

## О глобальной модели радиационного форсинга на климат и дистанционное зондирование Земли

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

*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН  
125047, г. Москва, Миусская пл., 4*

Поступила в редакцию 20.05.2016 г.

Настоящая статья посвящается памяти гениального ученого и организатора науки, главного теоретика космонавтики, единственного из математиков трижды Героя Социалистического Труда, президента Академии наук СССР, академика Мстислава Всеволодовича Келдыша (10.02.1911–24.06.1978 гг.) в год 105-летия со дня его рождения. Работа посвящена 55-летию первого полета человека в космос, который совершил 12 апреля 1961 г. первый космонавт планеты, гражданин Союза Советских Социалистических Республик Юрий Алексеевич Гагарин. Работа ориентирована на приложения теории переноса излучения к исследованиям радиационного форсинга на глобальную климатическую систему Земли в масштабах планеты и гиперспектрального подхода в дистанционном зондировании Земли. Спектральные наблюдения — один из важных каналов информации в дистанционном зондировании Земли. Измерение радиационных характеристик Земли как планеты во всех спектральных диапазонах от ультрафиолетового до миллиметрового позволяет получить важную информацию как о свойствах источников и механизмах их излучения, так и о той среде, которая поглощает, рассеивает и отражает электромагнитные волны. В плане реализации натуральных наблюдений это грандиозная задача будущего, а в настоящее время предлагается развитие информационно-математического аспекта и сценарного подхода к решению поставленной проблемы на основе математического моделирования на суперкомпьютерах и параллельных супервычислениях. Важно сформулировать универсальные системные модели и методы для супервычислений в задачах космического экологического и климатического мониторинга и исследования спектральных характеристик радиационного баланса и альбеда сферической Земли как глобальных характеристик эволюции климата планеты.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование Земли, перенос излучения, радиационный форсинг, климат, computer science; Earth remote sensing, radiation transfer, radiation forcing, climate, computer sciences.

### Введение

Настоящая статья — дань памяти тем соотечественникам, кто открыл дорогу в космос для человечества и заложил фундамент для дистанционного зондирования и мониторинга Земли из космоса (ДЗЗ), а также отечественным ученым, которые в середине XX в. перешли от географического понятия «климат» к всепланетарным проблемам климата и устойчивого развития планеты и создали научные основы для исследований сложнейшей климатической системы Земли (КСЗ), подтвердив стратегический выбор ответа на вопрос «Зачем нужен космос?», сделанный М.В. Келдышем в 1955 г.: «разведка и наблюдение Земли».

Статья посвящена 55-летию первого полета человека в космос, который совершил 12 апреля 1961 г. первый космонавт планеты — гражданин СССР Юрий Алексеевич Гагарин (09.03.1934–27.03.1968 гг.). Он первый увидел «голубую планету» из космоса.

\* Тамара Алексеевна Сушкевич (tamaras@keldysh.ru); Сергей Александрович Стрелков; Светлана Викторовна Максакова.

В год 105-летия Мстислава Всеволодовича Келдыша (10.02.1911–24.06.1978 гг.) мы обязаны напомнить о заслугах главного теоретика космонавтики, гениального ученого и организатора науки, единственного из математиков трижды Героя Социалистического Труда, академика с 1946 г., президента АН СССР в 1961–1976 гг. [1–4]. М.В. Келдыш — организатор и первый директор с 1953 по 1978 г. первого в мире Института прикладной математики, созданный для выполнения атомного и ракетно-космического проектов и обеспечения «ракетно-ядерного щита» на основе достижений математики с использованием вычислительной техники, породивших современные computer sciences и информационные технологии. Дважды звание Героя Социалистического Труда М.В. Келдыш и С.П. Королев получали одновременно! В 1956 г. за исключительные заслуги перед государством при выполнении особого задания по программе «Ракетно-ядерный щит СССР» присвоено звание Героя Социалистического Труда с вручением ордена Ленина и золотой медали «Серп и молот» С.П. Королеву (Указ Верховного Совета СССР № 253/13 от 20.04.1956 г. за заслуги в деле создания дальних баллистических ракет) и М.В. Келдышу

(Указ от 11.09.1956 г.). За обеспечение запуска первого искусственного спутника Земли в 1957 г. обоим присуждена Ленинская премия (секретная). В 1961 г. за особые заслуги в развитии ракетной техники, в создании и успешном запуске первого в мире космического корабля «Восток» с человеком на борту присвоено вторично звание Героя Социалистического Труда с вручением второй золотой медали «Серп и Молот» М.В. Келдышу (№ 85) и С.П. Королеву (№ 86).

Признавая заслуги советского народа в покорении космоса, в честь 50-й годовщины полета человека в космос на 85-м пленарном заседании Генеральная Ассамблея ООН приняла историческую Резолюцию A/RES/65/271 от 7 апреля 2011 г.: **«Генеральная ассамблея, ...напоминая о том, что 12 апреля 1961 года состоялся первый полет человека в космос, который совершил Юрий Гагарин — советский гражданин, родившийся в России, и признавая, что это историческое событие открыло путь для исследования космического пространства на благо всего человечества, ...провозглашает 12 апреля Международным днем полета человека в космос...»**.

Настоящая работа — это еще и посвящение памяти профессора Евграфа Сергеевича Кузнецова [5] — первого советского вычислителя-модельера — специалиста по теории переноса излучения в природных средах (первые работы по климату в 1925—1927 гг.), который основал советскую научную школу по теории переноса излучения, нейтронов и заряженных частиц и единственный в мире уникальный отдел «Кинетические уравнения» в Институте Келдыша в 1955 г. Кроме того, эта работа приводит итоги 55 лет научной работы Т.А. Сушкевич [6—8] в Институте Келдыша — последней ученицы Е.С. Кузнецова.

## Климат и радиационный форсинг

Ведущими специалистами из Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова написана книга «О климате по существу и всерьез» [9]. Во многом благодаря прорывам в космических системах ДЗЗ и computer sciences появились возможности всесторонне изучать процессы формирования погоды и климата, причины их изменений и перспективы влияния на них антропогенной деятельности и естественно-природных факторов. Климатическая система Земли — это природная среда, включающая атмосферу, гидросферу (океаны, моря, озера, реки), криосферу (поверхность суши, снег, морской и горный лед и т.д.), биосферу, объединяющую все живое. Для количественных оценок значимости разных климатообразующих факторов, зависящих от солнечного и собственного излучения, ввели специальную характеристику КСЗ — *радиационное воздействие (форсинг)* [9].

Радиационное поле — один из неотъемлемых факторов жизнеобеспечения человека, животного и растительного мира на Земле, а также одна из определяющих компонент земной экосистемы и биосферы,

климата и погоды, для поведения которых характерно взаимодействие отдельных компонент с проявлением синергизма (обратных связей, которые иногда приводят к взаимоусилению различных процессов). Поле излучения влияет на механизмы изменчивости (динамические процессы: циркуляция, конвекция, турбулентный перенос; радиационные процессы; фотохимические процессы) геофизического, метеорологического, климатического состояний Земли, которые обладают сложными нелинейными связями, затрудняющими предсказание возможных эффектов, оценку их величины и значимости. Это с одной стороны, а с другой стороны, при дистанционном зондировании природных и техногенных объектов электромагнитное излучение Земли, которое регистрируется разными средствами, является носителем информации о состоянии КСЗ, окружающей среды и самих объектов. Космический мониторинг характеристик уходящего излучения и радиационного баланса Земли и системы ДЗЗ являются важнейшими элементами глобального слежения за текущим состоянием КСЗ и биосферы, а также основным информационным ресурсом при диагностике и прогнозе изменений КСЗ, биосферы и катастрофических явлений.

По оценкам Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК, или IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change), от 40 до 60% приходится на радиационный форсинг на эволюцию климата. Радиационный форсинг состоит в изменении притока радиации (солнечной коротковолновой и длинноволновой лучистой энергии) в глобальной КСЗ под влиянием следующих радиационно-активных факторов: альbedo и отражающие характеристики земной поверхности; облачность; океаны и моря; снежный и ледовый покров; загрязнения и газовый молекулярный и аэрозольный составы атмосферы; солнечная постоянная (солярный климат); спектральные характеристики рассеяния и поглощения компонент природной среды; изотропная и анизотропная (при осадках и низких температурах) среда; радиационно-конвективная фотохимия и фотолиз; оптико-метеорологическая «погода» (температура, давление, влажность); биофизические, биогеофизические и биогеохимические процессы, круговорот веществ в биосфере и экосистеме.

Теоретической основой оценки радиационного форсинга являются решения прямых и обратных задач теории переноса излучения с учетом поляризации и рефракции, аэрозольного и молекулярного рассеяния и поглощения солнечного и собственного излучения, анизотропии, пространственной неоднородности и стохастичности атмосферы, суши, океана, облачности, гидрометеоров, с использованием гиперспектральных подходов в диапазоне длин волн от УФ до ММВ, содержащем миллионы спектральных линий поглощения.

В 2016 г. можно отметить 50-летие сферической модели переноса солнечного и собственного излучения в системе «атмосфера — земная поверхность» (САЗ), разработанной Т.А. Сушкевич в 1966 г. [10]. Это была первая в мире численная модель глобаль-

ного поля яркости Земли в масштабах всей планеты, в которой были учтены основные факторы радиационных процессов, адекватно описывающих взаимодействия излучения с аэрозольными и газовыми компонентами атмосферы при реалистичных метеорологических параметрах и концентрациях рассеивающих и поглощающих веществ и альбедо земной поверхности [11–14]. Были созданы фундаментальные основы информационно-математического обеспечения для реализации космических проектов разного назначения.

Для верификации численной модели использовались данные наземных (на суше, на море, в горах и т.п.), вертолетных, самолетных, аэростатных, ракетных и космических измерений радиационных характеристик поля излучения Земли. По сложности и адекватности модели до сих пор никто в мире не превзошел эти результаты. В 60-е гг., когда стояли стратегические и прорывные задачи в освоении космоса, проводились масштабные всесторонние фундаментальные исследования. Уже первые снимки Земли с Автоматических межпланетных станций (АМС) «Зонд» показали, насколько сложна пространствен-

ная и угловая структура поля излучения Земли. Для иллюстрации приведены три рисунка, на которых показана структура поля яркости Земли в направлении терминатора, т.е. перпендикулярно солнечному потоку, когда никакие плоские приближения не применимы. На рис. 1 точками отмечены типичные ситуации с облачностью («черные точки») и с безоблачными («белые точки») участками, для которых проводились сопоставления измеренных и рассчитанных яркостей. На рис. 2 представлены изолинии яркости Земли, а на рис. 3 приведен пример меридионального профиля яркости.

Два объективных фактора не позволяют инструментально точно даже из космоса оценивать потоки солнечного излучения, выходящие из САЗ, и радиационные спектральный и глобальный балансы планеты. Из-за сферической геометрии, во-первых, уходящее солнечное излучение обладает свойством дельюции, т.е. расходимости потока с увеличением расстояния от центра Земли, а во-вторых, лучистые потоки распределены по всем направлениям, некоторые из которых не попадают в поле зрения приемника излучения.

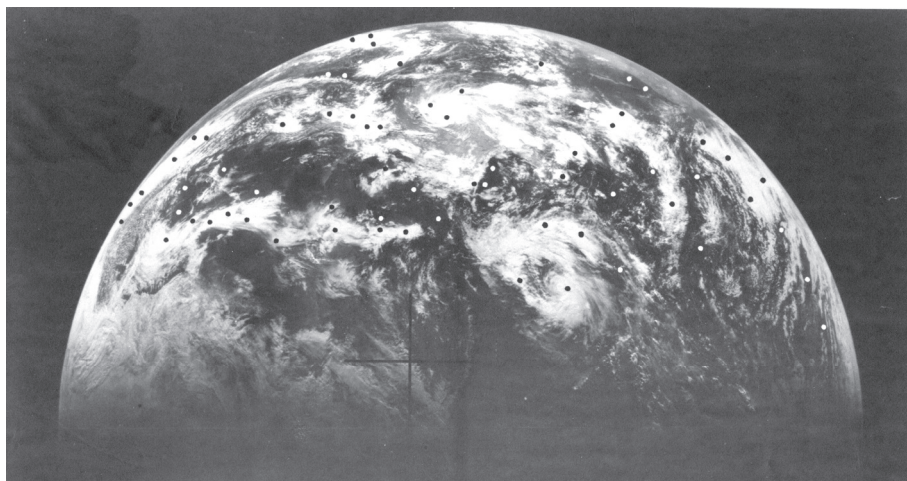


Рис. 1. Снимок Земли в терминаторе с АМС

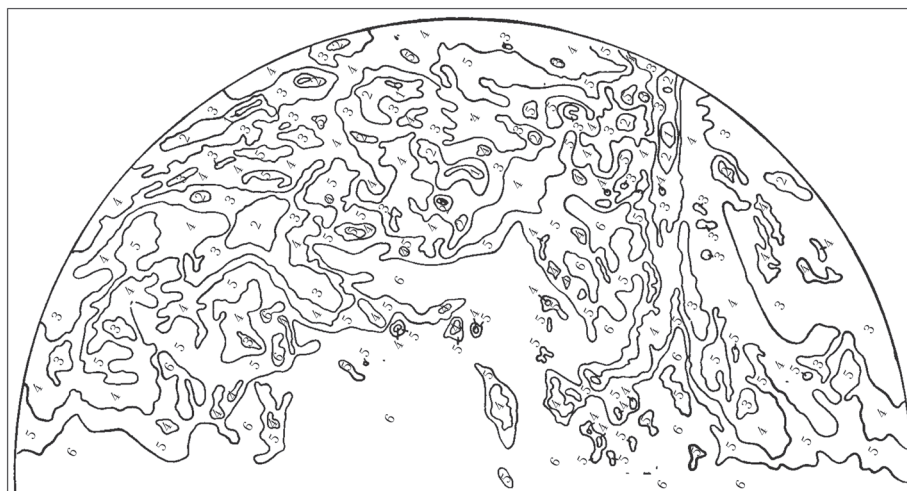


Рис. 2. Изолинии яркости Земли в терминаторе

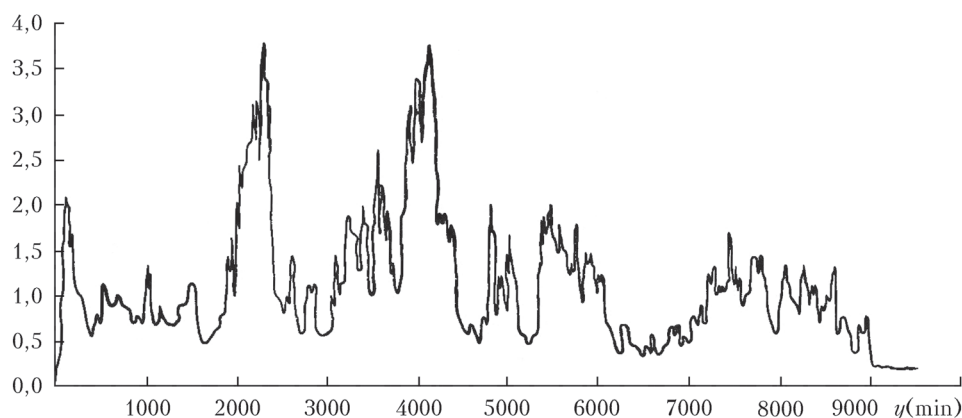


Рис. 3. Профиль яркости Земли в терминаторе

Наибольшее распространение получили два типа сферических задач. В первом большинство авторов использует одномерные сферические модели, применимые для ИК-диапазона спектра, где источником является собственное излучение атмосферы и поверхности. Во втором алгоритмы метода Монте-Карло для расчета многократного рассеяния солнечного излучения обычно основаны на локальных расчетах для сферически-симметричной САЗ, которую описывают прямоугольной системой координат. Высшие достижения в теории и практике решения таких задач имеет научная школа, созданная Г.И. Марчуком и Г.А. Михайловым. О разных подходах написано, например, в обзорах [15–21].

Однако пока не существует ни методик, ни технологий определения всех параметров глобальной КСЗ в фиксированный момент времени. После принятия «Рамочной Конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата» 9 мая 1992 г. исследования КСЗ активизировались, но наиболее слабым местом во всех моделях остается радиационный блок. Проводятся многочисленные частные «сценарные» прогнозные исследования отдельных факторов радиационного форсинга на отдельные компоненты КСЗ с использованием приближенных моделей переноса излучения. Нет объективных достоверных технологий ДЗЗ для оценивания выбросов в атмосферу, поскольку выбросы тут же распространяются в пространстве, так как атмосфера находится в состоянии постоянного движения. Поэтому возрастает роль «сценарного подхода» и математического имитационного моделирования радиационных характеристик для наиболее реалистичных моделей «оптической погоды» САЗ в масштабах планеты для разных регионов, сезонов и времени суток.

### Сферическая модель переноса излучения в масштабах планеты

Радиационное поле численно можно смоделировать как решение многомерных скалярных и векторных краевых задач для кинетических уравнений переноса излучения в рассеивающих, поглощающих,

поляризующих, преломляющих гетерогенных средах (атмосфера, облака, океан, поверхность) в масштабах планеты. Наиболее сложной является общая краевая задача теории переноса солнечного излучения для модели гетерогенной сферической оболочки в криволинейной системе координат. Сложность модели в том, что интегрирование по характеристикам (совпадающим с траекториями лучей света) дифференциального оператора переноса в частных производных с криволинейной системой координат можно осуществлять только аналитическими способами. При этом необходимы алгоритмы интегрирования по характеристикам без интерполяции (для расчета траектории световых лучей, оптических толщин и функций пропускания между двумя точками, прямого нерассеянного и однократно рассеянного солнечного потока) и с интерполяцией (для расчета в узлах разностной сети многократно рассеянного излучения на основе сеточно-характеристического метода).

Для 5-мерного фазового пространства с криволинейной сферической системой пространственных координат Т.А. Сушкевич сформулировала представление оператора переноса, нашла первые интегралы и вывела уравнения всех характеристик дифференциального оператора переноса в частных производных [22, 23]. Эти теоретические результаты позволили разработать и развить детерминированный итерационный метод интегрирования уравнения переноса по характеристикам для решения сферических задач любой сложности. В методе Монте-Карло используются те же характеристики — траектории лучей, но только подход статистический.

Задача состоит в определении интенсивности ослабленного прямого излучения от источников и стационарного поля интенсивности однократно и многократно рассеянного излучения в рассеивающей, поглощающей и излучающей сферической оболочке (атмосфере) с отражающей и излучающей подстилающей поверхностью (суша, океан, облака) или ее пределами. Такая модель описывает радиационное поле Земли как планеты с атмосферой. Приближение стационарного поля физически корректно, поскольку исследуется процесс распространения солнечного или собственного излучения.

Полную интенсивность монохроматического (при фиксированном  $\lambda$ ) или квазимонохроматического (при фиксированных  $\lambda$  и  $\Delta\lambda$ ) стационарного излучения в САЗ  $\Phi_\lambda(\mathbf{r}, \mathbf{s})$ , где индекс  $\lambda$  — длина волны (ниже везде опускается), в точке  $A(\mathbf{r})$  с радиус-вектором  $\mathbf{r}$  в направлении  $\mathbf{s}$  находим как решение общей краевой задачи теории переноса

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

с линейными операторами: интегро-дифференциальный оператор записан как  $K \equiv D - S$ ; дифференциальный оператор переноса

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

для трехмерной сферической геометрии задачи [22]:

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

интеграл столкновений — функция источника, описывающая многократное рассеяние,

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

оператор отражения в общем случае можно представить интегралом

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

Функция  $F^{in}(\mathbf{r}, \mathbf{s})$  описывает источники излучения внутри сферической оболочки, например собственное излучение; функции  $F^b(\mathbf{r}_b, \mathbf{s}^+)$  и  $F^t(\mathbf{r}_t, \mathbf{s}^-)$  — источники излучения на границах сферической области, определенные для направлений внутрь сферической оболочки (в частности, это может быть внешний поток солнечного излучения и собственное излучение подстилающей поверхности). Оператор  $R$  описывает закон отражения излучения от подстилающей поверхности, расположенной на уровне нижней границы  $\mathbf{r}_b$ ; 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 теории переноса для сферического слоя с прозрачными неотражающими абсолютно «черными» границами или с «вакуумными» граничными условиями

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

Можно выделить три типа радиационных задач, требующих учета земной поверхности. Первый тип — это задачи энергетики и радиационного баланса Земли, когда источником служит радиация Солнца. Второй тип — задачи дистанционного зон-

дирования атмосферы и облачности, когда земная поверхность является помехой. Третий тип — задачи дистанционного зондирования земной поверхности, когда необходимо устранить (провести атмосферную коррекцию) или достоверно учесть влияние атмосферы.

В любой активной или пассивной системе ДЗЗ всегда присутствуют четыре главные компоненты: «сценарий», «сцена», т.е. распределение яркости наблюдаемых объектов или ландшафта; атмосферный канал передачи изображения; прибор регистрации электромагнитных волн; комплекс обработки и распознавания изображения. В трех компонентах (кроме прибора) обязательным элементом является влияние атмосферы: атмосферно-оптические механизмы воздействуют на формирование «сценария», на перенос его изображения через среду и учитываются в радиационной коррекции при анализе «сцен». Используем универсальный подход, который позволяет описывать весь канал наблюдения через объективные характеристики, инвариантные относительно конкретных структур зондируемых объектов, условий освещенности и визирования. Такой подход известен как линейно-системный подход. Функциональное соотношение, связывающее входной и выходной сигналы системы, имеет фундаментальный характер и известно как «интеграл суперпозиции» или «передаточный оператор», означающий, что линейная система полностью характеризуется суммой ее откликов на входные воздействия.

Общая краевая задача (1) с операторами (2)–(5) линейна (в зависимости от источников), и ее решение можно представить в виде суперпозиции:  $\Phi = \Phi_a + \Phi_q$ . Фоновое излучение атмосферы  $\Phi_a$  определяется как решение первой краевой задачи (6). Компонента  $\Phi_q$ , обусловленная эффектами многократного отражения излучения от подстилающей поверхности, находится как решение общей краевой задачи

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

с источником  $E = R\Phi_a$ , описывающим отражение фонового излучения.

Теоретические конструкции и алгоритмы расчета вклада отражающей подстилающей поверхности основаны на теории обобщенных решений, теории интегральных преобразований обобщенных функций и рядах общей теории регулярных возмущений (асимптотический метод для представления решения в виде ряда с малым параметром). Такой подход, основанный на строгой математической основе, называем методом функций влияния [8].

Решение первой краевой задачи с источником на подстилающей поверхности

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

можно записать в форме линейного функционала — «интеграла суперпозиции»

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

Ядром этого функционала является функция влияния  $\Theta(\mathbf{s}_h^+; r, r_\perp, \mathbf{s})$ , которая определяется как решение первой краевой задачи

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

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

На основе теории регулярных возмущений с помощью ряда по малому параметру

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

общая краевая задача (7) сводится к рекуррентной системе первых краевых задач (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 один акт взаимодействия излучения с подстилающей поверхностью с помощью функции влияния:

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

Решения уравнений из системы первых краевых задач (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 общей краевой задачи (7) получается как линейный функционал в форме оптического «передаточного оператора»

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

где оптический образ «сценария» распределения яркости на подстилающей поверхности

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

описывается суммой ряда Неймана по кратности отражения излучения от подстилающей поверхности с учетом многократного рассеяния отраженного излучения в атмосфере через функцию влияния. «Сценарий» (10) удовлетворяет уравнению Фредгольма второго рода  $Y = R(\Theta, Y) + E$ , которое называют уравнением для near-ground image (или уравнением фотографии подстилающей поверхности). Суммарное излучение, или srace image (космическое изображение) Земли, описывается линейным функционалом

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

Линейный функционал (11) – это обобщенная математическая модель переноса излучения в САЗ, в которой разделены фоновое излучение атмосферы Земли и вклад поверхности Земли и которая асимптотически адекватна исходной общей краевой задаче (1). Такая математическая (физически корректная) модель описывает перенос солнечного и собственного излучений и радиационное поле Земли при различных структурах источников излучения  $E$  и разных типах подстилающей поверхности независимо от размерности САЗ.

Новые перспективные возможности математического моделирования атмосферной радиации Земли в масштабах планеты связаны с качественными изменениями информационных технологий, обусловленными внедрением высокопроизводительных вычислительных систем, и разработкой математического обеспечения для широкой области приложений на суперкомпьютерах с распараллеливанием вычислений.

## Заключение

В масштабах планеты стоит актуальная проблема создания международного глобального мониторинга Земли с целью исследования ее эволюции и прогнозирования естественно-природных стихийных бедствий и антропогенно-техногенных катастрофических процессов, а также экологических и климатических изменений в локальных и глобальных масштабах. С 30 ноября по 12 декабря 2015 г. в Париже состоялся 21-й Международный климатический саммит («Конференция сторон»), где участвовали главы более 150 государств, в том числе президент В.В. Путин, около 40 тысяч исследователей. 12 декабря 2015 г. было принято «Парижское соглашение согласно Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата» («Парижское соглашение»), которое после подписания всеми сторонами с 22 апреля 2016 г. по 21 апреля 2017 г. вступит в силу вместо «Киотского протокола». В «Парижском соглашении» лидеры 196 стран признали общую озабоченность и приняли безотлагательные обязательства по сокращению выбросов парниковых газов [24] для удержания роста температуры на уровне ниже 2°, возможно даже ниже 1,5°. «Парижское соглашение» имеет широкомасштабный, динамичный и всеобщий характер. Оно охватывает все страны и все выбросы, и это четкий сигнал о готовности правительств к осуществлению Повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 г.

Это грандиозные задачи, которые охватывают важные направления фундаментальных исследований в разных областях знаний (математика, физика, химия, биология, геофизика, метеорология, инженерно-конструкторские разработки, информационные технологии), имеющих междисциплинарный характер и тематически объединяемых задачами комплексного изучения окружающей природной, космической и техногенной сред с использованием кинетической теории переноса излучения, спектральных

методов молекулярной физики, методов и средств космических исследований и космического землеведения на основе перспективных гиперспектральных технологий ДЗЗ и нанодиагностики, математического моделирования и эффективных численных методов с распараллеливанием супервычислений на современных и перспективных суперкомпьютерах [25–27]. Это долгосрочная стратегия в области международной космической деятельности, ДЗЗ и computer sciences.

Отечественная научная школа по прямым и обратным задачам теории переноса излучения и ДЗЗ, вне всяких сомнений, — ведущая в мире. Так и должно быть в космической державе, которая запустила в космос первый ИСЗ, первого человека и первые орбитальные станции. Авторский коллектив статьи традиционно проводит работы на физически корректном и математически строгом уровне в рамках математической физики, что позволяет обобщать другие частные результаты по прямым и обратным задачам теории переноса, поскольку исходные уравнения переноса излучения во всех работах общие, только отличаются формы записи или используемые приближения. Т.А. Сушкевич опубликовано много обзоров и сделано много докладов, в которых отражены отечественные достижения, например, [15–21] и другие. В 2002 г. коллектив в составе 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 получил Премию Правительства РФ в области науки и техники за работу «Разработка и внедрение методов и технологий аэрокосмического мониторинга природной среды».

Мы считаем необходимым напомнить, что на начальном этапе космической эры вычислительные работы по атмосферной оптике и ДЗЗ выполнялись тремя коллективами [5–8, 28–32]: в Москве в Институте Келдыша (численные детерминированные и статистические подходы), в Ленинграде под руководством К.Я. Кондратьева и В.В. Соболева (полуаналитический подход для плоско-сферической модели), в Новосибирске под руководством Г.И. Марчука и Г.А. Михайлова (методы Монте-Карло). Большинство расчетов в настоящее время выполняется с использованием алгоритмов Монте-Карло, которые по своей природе являются локальными расчетами. Первые алгоритмы метода Монте-Карло были разработаны в интересах атомного проекта в Институте Келдыша под руководством И.М. Гельфанда, И.М. Соболя, Н.Н. Ченцова. Г.А. Михайлов, который в 28 лет получил Ленинскую премию за метод и алгоритмы Монте-Карло в атомном проекте, закончил аспирантуру и стал специалистом по статистическому моделированию в Институте Келдыша под руководством И.М. Гельфанда и Н.Н. Ченцова. В Физико-энергетическом институте (г. Обнинск) метод Монте-Карло развивали В.Г. Золотухин и С.М. Ермаков для атомного проекта. В 1979 г. коллективу ученых в составе Г.И. Марчук (руководитель работы), Г.А. Михайлов, С.М. Ермаков,

В.Г. Золотухин, Н.Н. Ченцов присуждена Государственная премия «За цикл работ по развитию и применению метода статистического моделирования для решения многомерных задач теории переноса излучения».

Под руководством В.Е. Зуева был создан институт и была основана научная школа в Томске, которая вышла на передовые рубежи науки и занимает сейчас лидерские позиции в мире, в том числе по теории и практике решения задач ДЗЗ и развитию теории и методов линейно-системного подхода (см., например, [33–35] и многочисленные статьи в ведущем профильном журнале «Оптика атмосферы и океана»).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №№ 15-01-00783, 14-01-00197.

1. 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 атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 7. С. 573–580.
2. Келдыш М.В. Творческий портрет по воспоминаниям современников. М.: Наука, 2001. 416 с.
3. Сушкевич Т.А. Главный Теоретик М.В. Келдыш и Главный Конструктор космонавтики С.П. Королев — покорители космоса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 1. С. 9–25.
4. Сушкевич Т.А. М.В. Келдыш — организатор международного сотрудничества в космосе и первой советско-американской Программы «Союз—Аполлон» (ЭПАС) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 4. С. 9–22.
5. Кузнецов Е.С. Избранные научные труды (в связи со 100-летием со дня рождения) / Отв. ред. и сост. Т.А. Сушкевич. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 784 с.
6. Численное решение задач атмосферной оптики // Сборник научных трудов ИПМ им. М.В.Келдыша АН СССР / Под ред. М.В. Масленникова и Т.А. Сушкевич. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, 1984. 234 с.
7. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Иолтуховский А.А. Метод характеристик в задачах атмосферной оптики. М.: Наука, 1990. 296 с.
8. Сушкевич Т.А. Математические модели переноса излучения. М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2005. 661 с.
9. Кароль И.Л., Катцов В.М., Киселев А.А., Кобышева Н.В. О климате по существу и всерьез. СПб.: ГГО им. А.И. Воейкова, 2008. 55 с.
10. Сушкевич Т.А. Осесимметричная задача о распространении излучения в сферической системе / Отчет № 0-572-6. М.: ИПМ АН СССР, 1966. 180 с.
11. Сушкевич Т.А. Об одном методе решения уравнения переноса для задач с двумерной сферической геометрией. Препр. / ИПМ АН СССР (Москва). 1972. № 15. С. 1–31. Депонирован, № 5557-73 от 28.02.73.
12. Сушкевич Т.А. Поле яркости сферической атмосферы: Автореф. ... канд. физ.-мат. наук. М.: ИФА АН СССР, 1972. 11 с.
13. Назаралиев М.А., Сушкевич Т.А. Расчеты характеристик поля многократно рассеянного излучения в сферической атмосфере // Изв. АН СССР. Сер. Физ. атмосф. и океана. 1975. Т. 11, № 7. С. 705–717.
14. Сушкевич Т.А., Коновалов Н.В. Об области применимости плоской модели в задачах о многократном

- рассеянии излучения в земной атмосфере // Изв. АН СССР. Сер. Физ. атмосфер. и океана. 1978. Т. 14, № 1. С. 44–57.
15. Сушкевич Т.А. О моделировании переноса солнечного излучения в сферической атмосфере Земли и облаках // Оптика атмосфер. и океана. 1999. Т. 12, № 3. С. 251–257.
  16. Сушкевич Т.А. О решении задач атмосферной коррекции спутниковой информации // Исслед. Земли из космоса. 1999. № 6. С. 49–66.
  17. Сушкевич Т.А., Максакова С.В. Обзор методов учета земной поверхности и задачах дистанционного зондирования в расчетах радиационного поля Земли – 2. Препр. / ИПМ им. М.В. Келдыша РАН (Москва). 1999. № 52. С. 1–32.
  18. Сушкевич Т.А., Максакова С.В. Обзор методов учета земной поверхности и задачах дистанционного зондирования в расчетах радиационного поля Земли – 3. Препр. / ИПМ им. М.В. Келдыша РАН (Москва). 1999. № 53. С. 1–32.
  19. Сушкевич Т.А., Максакова С.В. Обзор методов учета земной поверхности и задачах дистанционного зондирования в расчетах радиационного поля Земли – 4. Препр. / ИПМ им. М.В. Келдыша РАН (Москва). 1999. № 54. С. 1–32.
  20. Сушкевич Т.А. О сферической модели излучения Земли // Вычислительная математика и математическое моделирование / Труды международной конференции, посвященной 75-летию академика Г.И. Марчука и 20-летию Института вычислительной математики РАН, Москва, 19–22 июня 2000 г. / Под ред. академика В.П. Дымникова. Т. 1. М.: ИВМ РАН, 2000. С. 168–191.
  21. 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.
  22. Сушкевич Т.А., Владимиров Е.В. Сферическая модель переноса излучения в атмосфере Земли. II. Криволинейная система координат. Характеристики уравнения переноса. Препр. / ИПМ им. М.В. Келдыша РАН (Москва). 1997. № 73. С. 1–32.
  23. 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 (Москва). 1998. № 1. С. 1–32.
  24. Парижское соглашение согласно Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата («Парижское соглашение»). ООН. 2016. 19 с. URL: paris\_agreement\_russian\_.pdf
  25. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Владимиров Е.В., Волкович А.Н., Игнатова Е.И., Козодеров В.В., Куликов А.К., Максакова С.В., Мельникова И.Н., Фолин Б.А. Радиационный фактор изменений климата и аэрокосмического мониторинга природной среды // Тезисы докладов Всемирной конференции по изменению климата. М.: Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, 2003. С. 443.
  26. Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Сушкевич Т.А. О роли аэрокосмических гиперспектральных систем наблюдения в проблемах изменения климата и прогнозирования катастрофических процессов // Международная научная конференция «Проблемы адаптации к изменению климата (ПАИК2011)», 7–9 ноября 2011 г., Москва.
  27. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В. Информационно-математическое обеспечение аэрокосмических систем дистанционного зондирования и радиационного форсинга на климат Земли для прогноза последствий освоения региона Арктики и суперкомпьютеринг // Суперкомпьютерные дни в России. Труды международной конференции. М.: Московский гос. ун-т им. М.В. Ломоносова, 2015. С. 163–169.
  28. Марчук Г.И., Михайлов Г.А., Назаралиев М.А., Дарбинян Р.А. Решение прямых и некоторых обратных задач атмосферной оптики методом Монте-Карло. Новосибирск: Наука, 1968. 100 с.
  29. Михайлов Г.А. Статистическое моделирование процессов переноса излучения в атмосфере: Автореф. дисс. ... докт. физ.-мат. наук. Новосибирск, 1971. 19 с.
  30. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике / Под ред. Г.И. Марчука. Новосибирск: Наука, 1976. 283 с.
  31. Кондратьев К.Я., Марчук Г.И., Бузников А.А., Минин И.Н., Михайлов Г.А., Назаралиев М.А., Орлов В.М., Смоктий О.И. Поле излучения сферической атмосферы. Л.: Изд-во ЛГУ, 1977. 215 с.
  32. Смоктий О.И. Моделирование полей излучения в задачах космической спектродетекции. Л.: Наука, 1986. 352 с.
  33. Зуев В.Е., Белов В.В., Веретенников В.В. Теория систем в оптике дисперсных сред. Томск: Спектр, 1997. 402 с.
  34. Белов В.В., Тарасенков М.В., Абрамочкин В.Н., Иванов В.В., Федосов А.В., Троицкий В.О., Шиянов Д.В. Атмосферные бистатистические каналы связи с рассеянием. Часть 1. Методы исследования // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 4. С. 261–267.
  35. Белов В.В., Тарасенков М.В. О точности и быстродействию RTM-алгоритмов атмосферной коррекции спутниковых изображений в видимом и УФ-диапазоне // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 7. С. 564–571.

*T.A. Sushkevich, S.A. Strelkov, S.V. Maksakova. About the global model of radiation forcing on the climate and remote sensing.*

This article is dedicated to the memory of genius scientist and organizer of science, the chief theorist of astronautics, the only mathematician three times Hero of Socialist Labor, the President of the Academy of Sciences of USSR, Academician Mstislav Keldysh in the year of 105 anniversary of his birth (10.02.1911–24.06.1978). The work is dedicated to the 55th anniversary of the first manned flight into space on April 12, 1961. The first cosmonaut of the planet was a citizen of the Soviet Union, Yuri Gagarin. This work is focused on the applications of the theory of the radiation transfer with hyper spectral approach to the space projects of remote sensing of the Earth climate system. The spectral observations are one of the important channels of information in the remote sensing. The measurement of the spectral radiation characteristics of the Earth as a planet in all spectral ranges from UV to the millimeter wavelengths allows one to receive the important information both about the properties of the sources and mechanisms of their radiation and of the environment, which absorbs, scatters and reflects the electromagnetic waves. In terms of the implementation of field observations, this is a challenge for the future; currently, it is suggested to develop information and mathematical aspects and the scenario approach to the solution of the problem on the basis of mathematical modeling on supercomputers and parallel supercomputing. It is important to formulate universal system models and methods for the supercomputing in problems of environmental and climate monitoring and research of the spectral characteristics of the radiation balance and albedo of the spherical Earth as global characteristics of climate evolution of the planet.