) комплекс обработки и распознавания изображения.

В трех компонентах проявляется влияние атмосферы: атмосферно-оптические механизмы воздействуют на формирование "сценария", на перенос его изображения через среду и учитываются в радиационной коррекции при анализе "сцен". Вследствие бесконечного многообразия возможных объектов наблюдения целесообразно использовать универсальный подход, который позволяет описывать весь канал наблюдения через объективные характеристики, инвариантные относительно конкретных структур зондируемых объектов, условий освещенности и визирования. Такой подход широко применяется в классической оптике, в теориях видения,

электрических цепей, оптико-электронных систем, фотографии, обработки изображений и известен как *линейно-системный подход*.

Реакции систем на входные воздействия вследствие их аналогии можно описать некоторыми обобщенными характеристиками, определение которых не зависит от конкретного вида системы (электрической, оптической, радиофизической и т.д.). Общность состоит в том, что функциональное соотношение, связывающее входной  $E(x, y)$  и выходной  $\Phi(x, y)$  двумерные сигналы системы:

$$\Phi(x, y) = (\Theta, E) = \int_{-\infty-\infty}^{\infty \infty} \Theta(x, y; x', y') E(x', y') dx' dy', \quad (1)$$

имеет фундаментальный характер и известно как *интеграл суперпозиции*, означающий, что линейная система полностью характеризуется суммой ее откликов на входные воздействия;  $x, y$  — горизонтальные координаты. Если выполняется условие *пространственной инвариантности (изопланарности)*, то *функция рассеяния (ФР)* системы, или *функция рассеяния точки (ФРТ)*,  $\Theta(x, y; x', y')$  зависит от разности аргументов и функционал (1) принимает вид *свертки*

$$\Phi(x, y) = \int_{-\infty-\infty}^{\infty \infty} \Theta(x - x', y - y') E(x', y') dx' dy'. \quad (2)$$

С помощью теоремы о фурье-спектре свертки двумерный спектр выходного сигнала системы  $B(p_x, p_y) = F[\Phi(x, y)]$  получается в виде произведения

$$B(p_x, p_y) = \Psi(p_x, p_y) V(p_x, p_y), \quad (3)$$

где спектральная плотность входного сигнала (распределения яркости объекта)  $V(p_x, p_y) = F[E(x, y)]$ . Спектральная плотность функции рассеяния  $\Psi(p_x, p_y) = F[\Theta(x, y)]$  называется *передаточной функцией* системы, или *оптической передаточной функцией (ОПФ)*. С помощью обратного преобразования Фурье из (3) можно найти значение выходного сигнала системы (распределение яркости на выходе оптической системы):

$$\Phi(x, y) = F^{-1}[B(p_x, p_y)] = F^{-1}[\Psi(p_x, p_y) V(p_x, p_y)]. \quad (4)$$

В соотношениях (1)–(4) заключены *базовые основы аппарата теории линейных систем*. Вопрос о преимуществах использования той или иной характеристики системы переноса излучения по-сути является вопросом удобства математического описания и прикладной направленности конкретного исследования.

## Метод функций влияния и передаточный оператор

*Атмосферный канал* рассматривается как элемент оптической системы переноса излучения и строится теория оптического передаточного оператора [1, 2], используя математический аппарат линейно-системного подхода и обобщенных решений. Объективные характеристики (ФРТ, ОПФ, ЧКХ, ПЧХ, ФПМ и др.) качества изображения, воспроизводящих и передающих оптических, оптико-электронных, фотографических, кинематографических, телевизионных, радиотехнических, управляющих и прочих систем естественным путем переносятся на область теории переноса излучения в оптически-активных средах.

Поле излучения формируется под влиянием двух компонент системы и связи между радиационными характеристиками и параметрами атмосферы и земной поверхности описываются решениями общей краевой задачи теории переноса излучения, когда важно использовать теорию многократного рассеяния. Сложность задачи заключается в многоспектральности, многомер-

ности, многопараметричности модели среды, большом разнообразии процессов трансформации энергии Солнца и собственного излучения, вариантов визирования и способов измерений.

Приходится иметь дело с краевыми задачами для интегро-дифференциального кинетического уравнения, описывающего перенос излучения в рассеивающих, поглощающих, излучающих, преломляющих, поляризующих средах с одномерной, двумерной или трехмерной плоской или сферической геометрией. Теория переноса позволяет изучать влияние различных факторов на прохождение излучения в САП и получать связи конкретных параметров среды с характеристиками радиационного поля. Таким образом можно определить чувствительность спектральной яркости, угловой и пространственной структуры поля радиации, пространственного распределения плотности и потоков излучения при заданных условиях освещения и наблюдения к вариациям этих параметров.

*Для иллюстрации подхода и методической концепции* рассмотрим задачу дистанционного зондирования поверхности через атмосферу планеты в наиболее распространенном приближении плоской модели системы атмосфера–поверхность планеты. Модель передаточных свойств атмосферы представим в форме линейного функционала – *интеграла суперпозиции*, лежащего в основе классического линейно-системного подхода [1, 2].

**Математическая постановка задачи.** Рассматриваем монохроматическую задачу переноса излучения в рассеивающем, поглощающем и излучающем горизонтально-однородном плоском слое, не ограниченном в горизонтальном направлении ( $-\infty < x, y < \infty, r_{\perp} = (x, y)$ ) и конечном по высоте ( $0 \leq z \leq h$ ), трехмерного евклидова пространства: радиус-вектор  $r = (x, y, z)$ .

Интенсивность (энергетическая яркость) излучения  $\Phi(r, s)$  в системе находится как решение общей краевой задачи (ОКЗ при  $R \neq 0$ ) теории переноса

$$K \Phi = F^{in}, \quad \Phi|_t = F^o, \quad \Phi|_b = \varepsilon R \Phi + F^h \quad (5)$$

с линейными операторами: оператор переноса

$$D \equiv (s, \text{grad}) + \sigma(z) = D_z + \left( s_{\perp}, \frac{\partial}{\partial r_{\perp}} \right), \quad D_z \equiv \mu \frac{\partial}{\partial z} + \sigma(z);$$

интеграл столкновений

$$S \Phi \equiv \sigma_s(z) \int_{\Omega} \gamma(z, s, s') \Phi(z, r_{\perp}, s') ds', \quad ds' = d\mu' d\varphi', \quad S(\mathbf{1}) \leq \mathbf{1};$$

оператор отражения

$$[R \Phi](h, r_{\perp}, s) \equiv \int_{\Omega^+} q(r_{\perp}, s, s^+) \Phi(h, r_{\perp}, s^+) ds^+ \quad (6)$$

является равномерно ограниченным:  $R(\mathbf{1}) = q^*(r_{\perp}, s) \leq \mathbf{1}$ ; интегро-дифференциальный оператор  $K \equiv D - S$ ; одномерный оператор  $K_z \equiv D_z - S$ ;  $\gamma(z, s, s')$  — индикатриса рассеяния;  $\sigma(z)$  и  $\sigma_s(z)$  — вертикальные профили коэффициентов ослабления (экстинкции) и рассеяния;  $q(r_{\perp}, s, s^+)$  — ядро оператора отражения; параметр  $0 \leq \varepsilon \leq \mathbf{1}$  фиксирует акт взаимодействия излучения с подложкой;  $F^{in}(z, s)$ ,  $F^o(r_{\perp}, s^+)$ ,  $F^h(r_{\perp}, s^-)$  — источники инсоляции (внешний солнечный поток, собственное излучение среды).

Краевая задача (5) линейная и ее решение можно искать в виде суперпозиции  $\Phi = \Phi_a + \Phi_q$ . Фоновое излучение атмосферы  $\Phi_a$  определяется как решение первой краевой задачи теории переноса (ПКЗ) с "вакуумными" граничными условиями

$$K \Phi_a = F^{in}, \quad \Phi_a|_t = F^o, \quad \Phi_a|_b = F^h \quad (7)$$

для слоя с прозрачными или абсолютно черными (неотражающими) границами ( $R \equiv 0$ ).

Задача для подсветки  $\Phi_q$ , обусловленной влиянием отражающей подстилающей поверхности, — это ОКЗ

$$K \Phi_q = \mathbf{Q}, \quad \Phi_q \Big|_t = \mathbf{Q}, \quad \Phi_q \Big|_b = \varepsilon R \Phi_q + \varepsilon E, \quad (8)$$

где источник  $E(r_\perp, s) \equiv R \Phi_a$  — яркость (освещенность, облученность) подложки, создаваемая фоновым излучением.

Подход, разработанный на базе строгих математических основ, называем *методом функций влияния и пространственно-частотных характеристик* (методом ФВ и ПЧХ) [1, 2]. В теории обобщенных решений **ФВ является фундаментальным решением ПКЗ и ОКЗ — универсальной характеристикой системы переноса излучения, инвариантной относительно конкретных значений и структур источников излучения и параметров отражения границы.** Этот термин включает все многообразие известных частных терминов: ФР, ФРТ, ИПФ, функция Грина и др. и методически объединяет одно-, дву- и трехмерные краевые задачи. Термин ПЧХ вводится как двумерный фурье-спектр ФВ по горизонтальным координатам.

**Оптический передаточный оператор.** На основе общей теории регулярных возмущений (теория асимптотических приближений) с помощью ряда

$$\Phi_q(s^h; z, r_\perp, s) = \sum_{k=1}^{\infty} \varepsilon^k \Phi_k$$

ОКЗ (8) сводится к системе рекуррентных ПКЗ

$$K \Phi_k = \mathbf{Q}, \quad \Phi_k \Big|_t = \mathbf{Q}, \quad \Phi_k \Big|_b = E_k \quad (9)$$

с источниками  $E_k = R \Phi_{k-1}$  для  $k \geq 2$ ,  $E_1 = E$ . Вводится операция, описывающая взаимодействие излучения с границей через ФВ  $\Theta$ :

$$[Gf](s^h; h, r_\perp, s) \equiv R(\Theta, f) = \int_{\Omega^+} q(r_\perp, s, s^+) (\Theta, f) ds^+.$$

Решения системы ПКЗ (9) находятся как линейные функционалы:

$$\Phi_1 = (\Theta, E), \quad \Phi_k = (\Theta, R \Phi_{k-1}) = (\Theta, G^{k-1} E).$$

*Асимптотически точное решение* ОКЗ (8) получается **в форме линейного функционала** — (оптического) **передаточного оператора**

$$\Phi_q = (\Theta, Y), \quad (10)$$

где "сценарий" оптического изображения или яркость подстилающей поверхности

$$Y \equiv \sum_{k=0}^{\infty} G^k E = \sum_{k=0}^{\infty} R \Phi_k, \quad R \Phi_0 = E, \quad (11)$$

есть сумма ряда Неймана по кратности отражения излучения от подложки с учетом многократного рассеяния в среде.

**"Сценарий" удовлетворяет уравнению Фредгольма II-рода**

$$Y = R(\Theta, Y) + E, \quad (12)$$

которое называют **уравнением "приземной фотографии"**. Суммарное излучение САП и **"космическая фотография"** описываются функционалом

$$\Phi = \Phi_a + (\Theta, Y). \quad (13)$$

В рамках строгой теории ОПО метод ФВ и ПЧХ обобщен на задачи с учетом поляризации, для двухсредных и гетерогенных систем переноса, содержащих подобласти с разными радиационными режимами (например, система «атмосфера с многоярусными облаками-океан»), а также горизонтально-неоднородной атмосферы [1].

**Эти основы позволяют создать единую математически строгую теорию описания систем переноса излучения в разных областях приложений и с разной геометрией (одно-, дву-, трехмерные плоские и сферические задачи) и гиперспектральным разрешением.**

## Заключение

В мировой практике развития систем аэрокосмического дистанционного зондирования идут по пути улучшения пространственного и спектрального разрешения соответствующих измерительных комплексов. Реальные возможности данных гиперспектрального дистанционного зондирования до конца не ясны, но такие системы создаются как в нашей стране, так и за рубежом. Требуются принципиально новые подходы к обработке и интерпретации этих данных с использованием современного математического аппарата и методов анализа тонкой структуры получаемых спектров. Это необходимо вследствие появления отдельных линий и полос поглощения солнечного излучения при достигаемом спектральном разрешении в единицы нанометров.

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. Современная задача дистанционного зондирования состоит уже не столько в том, чтобы определить альбедо или яркость земной поверхности (объектов) или провести радиационную коррекцию, — важнее восстановить параметры состояния 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 фундаментальных 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 землеведения с использованием перспективных гиперспектральных технологий дистанционного зондирования и нанодиагностики, математического моделирования и эффективных численных методов с распараллеливанием супервычислений на современных и перспективных суперкомпьютерах.

Работа поддержана грантами РФФИ (проекты 09-01-00071, 08-07-13515-офи\_ц).

## Литература

1. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Иолтуховский А.А. Метод характеристик в задачах атмосферной оптики. М.: Наука, 1990. 296 с.
2. Сушкевич Т.А. Математические модели переноса излучения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. 661 с.

# **Informatic-mathematical aspect of air-space hyperspectral remote sensing of natural media**

**T.A. Sushkevich, S.A. Strelkov, V.V. Kozoderov, A.B. Gavrilovich, S.V. Maksakova, B.A. Fomin**

*Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS*

The paper has been oriented to the application of the radiation transfer theory in air-space remote sensing systems. The sun and own infrared radiation transfer is considered in a range from hard ultraviolet to millimeter wave. The current problems of the informatic-mathematical interfacing to nano-diagnostics of a natural and anthropogenic media, hazardous phenomenon and objects on a basis of the air-space hyperspectral remote sensing are given special attention in the paper.

**Keywords:** air-space remote sensing, informatic-mathematical aspect, hyperspectral remote sensing and nano-diagnostics of natural and anthropogenic medium.