

## **«Парижское соглашение» и глобальная модель радиационного форсинга на климат в масштабах планеты (посвящается памяти Главного Теоретика Космонавтики академика М.В. Келдыша в год его 105-летия)\***

Т.А. Сушкевич<sup>1</sup>, С.А. Стрелков<sup>1</sup>, С.В. Максакова<sup>1</sup>

ФГУ «ФИЦ Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН»<sup>1</sup>

В 2016 году научная общественность отмечает дни памяти крупнейших ученых, которые открыли дорогу в космос для человечества и стояли у истоков создания великого научного наследия теории переноса излучения в природных средах и её приложений в космических проектах, астрофизике, климатологии, метеорологии, дистанционном зондировании Земли, глобальном мониторинге опасных объектов и последствий природных и техногенных катастроф и т.д. Речь идет об отечественных достижениях мирового уровня и современном развивающемся в России научном потенциале, который в должной мере обеспечивает методические основы теоретико-расчетных исследований радиационных процессов и радиационных полей планеты Земля с использованием суперкомпьютеров и распределенных вычислительных инфраструктур с сетевым компьютерингом. Представители 196 стран приняли «Парижское соглашение согласно Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата», которое определяет Повестку дня до 2030 года и подтверждает актуальность тематики.

Ключевые слова: информационно-математическое обеспечение, климат, радиационный форсинг, масштаб планеты, компьютеринг

### **1. 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 тем отечественным ученым, кто в середине 20-го века перешел от географических понятий «климат» к всепланетарным проблемам климата и устойчивого развития планеты и создал научные основы для исследований сложнейшей климатической системы Земли (КСЗ). Подтверждается стратегический выбор ответа на вопрос «Зачем нужен космос?», сделанный М.В. Келдышем в 1955 г.: «разведка и наблюдение Земли» [1-4].

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). Он первый увидел «голубую планету» из космоса. В год 105-летия Мстислава Всеволодовича Келдыша (10.02.1911-24.06.1978) обязаны напомнить о заслугах Главного Теоретика космонавтики, гениального Ученого и Организатора науки, единственного из математиков трижды Героя Социалистического Труда, академика с 1946 г., Президента великой АН СССР в 1961-1976 гг. [1-4]. М.В. Келдыш - организатор и первый директор с 1953 по 1978 гг. первого в мире Института прикладной математики, созданного для выполнения атомного и ракетно-космического проектов и обеспечения «ракетно-ядерного щита» на основе достижений математики с использованием вычислительной техники, породивших современные «computer sciences», информационные технологии и компьютеринг. Дважды звания 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

---

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

Ленина и золотой медали «Серп и молот» С.П. Королеву (Указ Верховного Совета СССР № 253/13 от 20.04.1956 за заслуги в деле создания дальних баллистических ракет) и М.В. Келдышу (Указ от 11.09.1956). За обеспечение запуска первого ИСЗ 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 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 посвящение памяти профессора Евграфа Сергеевича Кузнецова в год 115-летия со дня его рождения (13.03.2001) и 50-летия со дня его кончины (17.02.1966). Е.С. Кузнецов [5] - это первый советский вычислитель-«модельер» - специалист 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 в 1955 г. организовал единственный в мире уникальный отдел «Кинетические уравнения» в Институте Келдыша. Это и итоги 55 лет научной работы автора статьи Т.А. Сушкевич [6] в Институте Келдыша – последней ученицы Е.С. Кузнецова.

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, 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») [7], которое после подписания с 22 апреля 2016 г. по 21 апреля 2017 г. всеми сторонами вступит в силу вместо «Киотского протокола». В «Парижском соглашении» лидеры 196 стран признали общую озабоченность и приняли безотлагательные обязательства по сокращению выбросов парниковых газов для удержания роста температуры на уровне ниже 2 градусов, возможно даже ниже 1,5 градуса. «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 года. Это соглашение определяет на длительную перспективу вектор развития фундаментальных и прикладных исследований, которые по сути своей междисциплинарные и международные, а по масштабности проблемы настолько грандиозны и сложны, что надежды на достоверные результаты и прогнозы можно оправдать только с помощью «сценарного» моделирования воздействия разных факторов на КСЗ на суперкомпьютерах и создания международных информационных ресурсов big data.

Особое место занимает «Глобальный форум по защите окружающей среды и развитию в целях выживания», который проходил в январе 1990 года в Москве по инициативе президента СССР М.С. Горбачева в условиях, когда в 80-ые годы весь мир находился в ожидании катастрофы из-за «ядерного конфликта» и последствий Чернобыльской аварии на АЭС, произошедшей 30 лет назад 26 апреля 1986 года. Ещё более сильный планетарный эффект, в основе которого лежит радиационный форсинг, был продемонстрирован учеными, которые смоделировали последствия «локальных ядерных ударов», приводящих к «ядерной зиме» и «полярной ночи» на планете. Это заслуга коллектива молодых советских ученых в составе В.В. Александрова, Г.Л. Стенчикова, Ю.М. Свиричева, А.М. Тарко, В.П. Пархоменко под руководством академика Н.Н. Моисеева [8]. На этом форуме по инициативе американского ученого-астрофизика Карла Сагана было принято обращение ко всем руководителям государств, парламентариям и ученым о необходимости остановить «СОИ» и «ядерные войны». Концепции ограниченной ядерной

войны дебатировались в НАТО на протяжении нескольких десятилетий и в середине 1980-х годов были упразднены из-за своей явной самоубийственности. Однако, в 21-м веке вновь актуальна проблема «ограниченной ядерной войны» и её последствий для планеты Земля. А потому опять остро стоит проблема моделирования «сценариев» с «ядерной зимой».

## 2. Постановка задачи

В настоящей работе идет речь о детерминированном подходе к решению кинетического уравнения Больцмана для математического моделирования переноса излучения с учетом многократного рассеяния и поглощения для 7d-модели радиационного поля Земли в масштабах планеты: сферическая 5d-модель для спектра длин волн от ультрафиолета до миллиметрового (ММВ) диапазона и многообразия «оптической погоды». Для 5d-фазового пространства с криволинейной сферической системой пространственных 3d-координат и 2d-сферической системы координат на единичной сфере для направлений распространения излучения Т.А. Сушкевич сформулировала представление оператора переноса, нашла первые интегралы и вывела уравнения всех характеристик дифференциального оператора переноса в частных производных [6, 9]. Эти теоретические результаты позволили разработать и развивать детерминированный итерационный метод интегрирования уравнения переноса по характеристикам для решения сферических задач любой сложности. В методе Монте-Карло траектории лучей - те же характеристики, но в прямоугольной системе координат и подход статистический, а расчеты локальные, потому метод не приемлем для расчетов глобального поля радиации Земли в масштабах планеты.

Ведущими специалистами из Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова написана книга «О климате по существу и всерьез» [10]. Во многом благодаря прорывам в космических системах дистанционного зондирования Земли (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 всё живое. Для количественных оценок значимости разных климатообразующих факторов, зависящих от солнечного и собственного излучения, ввели специальную характеристику КСЗ – *радиационное воздействие (форсинг)* [10].

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 состояния 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 - это изменение 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 состав атмосферы; солнечная постоянная (соляренный 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, используя гиперспектральные подходы в диапазоне длин волн от УФ до ММВ, содержащем миллионы спектральных линий поглощения более 40 компонент атмосферы.

В 2016 году можно отметить 50-летие сферической 4d-модели переноса солнечного и собственного излучения в системе «атмосфера – земная поверхность» (САЗ), разработанную в отделе «Кинетические уравнения» Института Келдыша Т.А. Сушкевич в 1966 году [11]. Это была первая в мире численная модель глобального поля яркости Земли в масштабах всей планеты, в которой впервые 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 [6, 11]. Были созданы фундаментальные основы информационно-математического обеспечения для реализации космических проектов разного назначения. До сих пор никто в мире не превзошел эти результаты.

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 частные многочисленные «сценарные» прогнозные исследования влияния 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. Потому возрастает роль «сценарного подхода» и математического имитационного моделирования радиационных характеристик для наиболее реалистичных моделей «оптической погоды» САЗ в масштабах планеты для разных регионов, сезонов года и времени суток.

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 [6]. 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).

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 за её 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 ин-

диск  $\lambda$  - 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

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

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 [9]

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

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

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

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.

### 3. Параллельные алгоритмы

Используются и апробированы следующие алгоритмы распараллеливания вычислений:

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

### 4. Информационно-математическая система

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

Первая группа программ - формирование оптико-метеорологических моделей среды: программы работы с архивом и базами данных моделей атмосферы, облаков, дымов, земной поверхности, океана; банк спектров поглощения атмосферных газов; банк характеристик аэрозольного рассеяния и поглощения; формирование модели атмосферы; пакеты данных к программам расчета радиационных характеристик и т.д. с использованием международных интернет, ГРИД- и «облачных» систем данных «оптической погоды» и спектральных атласов.

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

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

Реализация функции управления и сетевого взаимодействия комплексом Фортран-программ производится с помощью оболочек, написанных на языке описания сценариев Perl. Комплекс математических моделей, методов и программного обеспечения представляет собой открытую развиваемую систему математического моделирования. Аналогов не существует.

## 5. Заключение

Это грандиозные задачи, которые охватывают важные направления фундаментальных исследований в разных областях знаний (математика, физика, химия, биология, геофизика, метеорология, инженерно-конструкторские разработки, информационные технологии и т.п.), 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 ДЗЗ и нанодиагностики, математического моделирования и эффективных численных методов с распараллеливанием супервычислений на современных и перспективных суперкомпьютерах. Это долгосрочная стратегия в области международной космической деятельности по проблемам ДЗЗ и климата, а также «computer sciences».

## Литература

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 атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 7. С. 21-27.
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) / Ответ. редактор и составитель Сушкевич Т.А. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 784 с.
6. Сушкевич Т.А. Математические модели переноса излучения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. 661 с.
7. Парижское соглашение согласно Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата («Парижское соглашение»). ООН. 2016. 19 с. (paris\_agreement\_russian\_.pdf)
8. Моисеев Н.Н. Как далеко до завтрашнего дня. Свободные размышления. 1917-1993. М.: «Аспект пресс», 1994. 304 с. (Глава X. Эпопея ядерной зимы... Карл Саган и первые сценарии ядерной войны) Электронная книга [http://www.ccas.ru/manbios/kak\\_daleko\\_r.html](http://www.ccas.ru/manbios/kak_daleko_r.html)
9. Сушкевич Т.А., Владимирова Е.В. Сферическая модель переноса излучения в атмосфере Земли. - II. Криволинейная система координат. Характеристики уравнения переноса. М., 1997 (Препр. ИПМ им. М.В. Келдыша РАН; № 73).
10. Кароль И.Л., Катцов В.М., Киселев А.А., Кобышева Н.В. О климате по существу и всерьез. Санкт-Петербург: ГГО им. А.И. Воейкова, 2008. 55 с.
11. Сушкевич Т.А. Осесимметричная задача о распространении излучения в сферической системе. М., 1966 (Отчет ИПМ АН СССР; № 0-572-6. 180 с.)