

Глобальное радиационное поле Земли, радиационный форсинг и супервычисления

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

*Учреждение Российской академии наук
Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН,
125047 Москва, Миусская пл., 4
E-mail: tamaras@keldysh.ru*

Радиационное поле Земли - одна из определяющих компонент климата, экосистемы и жизнеобеспечения. Составной частью исследований опасных явлений и экологических последствий естественно-природных катастроф и техногенных чрезвычайных ситуаций является разработка информационно-математической системы и создание программного визуально-диагностического обеспечения для математического моделирования переноса излучения, аэрокосмического дистанционного зондирования и мониторинга, анализа и прогнозирования радиационного поля Земли и радиационного форсинга на основе «сценариев». Для решения таких проблем традиционно используются самые большие ЭВМ, в том числе суперкомпьютеры (Россия, США, Япония, Германия, Китай и др).

Ключевые слова: перенос излучения, атмосфера-земная поверхность, радиационное поле Земли, радиационный форсинг, математическое моделирование, передаточный оператор, супервычисления

Введение

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

С 7 по 18 декабря 2009 года в Копенгагене проходил климатический саммит ООН. Войдет ли данное событие в новейшую глобальную историю? И если войдет, то, с какими глобальными процессами будет связан прошедший климатический саммит?

Задолго до начала саммита планируемая международная конференция преподносилась как всемирно-историческое событие, способное предопределить вектор развития человечества на десятилетия вперед. Итог известен. По мнению широкого круга аналитиков и экспертов крупнейший в истории международный климатический форум, в котором приняли участие около 20 000 участников, а также более 100 глав государств из 193 стран-членов ООН, завершился провалом. «Лучше, чем ничего» - так оценили итоги своей почти двухнедельной работы участники климатической конференции. Непозволительная роскошь в кризисное время – заседать в широком составе довольно длительный срок и не принимать важных документов. Тем не менее, кое-каких результатов достичь удалось. Например, понимания, что климатические проблемы в силу глобальности характера, «не имеют ответственных и виноватых», в связи с чем, весьма сложно договориться о том, кто и в каком размере будет компенсировать ущерб окружающей среде. «Тень мирового кризиса витала над Копенгагеном». Для широкого круга лидеров суверенных государств, прибывших на климатический саммит в Копенгаген, тема парниковых выбросов и все-

мирного потепления была не столь важна по сравнению с перспективой долгового кризиса 2008 года.

Ученых – специалистов по глобальным изменениям окружающей среды и климата пригласили, но к их мнению не прислушивались... В настоящее время мировое научное сообщество располагает практически достаточными фундаментальными знаниями и научным потенциалом, чтобы, объединив совместные усилия, провести достоверные комплексные и системные исследования на основе «сценариев», реализуемых на суперкомпьютерах с привлечением данных длительных временных рядов космических наблюдений двойного назначения. Однако такого объединения ученых не происходит...

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

Теоретико-расчетные исследования при проектировании и реализации первых космических аппаратов, в частности, их систем навигации, ориентации, стабилизации, 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 работало несколько групп под руководством В.В. Соболева, К.Я. Кондратьева и К.С. Шифрина. В.В. Соболев, И.Н. Минин и О.И. Смоктий разработали первую комбинированную плоско-сферическую модель земной атмосферы в приближении В.В. Соболева [3-9]. В Вычислительном Центре СО АН СССР под руководством Г.И. Марчука и Г.А. Михайлова были разработаны первые алгоритмы метода Монте-Карло для сферической модели Земли [10-12]. 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 Институте прикладной математики АН СССР Т.А. Сушкевич впервые реализовала итерационным методом характеристик глобальную сферическую модель радиационного поля системы атмосфера-земная поверхность (САЗ) в масштабах планеты [1, 2, 13-19]. Приближенные подходы разрабатывал О.А. Авасте (Тарту) под руководством К.С. Шифрина. Метод В.В. Соболева развивал Л.Г. Титарчук.

Подход на основе анализа уравнений для характеристик в криволинейных координатах и разных приемов ускорения сходимости итераций по подобластям позволяет перейти к численному решению трехмерно-неоднородной сферической задачи, моделирующей близкие к реальным земные условия [20-25]. Такая постановка приобретает актуальность в связи с проблемами фоторадиационной химии атмосферы (тропосферы 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, созданием моделей спек-

трально-радиационного баланса Земли, фазовой яркости Земли для приборов космической навигации (возврат КА на Землю, навигация КА по Земле), реализацией проектов дополнительных источников энергии на КА путем использования солнечного излучения, отраженного Землей, и т.п. И, естественно, появляется возможность на основе «сценариев» состояния атмосферы, земной поверхности и океана моделировать радиационное поле Земли и оценивать радиационный форсинг на климатическую систему.

В настоящей статье речь идет об информационно-математическом аспекте изучаемой проблемы и перспективах использования супервычислений.

Постановка задачи

Приходится иметь дело с общими краевыми задачами для интегро-дифференциального кинетического уравнения, описывающего перенос излучения в рассеивающих, поглощающих, излучающих, преломляющих, поляризующих средах с одномерной, двумерной или трехмерной сферической геометрией. Используется линеаризованное уравнение Больцмана в приближении бинарных столкновений, основанном на дуализме "волна-частица". Теория переноса позволяет изучать влияние различных факторов на прохождение излучения в системе атмосфера-земная поверхность и получать связи конкретных параметров среды с характеристиками радиационного поля.

В рамках развития вычислительных средств рассматриваются следующие модели переноса излучения.

I. Спектральная, пространственная и угловая структуры поля яркости – интенсивности светового поля (солнечного излучения) при известных условиях освещения рассчитываются как решения общей краевой задачи для уравнения переноса.

II. Спектральные и пространственные структуры интегральных характеристик поля излучения рассчитываются как решения задач, отвечающих (математически) точным или разной степени приближенности линейным и нелинейным моделям, которые получаются из интегро-дифференциального уравнения переноса с помощью аппарата разложений решения по сферическим функциям, при контролируемых условиях и ограничениях.

Нас интересует проблема расчета радиационного поля Земли в масштабах всей планеты (одновременно при всех условиях освещения, горизонт, сумерки, область сумерек и тени, полярные регионы и т.д.).

Рассматривается общая краевая задача (ОКЗ) для кинетического уравнения переноса излучения в сферической системе атмосфера-Земля, освещаемой внешним параллельным солнечным потоком. На основе теории передаточного оператора и метода функций влияния САЗ факторизуется на подобласти с различными оптическими свойствами и разными радиационными режимами. На основе линейно-системного подхода построено обобщенное решение задачи с оптическим передаточным оператором (ОПО), позволяющим учитывать пространственно неоднородную (мозаичную) подстилающую поверхность, а также гетерогенную структуру атмосферы (приземный слой, многоярусная облачность, стратосфера, мезосфера). Ядрами ОПО являются функции влияния. Функция влияния каждой подобласти определяется как решение первой краевой задачи (ПКЗ) для кинетического уравнения и является универсальной характеристикой системы переноса излучения, инвариантной относительно конкретных структур неоднородностей на границах, отражающих и пропускающих излучение.

Полная интенсивность монохроматического (при фиксированной длине волны λ) или квазимонохроматического (при фиксированной λ и интервале разрешения $\Delta\lambda$) стационарного излучения $\Phi_\lambda(\mathbf{r}, \mathbf{s})$ (индекс λ ниже опускаем) в любой точке $A(\mathbf{r})$ с радиус-вектором $\mathbf{r} = (r, \psi, \eta)$ в любом направлении $\mathbf{s} = (\vartheta, \varphi)$ находится как решение общей краевой задачи переноса излучения (ОКЗ)

$$K\Phi(\mathbf{r}, \mathbf{s},) = F^{in}, \quad \Phi|_t = F^t, \quad \Phi|_b = \varepsilon R\Phi + F^b \quad (1)$$

в фазовой области аргументов (\mathbf{r}, \mathbf{s}) с линейным интегро-дифференциальным оператором $K \equiv D - S$, где оператор переноса

$$D \equiv (\mathbf{s}, \text{grad}) + \sigma_{tot}(\mathbf{r}), \quad (2)$$

для задачи со сферической геометрией 3D-размерности

$$(\mathbf{s}, \nabla\Phi) = \cos\vartheta \frac{\partial\Phi}{\partial r} + \frac{\sin\vartheta \cos\varphi}{r} \frac{\partial\Phi}{\partial\psi} - \frac{\sin\vartheta}{r} \frac{\partial\Phi}{\partial\vartheta} + \frac{\sin\vartheta \sin\varphi}{r \sin\psi} \frac{\partial\Phi}{\partial\eta} - \frac{\sin\vartheta \sin\varphi \text{ctg}\psi}{r} \frac{\partial\Phi}{\partial\varphi}; \quad (3)$$

интеграл столкновений или функция источника есть интеграл по единичной сфере направлений $\Omega := \{\mathbf{s} = (\vartheta, \varphi)\}$

$$B(\mathbf{r}, \mathbf{s}) \equiv S\Phi = \sigma_{sc}(\mathbf{r}) \int_{\Omega} \gamma(\mathbf{r}, \mathbf{s}, \mathbf{s}') \Phi(\mathbf{r}, \mathbf{s}') ds', \quad ds' = \sin\vartheta' d\vartheta' d\varphi'; \quad (4)$$

оператор отражения на подстилающей поверхности в общем случае есть интеграл

$$[R\Phi](\mathbf{r}_b, \mathbf{s}) = \int_{\Omega^-} q(\mathbf{r}_b, \mathbf{s}, \mathbf{s}^-) \Phi(\mathbf{r}_b, \mathbf{s}^-) ds^-, \quad \mathbf{s} \in \Omega^+. \quad (5)$$

Функция $F^{in}(\mathbf{r}, \mathbf{s})$ представляет плотность источников излучения внутри сферической оболочки; $F^b(\mathbf{r}_b, \mathbf{s}^+)$ и $F^t(\mathbf{r}_t, \mathbf{s}^-)$ есть источники излучения на границах, определенные для лучей \mathbf{s} , направленных внутрь сферической оболочки.

Оператор R описывает закон отражения излучения от подстилающей поверхности, которая располагается на нижней границе сферической оболочки с радиус-вектором $\mathbf{r} = \mathbf{r}_b$; параметр $0 \leq \varepsilon \leq 1$ фиксирует акт взаимодействия излучения с подстилающей поверхностью. Если $R \equiv 0$ (или $\varepsilon = 0$), то имеем дело с первой краевой задачей переноса излучения (ПКЗ)

$$K\Phi_a = F^{in}, \quad \Phi_a|_t = F^t, \quad \Phi_a|_b = F^b \quad (6)$$

для сферической оболочки с неотражающими абсолютно «черными» границами или с прозрачными, «вакуумными» граничными условиями.

Радиационные проблемы требуют учета эффектов, связанных с поверхностью Земли. Проблемы энергетики и радиационного баланса Земли, когда Солнце играет роль источника излучения, обычно решаются в приближении плоского слоя без разделения вкладов атмосферной радиации и излучения земной поверхности, которое учитывают с некоторым усредненным альбедо.

В нашем подходе атмосфера рассматривается как элемент «оптической» системы переноса излучения и суммарное излучение САЗ рассчитывается с использованием оптического передаточного оператора (ОПО), который формулируется на базе математического аппарата линейно-системного подхода и интеграла «суперпозиции». Общая краевая задача (1) с операторами (2)-(5) линейная относительно источников и её решение можно представить в виде суперпозиции: $\Phi = \Phi_a + \Phi_q$. Фоновое излучение атмосферы Φ_a определяется как решение ПКЗ (6). Вклад излучения Φ_q , обусловленного отражением от подстилающей поверхности, находится как решение ОКЗ

$$K\Phi_q = 0, \quad \Phi_q|_t = 0, \quad \Phi_q|_b = \varepsilon R\Phi_q + \varepsilon E, \quad (7)$$

в которой яркость подстилающей поверхности, созданная отраженным фоновым излучением $E = R\Phi_a$, служит источником инсоляции.

Теоретическое построение и алгоритмы расчета оптического передаточного оператора основаны на теории обобщенных решений, теории интегральных преобразований обобщенных функций и рядов общей теории регулярных возмущений (асимптотический метод, когда решение выражается в виде рядов по малому параметру). Подход, разработанный на этих строгих математических основах, называем методом функций влияния [2].

Решение первой краевой задачи

$$K\Phi = 0, \quad \Phi|_t = 0, \quad \Phi|_b = f(\mathbf{s}^h; \mathbf{r}_\perp, \mathbf{s}); \quad \mathbf{r}_\perp = (\psi, \eta) \in \Omega, \quad d\mathbf{r}_\perp = \sin \psi d\psi d\eta, \quad (8)$$

можно записать в форме линейного функционала – «интеграла суперпозиции»

$$\Phi(\mathbf{s}^h; \mathbf{r}, \mathbf{r}_\perp, \mathbf{s}) \equiv (\Theta, f) \equiv \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega^+} ds_h^+ \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega} \Theta(\mathbf{s}_h^+; \mathbf{r}, \mathbf{r}_\perp - \mathbf{r}', \mathbf{s}) \times f(\mathbf{s}^h; \mathbf{r}'_\perp, \mathbf{s}_h^+) \sin \psi' d\psi' d\eta'.$$

Его ядром является функция влияния $\Theta(\mathbf{s}_h^+; \mathbf{r}, \mathbf{r}_\perp, \mathbf{s})$ - решение ПКЗ (Модель 1)

$$K\Theta = 0, \quad \Theta|_t = 0, \quad \Theta|_b = f_\delta$$

с параметром $\mathbf{s}_h^+ \in \Omega^+$ и источником $f_\delta(\mathbf{s}_h^+; \mathbf{r}_\perp, \mathbf{s}) = \delta(\mathbf{r}_\perp) \delta(\mathbf{s} - \mathbf{s}_h^+)$.

Если источник $f(\mathbf{r}_\perp)$ - изотропный (ламбертовский) и горизонтально неоднородный, то решение ПКЗ (8) есть линейный функционал – «интеграл свертки»

$$\Phi(\mathbf{r}, \mathbf{r}_\perp, \mathbf{s}) = F_c(f) \equiv (\Theta_c, f) \equiv \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega} \Theta_c(\mathbf{r}, \mathbf{r}_\perp - \mathbf{r}', \mathbf{s}) f(\mathbf{r}'_\perp) \sin \psi' d\psi' d\eta'$$

с ядром – функцией влияния

$$\Theta_c(\mathbf{r}, \mathbf{r}_\perp, \mathbf{s}) = \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega^+} \Theta(\mathbf{s}_h^+; \mathbf{r}, \mathbf{r}_\perp, \mathbf{s}) d\mathbf{s}_h^+,$$

которая удовлетворяет ПКЗ (8) с осевой симметрией (Модель 2)

$$K\Theta_c = 0, \quad \Theta_c|_l = 0, \quad \Theta_c|_b = \delta(\mathbf{r}_\perp).$$

Для анизотропного и горизонтально однородного источника

$$\Phi(\mathbf{s}^h; r, \mathbf{s}) = F_r(f) \equiv (\Theta_r, f) \equiv \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega^+} \Theta_r(\mathbf{s}_h^+; r, \mathbf{s}) f(\mathbf{s}^h; \mathbf{s}_h^+) d\mathbf{s}_h^+$$

с ядром линейного функционала

$$\Theta_r(\mathbf{s}_h^+; r, \mathbf{s}) = \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega} \Theta(\mathbf{s}_h^+; r, r_\perp, \mathbf{s}) \sin\psi d\psi d\eta.$$

Функция влияния Θ_r есть решение одномерной сферической ПКЗ с азимутальной зависимостью (Модель 3)

$$K_r\Theta_r = 0, \quad \Theta_r|_l = 0, \quad \Theta_r|_b = \delta(\mathbf{s} - \mathbf{s}_h^+).$$

При изотропном (ламбертовом) и горизонтально однородном источнике решение ПКЗ (8)

$$\Phi(r, \mathbf{s}) = fW(r, \mathbf{s}), \quad f = \text{const},$$

рассчитывается через функцию влияния

$$\begin{aligned} W(r, \mathbf{s}) &= \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega^+} d\mathbf{s}_h^+ \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega} \Theta(\mathbf{s}_h^+; \mathbf{r}, \mathbf{r}_\perp, \mathbf{s}) \sin\psi d\psi d\eta = \\ &= \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega} \Theta_c(\mathbf{r}, \mathbf{r}_\perp, \mathbf{s}) \sin\psi d\psi d\eta = \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega^+} \Theta_r(\mathbf{s}_h^+; r, \mathbf{s}) d\mathbf{s}_h^+, \end{aligned}$$

которая также называется функцией пропускания, отягощенной многократным рассеянием, и определяется как решение одномерной сферической ПКЗ со сферической симметрией (Модель 4)

$$K_r W = 0, \quad W|_l = 0, \quad W|_b = 1.$$

На основе теории регулярных возмущений с помощью ряда

$$\Phi_q(\mathbf{s}^h; \mathbf{r}, \mathbf{s}) = \sum_{k=1}^{\infty} \varepsilon^k \Phi_k$$

ОКЗ (7) сводится к рекурсивной системе ПКЗ (8)

$$K\Phi_k = 0, \quad \Phi_k|_t = 0, \quad \Phi_k|_b = E_k \quad (9)$$

с источниками $E_k = R\Phi_{k-1}$ для $k \geq 2$, $E_1 = E$.

Вводится оператор, описывающий единичный акт взаимодействия падающего излучения с подстилающей поверхностью через функцию влияния

$$[Gf](\mathbf{s}^h; \mathbf{r}_b, \mathbf{s}) \equiv R(\Theta, f) = \int_{\Omega^-} q(\mathbf{r}_b, \mathbf{s}, \mathbf{s}^-)(\Theta, f) ds^-.$$

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 (7) получается в форме линейного функционала – оптического передаточного оператора

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

где оптическое изображение «сценария» или яркость подстилающей поверхности

$$Y \equiv \sum_{k=0}^{\infty} G^k E = \sum_{k=0}^{\infty} R\Phi_k \quad (10)$$

дается рядом Неймана по кратности отражения излучения от подстилающей поверхности с учетом многократного рассеяния внутри оболочки атмосферы. «Сценарий» (10) удовлетворяет уравнению Фредгольма второго рода $Y = R(\Theta, Y) + E$, которое называют «приземной фотографией». Полное излучение САЗ и «космическая фотография» (изображение, получаемое при наблюдении из космоса) есть «суперпозиция»

$$\Phi = \Phi_a + (\Theta, Y) \quad (11)$$

Линейный функционал (11) является универсальной математической моделью переноса излучения в САЗ, адекватной исходной ОКЗ (1) для различных источников E и разных типов подстилающей поверхности не зависимо от размерности САЗ (1D, 2D, 3D). Достаточно рассчитать конечный ряд Неймана только для «сценария» (10) вместо расчета ряда многократного отражения излучения в полном фазовом объеме решения ОКЗ (1).

В итоге исходная ОКЗ (1) сведена к линейному функционалу и сформулирован линейно-системный подход к решению не только проблем аэрокосмического дистанционного зондирования земной поверхности, но и эффективного учета влияния поверхности на радиационное поле как внутри так и вне сферической системы переноса излучения в 1D-, 2D- и 3D-геометриях по пространству \mathbf{r} и 2-, 3-, 4-, и 5-мерном фазовом объеме задачи (\mathbf{r}, \mathbf{s}) . При этом четко определено, что любые проявления нелинейных эффектов из-за многократного переотражения излучения от поверхности Земли с учетом многократного рассеяния в атмосфере могут быть включены и учтены строго в процессах формирования «сценария». Эти эффекты описываются с помощью функций влияния, которые являются линейными передаточными характеристиками изолированного слоя атмосферы.

Общность схематически описанной методики состоит в том, что она распространяется на разные диапазоны и условия дистанционного зондирования. Важно, чтобы «сценарий» и атмосферный канал рассматривались в рамках теории переноса излучения. Поэтому предпочтительнее избегать частого употребления термина «оптический», который сужает область применимости.

О супервычислениях и параллельных алгоритмах

Даже на современных высокопроизводительных вычислительных системах стоят проблемы скорости вычислений и оптимальной организации распараллеливания расчета при больших размерностях разностной сетки, а также передачи больших массивов результатов расчета по сетям от суперкомпьютера к рабочей станции оператора для последующей обработки. Разработанные авторами метод функций влияния и теория передаточного оператора обладают удивительными свойствами распараллеливания вычислений и построения новых алгоритмов декомпозиции методом векторных функций влияния: исходную задачу с областью определения решения большой размерности и большим размером разностной сетки фазового пространства задачи можно факторизовать на ряд малоразмерных подзадач, определенных на подобластях и разностных сетках меньшей размерности. При этом подобласти могут отличаться радиационными режимами и в них можно использовать разные приближения и методы решения краевых задач теории переноса излучения.

Используются следующие приемы распараллеливания вычислений:

1) распределенные вычисления по физическим моделям:

- многоспектральные, в том числе гиперспектральные (по длине волны);
- 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;
- по параметрам функций влияния;
- по компонентам векторов функций влияния;
- по компонентам матричных 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.

За основу принято численное решение краевой задачи (1) 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).

Разработаны специальные эффективные приемы решения задач с неразрешенными спектрами и учетом селективного и континуального поглощения атмосферными газами при расчете многократного рассеяния. Еще в 1967-1968 годах был предложен и реализован метод подгрупп, когда функция пропускания аппроксимируется суммой экспонент с эффективными коэффициентами поглощения и весами подгрупп. Эффективность метода подгрупп была подтверждена прямыми сравнениями расчетов, проведенных методом подгрупп и методом Монте-Карло с учетом исходной функции пропускания. Позже и по настоящее время такой же прием широко используется и в России и за рубежом (метод К-распределений).

Заключение

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.

Работа выполняется при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 09-01-00071, 08-01-00024).

Литература

1. Сушкевич Т.А. Осесимметричная задача о распространении излучения в сферической системе // Отчет № 0-572-66. М.: ИПМ АН СССР, 1966. 180 с.
2. Сушкевич Т.А. Математические модели переноса излучения // М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. 661 с.
3. Соболев В.В., Минин И.Н. Рассеяние света в сферической атмосфере - I // Искусственные спутники Земли. Вып. 14. М.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 7-12.
4. Соболев В.В., Минин И.Н. К теории рассеяния света в планетных атмосферах // Астрон. журнал. 1963. Т. 40. № 3. С. 496-503.

5. *Минин И.Н., Соболев В.В.* Рассеяние света в сферической атмосфере - II // *Космич. исслед.* 1963. Т. 1. № 2. С. 227-234.
6. *Минин И.Н., Соболев В.В.* Рассеяние света в сферической атмосфере - III // *Космич. исслед.* 1964. Т. 2. № 4. С. 610-618.
7. *Смоктый О.И.* Многократное рассеяние света в однородной сферически-симметричной планетной атмосфере // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1967. Т. 3. № 3. С. 245-257.
8. *Смоктый О.И.* Об определении яркости неоднородной сферически-симметричной планетной атмосферы // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1967. Т. 3. № 4. С. 384-393.
9. *Смоктый О.И.* Многократное рассеяние света в неоднородной сферически-симметричной планетной атмосфере // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1967. Т. 3. № 5. С. 496-506.
10. *Марчук Г.И., Михайлов Г.А.* О решении задач атмосферной оптики методом Монте-Карло // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1967. Т. 3. № 3. С. 258-273.
11. *Марчук Г.И., Михайлов Г.А.* Результаты решения некоторых задач атмосферной оптики методом Монте-Карло // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1967. Т. 3. № 4. С. 394-401.
12. *Кондратьев К.Я., Марчук Г.И., Бузников А.А., Минин И.Н., Михайлов Г.А., Назаралиев М.А., Орлов В.М., Смоктый О.И.* Поле излучения сферической атмосферы // *Л.: Изд-во ЛГУ, 1977.* 215 с.
13. *Гермогенова Т.А., Копрова Л.И., Сушкевич Т.А.* Исследование угловой, пространственной и спектральной структуры поля яркости Земли для характерной модели сферической атмосферы // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1969. Т. 5. № 12. С. 1266-1277.
14. *Альтовская Н.П., Розенберг Г.В., Сандомирский А.Б., Сушкевич Т.А.* Поле яркости зари, наблюдаемой с космических кораблей // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1971. Т. 7. № 3. С. 279-290.
15. *Альтовская Н.П., Розенберг Г.В., Сандомирский А.Б., Сушкевич Т.А.* Некоторые результаты фотометрических исследований дневного горизонта Земли с космических кораблей "Союз-4" и "Союз-5" // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1971. Т. 7. № 6. С. 590-598.
16. *Назаралиев М.А., Сушкевич Т.А.* Расчеты характеристик поля многократно рассеянного излучения в сферической атмосфере // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1975. Т. 11. № 7. С. 705-717.
17. *Сушкевич Т.А., Коновалов Н.В.* Об области применимости плоской модели в задачах о многократном рассеянии излучения в земной атмосфере // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1978. Т. 14. № 1. С. 44-57.
18. *Сушкевич Т.А.* Об уравнении переноса в сферической геометрии с пространственной неоднородностью и рефракцией // *Численное решение задач атмосферной оптики.* М.: ИПМ АН СССР, 1984. С. 138-151.
19. *Сушкевич Т.А.* О моделировании переноса солнечного излучения в сферической атмосфере Земли и облаках // *Оптика атмосферы и океана.* 1999. Т. 12. № 3. С. 251-257.
20. *Сушкевич Т.А., Максакова С.В.* Осесимметричная задача распространения излучения в сферическом слое. - I. Характеристики уравнения переноса // *Препр. ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.* 1997. № 65. 32 с.
21. *Сушкевич Т.А., Владимирова Е.В.* Осесимметричная задача распространения излучения в сферическом слое. - III. Алгоритм расчета оптической толщины и функции пропускания отрезка траектории светового луча в неоднородной земной атмосфере // *Препр. ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.* 1997. № 74. 24 с.
22. *Сушкевич Т.А., Максакова С.В.* Осесимметричная задача распространения излучения в сферическом слое. - II. Алгоритм вычисления криволинейных координат на траекториях характеристик // *Препр. ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.* 1998. № 1. 32 с.
23. *Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Владимирова Е.В., Игнатьева Е.И., Куликов А.К., Максакова С.В.* Сферическая модель переноса излучения в атмосфере Земли. - I. Обзор // *Препр. ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.* 1997. № 84. 32 с.
24. *Сушкевич Т.А., Владимирова Е.В.* Сферическая модель переноса излучения в атмосфере Земли. - II. Криволинейная система координат. Характеристики уравнения переноса // *Препр. ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.* 1997. № 73. 28 с.
25. *Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Владимирова Е.В., Игнатьева Е.И., Куликов А.К., Максакова С.В.* Сферическая модель переноса излучения в атмосфере Земли. - III. Постановка задачи. Метод решения // *Препр. ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.* 1997. № 85. 32 с.

Global radiation field of Earth, radiation forcing and supercomputing

T.A. Sushkevich, S.A. Strelkov, S.V. Maksakova

*Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS
125047 Moscow, 4 Miusskaya sg.
E-mail: tamaras@keldysh.ru*

The radiation transfer problem to supercomputing is considered for optical (solar short-wave and long-wave) radiation in the atmosphere – Earth system (AES) while using a spherical shell approach with an incident external parallel flux. The optical transfer operator (OTO) is constructed within the linear-system approach to take the effect of spatial inhomogeneity (mosaic) of underlying surface (land surface, upper layer of cloudiness or hydrometeors) into account. The influence function of the general boundary-value problem of the radiation transfer theory that serves as the optical transfer operator kernel is considered as a universal characteristic invariant relative to particular structures of inhomogeneity for the relevant reflecting and emitting surfaces.

As a result of the outlined approaches, the initial general boundary-value problem has been reduced to the linear functional with the formulation of the linear-system approximation to solve remote sensing and radiation forcing problems and to take into account the contribution of reflected and emitted spherical Earth's surface in 1D-, 2D- and 3D-geometry. Any manifestation of the non-linear effects due to multiple reflection of radiation from the Earth's surface has been rigorously determined in the process of the “scenarios” formation. These effects are described by the influence functions which are represented by the linear transfer characteristics of any isolated shell of the atmosphere.

Keywords: radiation transfer, atmosphere–Earth system, radiation field of Earth, mathematical modeling, transfer operator, supercomputing