



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 167 за 2018 г.



ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

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

**Земля, космос и
суперкомпьютинг:
сопряженные радиационные
задачи**

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Сушкевич Т.А., Стрелков С.А.,
Максакова С.В. Земля, космос и суперкомпьютинг: сопряженные радиационные задачи //
Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. № 167. 20 с. doi:[10.20948/prepr-2018-167](https://doi.org/10.20948/prepr-2018-167)
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-167>

**Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук**

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

**Земля, космос и суперкомпьютинг:
сопряженные радиационные задачи**

**(Посвящается 65-летию ИПМ имени М.В.Келдыша
и памяти математика-легенды М.В.Келдыша)**

Москва — 2018

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

Земля, космос и суперкомпьютинг: сопряженные радиационные задачи (Посвящается 65-летию ИАПМ имени М.В.Келдыша и памяти математика-легенды М.В.Келдыша)

Сложнейшие задачи эволюции, климата, экологии, глобального мониторинга и дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с гиперспектральными подходами и нанодиагностикой природной среды и объектов предлагается рассматривать как сопряженные. Электромагнитное излучение – единое физическое поле, объединяющее радиационное поле Земли с радиационно-активными компонентами. Непреодолимая сложность проблемы состоит в том, что для исследований планеты недопустимы натуральные эксперименты и возможны только мониторинг и наблюдения разными средствами и математическое моделирование «сценариев».

Ключевые слова: космос, компьютеры, супервычисления, перенос излучения, сопряженные прямые и обратные задачи, математическое моделирование, радиационный форсинг, мониторинг, гиперспектральное зондирование, климат, экология, нанодиагностика, природные среды и объекты

Tamara Alexeevna Sushkevich, Sergey Aleksandrovich Strelkov, Svetlana Victorovna Maksakova

Earth, space and supercomputing: conjugate radiation problems (Dedicated to 65th anniversary of Keldysh Institute of Applied Mathematics and memory mathematician-legend M.V.Keldysh)

The most complicated problems of evolution, climate, ecology, global monitoring and remote sensing of the Earth (ERS) with hyperspectral approaches and nano-diagnostics of the natural environment and objects are proposed to be considered as conjugate. Electromagnetic radiation is a single physical field that unites the Earth's radiation field with radiation-active components. The insurmountable complexity of the problem lies in the fact that natural experiments are not permissible for the study of the planet, and only the monitoring and observations by different means and the mathematical modeling of the «scenarios» are possible.

Key words: space, supercomputing, radiation transfer, conjugate direct and inverse problems, mathematical modeling, Earth, radiation forcing, monitoring, hyperspectral remote sensing, climate, ecology, nano-diagnostics, media

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 18-01-00609 а, 17-01-00220 а).

1. Введение

Академик Кирилл Яковлевич Кондратьев (14.06.1920-01.05.2006) [1, 2]: «В конце XX века человечество вступило в такой период своего развития, когда обретает черты реальности предсказание великого русского естествоиспытателя академика Владимира Ивановича Вернадского (28.02.1863-06.01.1945) [3] о том, что хозяйственная деятельность человека становится геологической силой, способной изменить мир, поставив его на грань глобальной экологической катастрофы. Именно это и определяет исключительную актуальность проблем глобальной экологии и выдвижение политической концепции приоритета общечеловеческих ценностей.»

Самая большая и важная для всего человечества ГЛОБАЛЬНАЯ программа «Повестки XXI-го века» – это всемирная программа «Будущее Земли», фундаментальные основы для реализации которой были заложены в XX-м веке благодаря **изобретению компьютера и выхода человека в космос**. Юрий Алексеевич Гагарин (09.03.1934-27.03.1968) – ПЕРВЫЙ в истории человечества увидел планету Земля из космоса и воскликнул «Земля голубая!», а позже добавил «Земля такая маленькая...».

Эти великие открытия и международное сотрудничество в космосе связаны с именем математика-легенды Мстислава Всеволодовича Келдыша (10.02.1911-24.06.1968) [4-6]. 24 июня 2018 г. исполнилось 40 лет как скончался этот русский гений, масштабы интеллектуальной, научной и организационной деятельности которого потрясают воображение. Статья посвящается памяти М.В. Келдыша – «Великого ума России» – «Ломоносова XX-го века» [7], заложившего фундаментальные основы цивилизации и постиндустриального информационного общества XXI-го века, а также «цифровой экономики» и современных глобальных проблем по спасению планеты Земля.

Двадцатый век в истории земной цивилизации – это век научно-технической революции (НТР), связанной с тремя великими открытиями:

- проникновение в тайны и овладение ядерной энергией;
- покорение космического пространства и выход человека в космос;
- изобретение электронно-вычислительных машин (ЭВМ) и создание информационных технологий, которые стали движущей силой НТР и обеспечили успех атомного и космического проектов.

Статья посвящается **65-летнему юбилею ПЕРВОГО в мировой науке и мировой практике Института прикладной математики** [8], который до 1966 г. работал в закрытом режиме и известен как «**Институт Келдыша**» – его создателя и первого директора (1953-1978). 14 февраля 1954 г. в кабинете М.В. Келдыша (с 1981 г. Мемориальный музей-кабинет академика М.В. Келдыша) состоялось ПЕРВОЕ совещание [9-10], на котором ВПЕРВЫЕ обсуждался вопрос о возможности создания и запуска в космическое пространство ПЕРВОГО искусственного спутника Земли (ИСЗ).

О программе космических исследований заговорили в 1955 г. По указанию М.В. Келдыша в 1955 г. из Академии наук СССР с помощью референта Геннадия Андреевича Скуридина разослали письма в разные организации и ученым разных специальностей с одним вопросом "**Как можно использовать космос?**" Мнений и предложений было много и разных. Для убеждения руководителей СССР в необходимости освоения космического пространства и запусков космических спутников и кораблей М.В. Келдыш как уже признанный государственный деятель выделил **две главные задачи: разведка и наблюдения Земли**, вокруг которых сформировались многие научно-исследовательские проекты, определилась новая отрасль человеческой деятельности: в 1955 г. было создано Министерство общего машиностроения и другие ведомства, началось строительство космодрома Байконур.

В ноябре 1955 г. из Академии Наук СССР в ЦК КПСС и Совет Министров было направлено письмо с Программой космических исследований. Так родилось новое научно-практическое направление **дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ)**, которое в международной практике называют **REMOTE SENSING**, с приложениями в разных отраслях народного хозяйства и экономики, включая военно-оборонный комплекс, которое послужило драйвером создания и развития не только вычислительной техники, но и разных направлений в информационных технологиях, в том числе телекоммуникационные технологии, ГРИД и «облачные» системы, big data и др. В космических проектах зародились цифровые технологии приема и обработки информации и изображений, цифровые мониторы, телевизоры, современные Интернет и мобильная связь и множество других приложений гражданского назначения, без которых не обходится современное информационное общество.

Запуск ПЕРВОГО искусственного спутника Земли – это «ПОДАРОК» к 50-летию член-корреспондента АН СССР Сергея Павловича Королева (12.01.1907-14.01.1966) – **ГЛАВНОГО КОНСТРУКТОРА КОСМОНАВТИКИ**. Полет Ю.А. Гагарина – это «ПОДАРОК» к 50-летию академика АН СССР М.В. Келдыша – **ГЛАВНОГО ТЕОРЕТИКА КОСМОНАВТИКИ**.

2. Радиационное поле Земли и радиационный форсинг

Подтверждается стратегический выбор М.В. Келдыша, сделанный в 1955 г. и актуальный в XX и XXI веках. Между СССР и США был достигнут паритет по межконтинентальным баллистическим ракетам и остро стояла проблема разработки и создания ПРО (противоракетной обороны). М.В. Келдыш предложил концепцию упреждения стартов и наблюдения за полетами ракет из космоса. В рамках этого проекта впервые появились задачи с глобальным радиационным полем Земли [11]. Этот фантастический проект поражает своей масштабностью и до сих пор актуален и является мощным сдерживающим фактором.

Три составные части космических исследований и ДЗЗ – три основоположника в Институте Келдыша, которым посвящается настоящая статья:

– трижды Герой Социалистического Труда, Президент Академии Наук СССР (1961-1975) академик М.В. Келдыш – это космос и компьютер;

– дважды Герой Социалистического Труда академик Андрей Николаевич Тихонов (30.10.1906-07.10.1993) – это обратные и некорректные задачи [12];

– профессор МГУ имени М.В. Ломоносова Евграф Сергеевич Кузнецов (13.03.1901-17.02.1966) – это теория переноса излучения и начало исследований радиационного поля и климата Земли [13].

В июне 1954 г. прошли успешно испытания ПЕРВОЙ в мире атомной станции в Обнинске, расчетами которой под общим руководством Игоря Васильевича Курчатова (08.01.1903-07.02.1963) руководил ПЕРВЫЙ советский модельер-вычислитель задач теории переноса Е.С. Кузнецов, создавший в 1952 г. математический отдел в ФЭИ. В 1955 г. в Институте Келдыша Е.С. Кузнецов создал уникальный и единственный в мире отдел «Кинетические уравнения», в котором проводились исследования всех типов уравнений и классов моделей кинетической теории в разных приложениях, в том числе в атомных, реакторных и термоядерных проектах, высоко- и низкотемпературной плазме, атмосферной оптике, оптике океана, метеорологии и прогнозе погоды, климате, космических проектах, астрофизике и т.д. В США и Англии его конкурентом был Субраманьян Чандрасекар (19.10.1910-21.08.1995) – Нобелевский лауреат 1983 г., который написал первую в мире книгу по переносу лучистой энергии, а в 1953 г. под редакцией Е.С. Кузнецова эта книга вышла на русском языке в СССР [14]. Т.А. Сушкевич – последняя ученица Е.С. Кузнецова – ведущий специалист по теории переноса излучения.

Советские ученые активно готовились к первому правительственному саммиту по климату в Рио-де-Жанейро, 1992 год. [15]. После подписания «Парижского соглашения по климату» [16] в 2016 г. ВПЕРВЫЕ на уровне международных соглашений «климат» обошел по значимости «экологию», хотя они и взаимосвязаны. ВПЕРВЫЕ открыто начали говорить о двух важнейших механизмах: контроль за климатом, управление климатом.

КОНТРОЛЬ за климатом – это прежде всего дистанционное зондирование «Климатической системы Земли» (КСЗ), т.е. международный глобальный мониторинг КСЗ, включающий: международную сеть наземных наблюдений; международную глобальную космическую группировку землеобзора; мощные центры хранения big data; «computer science» (информационные технологии приема, хранения, обработки данных и изображений); тематический анализ данных на основе решения прямых и обратных задач ДЗЗ.

УПРАВЛЕНИЕ климатом – это выполнение странами обязательств, принятых в рамках «Парижского соглашения» по климату и «Повестки дня до 2030 года» для обеспечения устойчивого развития, а также прогнозирование изменений климата на основе «сценарного» подхода и моделей КСЗ.

Единое физическое поле – электромагнитное излучение – и его взаимодействие с веществом определяют радиационное поле Земли и лежат в основе сопряженных задач экологии, климата, мониторинга и дистанционного зондирования Земли, гиперспектрального подхода и нанодиагностики природных сред.

Солнечное излучение – один из неотъемлемых факторов жизнеобеспечения человека, животного и растительного мира на Земле, а также одна из определяющих компонент земной экосистемы и биосферы, для поведения которых характерно взаимодействие отдельных компонент с проявлением синергизма (обратных связей, которые иногда приводят к взаимосуилению различных процессов).

Поле солнечного излучения влияет на механизмы изменчивости (динамические процессы: циркуляция, конвекция, турбулентный перенос; радиационные и фотохимические процессы) геофизического, метеорологического, климатического состояния Земли, которые обладают сложными нелинейными связями, затрудняющими предсказание возможных эффектов, оценку их величины и значимости.

В связи с ростом риска естественно-природных и техногенных аварий, проведением военных операций и возможных крупномасштабных террористических актов экологическая и технологическая безопасность переходят в разряд стратегических и важнейших социально-экономических факторов, а математические модели становятся эффективным инструментом повышения качества и оперативности экологического прогнозирования и выявления, в упреждающем режиме, предпосылок экологических катастроф на основе компьютерного моделирования «сценариев» и дают значительный социально-экономический эффект за счет предупреждения и своевременного принятия мер по снижению их отрицательных последствий.

Гигантский научно-технический прогресс и беспрецедентный рост влияния человека на природу в XX веке ещё в 70-е - 90-е годы привели ученых всего мира, занимающихся анализом нарастающих антропогенных и естественно-природных воздействий на окружающую среду, к выводу: всемирная система мониторинга и иерархия моделей – главные инструменты изучения и предсказуемости изменений природных процессов и разделения естественных и антропогенных воздействий на сложнейшую динамическую систему, какой является планета Земля.

В теоретических и прикладных исследованиях внедрился термин «Глобальная система», введенный академиком Никитой Николаевичем Моисеевым (23.08.1917-29.02.2000) [17]: необходимы анализ и синтез знаний о развитии планетарной цивилизации. Особую значимость приобретает проблема адекватной оценки роли и веса моделируемых подсистем в долгосрочной эволюции всей «Глобальной системы», в том числе связанных с радиационным полем Земли, объединяющим климат и экологию. Построение радиационной модели Земли как планеты и среды обитания человечества оказывается

чрезвычайно важным для решения сложных прикладных и технических проблем, связанных с развитием методов и средств космического землеведения, космических систем землеобзора и т.д.

Для количественных оценок значимости разных климатообразующих факторов, зависящих от солнечного и собственного излучения, ввели специальную характеристику КСЗ – *радиационное воздействие (форсинг)* [18]. По экспертным оценкам последнего времени 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 **радиационно-активных факторов**:

- альbedo и отражающие характеристики земной поверхности;
- облачность;
- океаны и моря;
- снежный и ледовый покров;
- загрязнения и газовый состав атмосферы;
- загрязнения и аэрозольный состав 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.

Электромагнитное излучение, регистрируемое разными средствами, является основным источником информации о строении и физических свойствах планетных атмосфер, поверхностей, биосферы при дистанционном зондировании. В активных системах в качестве источника инсоляции могут использоваться лазерный или прожекторный луч.

Для пассивных систем наблюдений источниками излучения являются:

- внешний солнечный поток коротковолнового диапазона спектра (ультрафиолетовый, видимый, ближний инфракрасный);
- собственное излучение планеты длинноволнового диапазона спектра (инфракрасный, миллиметровый), когда применимо квазиоптическое приближение теории переноса излучения.

Сложность космических исследований и реализации новых космических проектов обусловлена тем, что приходится иметь дело с «замкнутым кругом» (для его преодоления начало космической эры стимулировало работы по прямым и обратным задачам теории переноса излучения):

- (а) чтобы измерить характеристики радиационного поля, нужны предварительные оценочные расчеты этих характеристик на основе моделей

теории переноса излучения с учетом многократного рассеяния и поглощения солнечного и собственного излучения,

(б) чтобы смоделировать перенос излучения в КСЗ, нужны данные об «оптической погоде»: о пространственных и спектральных распределениях оптико-геофизических и оптико-метеорологических параметров, описывающих взаимодействие излучения с компонентами КСЗ.

В зависимости от длины волны и особенностей взаимодействия с веществом весь спектр электромагнитных волн делится на основные диапазоны:

- радиоволны,
- микроволновое излучение,
- инфракрасное излучение,
- видимый свет,
- ультрафиолетовое излучение,
- рентгеновское излучение,
- жесткое гамма-излучение.

Электромагнитное излучение и частицы способны распространяться практически во всех средах и в соответствии с приложениями могут описываться разными математическими моделями:

- уравнения Максвелла,
- уравнение Гельмгольца,
- уравнение Ландау,
- уравнение Власова,
- уравнение Лиувилля,
- уравнение Шредингера,
- уравнение Фоккера-Планка,
- уравнение Чепмена-Колмогорова-Смолуховского,
- уравнение диффузии и квазидиффузии,
- уравнения Боголюбова,
- интегральное уравнение переноса,
- кинетическое уравнение Больцмана и их приближения.

Сложность задачи заключается в непрерывной динамической изменчивости и многопараметричности модели среды, большом разнообразии процессов трансформации энергии Солнца и собственного излучения Земли, вариантов визирования и способов измерений. Приходится иметь дело с краевыми задачами для интегро-дифференциального кинетического уравнения, описывающего перенос излучения в рассеивающих, поглощающих, излучающих, преломляющих, поляризующих средах с 1D, 2D, 3D плоской или сферической геометрией [20-21]. Теория переноса позволяет изучать влияние различных факторов на прохождение излучения и получать связи конкретных параметров среды с характеристиками радиационного поля.

Таким образом можно определить чувствительность спектральной яркости, угловой и пространственной структуры поля радиации,

пространственного распределения плотности и потоков излучения при заданных условиях освещения и наблюдения к вариациям этих параметров. Учитывая масштабность, многопараметричность, многовариантность земных условий, а также размерность фазового объема задач (от 2 до 7 переменных) несомненно требуется широкое использование информационных технологий и суперкомпьютеров, освоение которых авторы начали в 1989 году. Руководитель проекта Т.А. Сушкевич начинала свою научную деятельность в Институте Келдыша в 1961 г. с ЭВМ «Стрела», а далее первыми осваивали практически все поколения компьютеров.

В России создан масштабный научный потенциал методов решения скалярных и векторных краевых задач для кинетических уравнений в приближении Больцмана с бинарными взаимодействиями фотонов с веществом среды: аналитических (быстрых методов типа диффузии, квазидиффузии, двухпоточное приближение, метод Соболева, метод средних потоков и т.п.) численных методов, в том числе сеточные конечно-разностные методы, метод сферических гармоник, метод сложения и удвоения слоев, метод характеристик с итерациями по кратности рассеяния и их модификации с ускоряющими процедурами, метод функций влияния, метод пространственно-частотных характеристик, передаточные операторы для линейных и нелинейных систем, матричные и тензорные методы, методы декомпозиции и факторизации, гибридные методы, алгоритмы метода Монте-Карло и статистического моделирования на основе скалярных и векторных интегральных уравнений.

Для космических проектов и космических наблюдений с первых шагов освоения космического пространства необходимо было разрабатывать методологию решения двух основных классов многомерных задач теории переноса излучения, которые приоритетны и в настоящее время:

- прежде всего для сферической оболочки (сферическая Земля с атмосферой),
- позже для 3D плоского слоя (атмосфера над земной поверхностью), с двумя типами источников:
 - внешним параллельным потоком солнечного (коротковолнового) излучения,
 - собственным (длинноволновым, инфракрасным) излучением [19-21].

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. И сейчас, когда в России объявлены приоритеты «модернизации» и прорывные направления, среди которых «Информационно-телекоммуникационные системы», в том числе «супервычисления» и «Грид-системы», а также «Экология», «Климат», «Дистанционное зондирование и мониторинг территории России»,

«Рациональное природопользование» (в частности, влияние на экологическую и климатическую систему последствий естественно-природных и техногенных катастроф, в том числе полетов самолетов и ракет, бомбовых атак и военных батальей), НЕОБХОДИМО консолидироваться и вновь занять ведущие позиции в компьютерном моделировании радиационных задач ДЗЗ 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!). Однако, консолидация затруднена из-за «рынка» и «санкций»...

3. Сферическая модель и передаточный оператор

Нас интересует проблема исследования и расчета глобального радиационного поля Земли в масштабах всей планеты (одновременно при всех условиях освещения, горизонт, сумерки, область сумерек и тени, полярные регионы Арктики и Антарктиды и т.д.) для фиксированных длин волн спектра и заданных моделей «оптической погоды», описывающих коэффициенты, источники и граничные условия кинетического уравнения переноса излучения. В этой публикации ограничиваемся учетом океана как поглощающей, отражающей и излучающей подстилающей поверхности. В развиваемой теории передаточного оператора построены сферические модели переноса излучения с учетом вклада океана и слоистой облачности, но это тема другой публикации.

Рассматривается общая краевая задача (ОКЗ) для кинетического уравнения переноса излучения в сферической системе атмосфера-Земля (САЗ), 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) [21]

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

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 по пространству

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

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 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 [20, 21]. Решение ПКЗ

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

можно записать в форме линейного функционала – «интеграла суперпозиции»

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

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»

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

с ядром – функцией влияния

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

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

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

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)

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

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

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

которую называют функцией пропускания, отягощенной многократным рассеянием, и определяется как решение одномерной сферической ПКЗ со сферической симметрией (Модель 4)

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

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

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

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

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

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

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

определяется 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).

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.

4. О супервычислениях и параллельных алгоритмах

В настоящей работе речь идет об информационно-математическом аспекте изучаемой проблемы и перспективах использования супервычислений, основы которых заложены в работах авторов статьи и участников проекта под руководством Т.А. Сушкевич [19-37]. При дистанционном зондировании и мониторинге технических объектов и природной среды носителем информации об их состоянии и свойствах является электромагнитное излучение в диапазоне спектра от ультрафиолета до миллиметровых волн, регистрируемое различными средствами. Представляют актуальность перспективные гиперспектральные системы нанодиагностики природной и техногенной среды

на основе данных аэрокосмического дистанционного зондирования атмосферы и поверхности планеты (окружающей среды и объектов техносферы).

Для решения таких проблем разрабатывается информационно-математическое обеспечение для супервычислений на суперкомпьютерах, включающее прямые и обратные задачи теории переноса излучения, модели которых основаны на передаточном операторе [20, 21]. Однако, 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 параметрам пространственно-частотных характеристик; по компонентам векторных 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.

Основные составные части информационно-математического обеспечения:

- банки данных по оптико-метеорологическим моделям КСЗ;
- базы гиперспектральных характеристик рассеяния и поглощения компонентов атмосферы, океана, природных сред;

- система автоматизированного расчета спектро-энергетических и других радиационных характеристик атмосферы и Земли в различных диапазонах спектра от УФ до ММВ;
- банки данных радиационных характеристик;
- пакеты программ обработки, визуализации и диагностики результатов численного эксперимента и аэрокосмических данных.

5. Заключение

29 июля 2018 г., когда уже началась подготовка настоящей публикации, НАСА на сайте опубликовало информацию [38] о новых системах глобального наблюдения за динамикой Земли. Авторы статьи независимо развивают идею о глобальных моделях радиационного поля Земли, начиная с работ по «Лунной программе», и в апреле 2018 г. издали публикацию [39], подтверждающую приоритет тематики исследований. С 2004 года более 50 стран участвуют в международном проекте GEOSS – Глобальная Система Наблюдений Земли (ГСНЗ). В повестке дня современной цивилизации ведущее место занимают проблемы экологии и климата. Эти фундаментальные международные проекты почти такого же масштаба, как проект освоения и покорения космоса, и для их реализации чрезвычайно важно использовать приобретенный опыт и в теории и в практике при создании комплексных систем ПРО и ПВО, включая системы оперативного «землеобзора» и глобального мониторинга, принятия решения и управления с использованием суперкомпьютеров, информационных технологий и технологий Интернет, ГРИД, «облачных», ГЛОНАСС и т.п.

Работа проводится под руководством Института Келдыша совместно с Институтом оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Институтом вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Институтом физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Центральной аэрологической обсерваторией, Московским физико-техническим институтом, МГУ имени М.В. Ломоносова, Новосибирским и Томским университетами. Авторы выражают благодарность участникам проекта В.В. Белову, А.В. Зимовой, В.В. Козодерову, С.М. Пригарину, В.А. Фалалеевой, Л.Д. Краснокутской, Б.А. Фомину, Г.Э. Колокутину, А.С. Кузьмичеву, А.А. Николенко, П.В. Страхову, Б.М. Шурыгину.

Список литературы

1. Кондратьев К.Я. Радиационные факторы современных изменений глобального климата. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 280 с.
2. Кондратьев К.Я. Спутниковая климатология. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 65 с.
3. Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера. М.: Наука, 1989. 261 с.
4. Келдыш М.В. Творческий портрет по воспоминаниям современников. М.: Наука, 2001. 416 с. (при поддержке РФФИ)

5. 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. <http://jr.rse.cosmos.ru/article.aspx?id=819>

6. 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. <http://jr.rse.cosmos.ru/article.aspx?id=930>

7. Мстислав Келдыш // «Великие умы России» под ред. В.С. Губарева. Выпуск 2. М.: Издательский дом «Комсомольская правда», 2016. 96 с.

8. Попов Ю.П. 50-летие Института прикладной математики имени М.В. Келдыша. 2003. http://www.keldysh.ru/grants/rffi//50_years/; ИПМ имени М.В. Келдыша РАН <http://keldysh.ru>

9. Прикладная небесная механика и управление движением. Сборник статей, посвященный 90-летию со дня рождения Д.Е. Охоцимского / Составители: Т.М. Энеев, М.Ю. Овчинников, А.Р. Голиков. — М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2010. 368 с. <http://keldysh.ru/memory/okhotsimsky/index.htm>

10. 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. 573-580. <https://elibrary.ru/item.asp?id=21946245>

11. Сушкевич Т.А. О пионерских работах по математическому моделированию радиационного поля Земли при освоении космоса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 1, В. 5. С. 165-180. <http://jr.rse.cosmos.ru/article.aspx?id=393>

12. Тихонов А.Н. Собрание научных трудов: в 10 т. (Классики науки) / Редактор-составитель Т.А. Сушкевич. Т. 3: Обратные и некорректные задачи / Редакторы-составители. Т.А. Сушкевич, А.М. Денисов. М.: Наука, 2009. 630 с. (при поддержке РФФИ)

13. Кузнецов Е.С. Избранные научные труды (в связи со 100-летием со дня рождения) / Отв. редактор и составитель Т.А. Сушкевич. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 784 с. (при поддержке РФФИ)

14. Чандрасекар С. Перенос лучистой энергии / Пер. с англ. издания Oxford, 1950, под ред. Е.С. Кузнецова. М.: Изд-во иностранной литературы, 1953. 432 с.

15. Коптюг В.А. Конференция ООН по окружающей среде и развитию (Рио-де-Жанейро, июнь 1992 года). Информационный отчет. Новосибирск: Российская академия наук Сибирское отделение, 1992. 79 с. www.prometeus.nsc.ru/unrio92.pdf

16. Парижское соглашение согласно Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата («Парижское соглашение»). ООН. 2016. 19 с. ([paris_agreement_russian_.pdf](#))

17. 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) Эл. книга http://www.ccas.ru/manbios/kak_daleko_r.html

18. 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. http://global-climate-change.ru/download/CLIMATE_publication_GGO.pdf

19. Сушкевич Т.А. Осесимметричная задача о распространении излучения в сферической системе // Отчет № 0-572-66. М.: ИПМ АН СССР, 1966. 180 с.

20. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Иолтуховский А.А. Метод характеристик в задачах атмосферной оптики. М.: Наука, 1990. 296 с.

21. Сушкевич Т.А. Математические модели переноса излучения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. 661 с. (при поддержке РФФИ)

22. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Владимирова Е.В., Волкович А.Н., Игнатьева Е.И., Козодеров В.В., Куликов А.К., Максакова С.В., Мельникова И.Н., Фомин Б.А. Радиационный фактор изменений климата и аэрокосмического мониторинга природной среды // Тезисы докладов на Всемирной конференции по изменению климата. М.: Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, 2003. С. 443.

23. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Козодеров В.В., Гаврилович А.Б., Максакова С.В., Фомин Б.А. Информационно-математический аспект аэрокосмического гиперспектрального мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 2, В. 6. С. 552-559. <http://jr.rse.cosmos.ru/article.aspx?id=663>

24. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В. Глобальное радиационное поле Земли, радиационный форсинг и супервычисления // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7, №. 4. С. 165-175. <http://jr.rse.cosmos.ru/article.aspx?id=798>

25. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В., Козодеров В.В., Фомин Б.А. Нанодиагностика природной и техногенной среды и супервычисления // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7, №. 4. С. 176-186. <http://jr.rse.cosmos.ru/article.aspx?id=799>

26. Сушкевич Т.А., Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Стрелков С.А., Дмитриев Е.В., Максакова С.В. Параллельные вычисления в задачах космического экологического мониторинга и гиперспектрального дистанционного зондирования Земли // Труды Международной суперкомпьютерной конференции «Научный сервис в сети Интернет: поиск новых решений», г. Новороссийск, 17-22 сентября 2012 года. М.: Издательство МГУ им. М.В. Ломоносова, 2012. С. 320-324.

<http://agora.guru.ru/abrau2012/pdf/320.pdf>

27. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В. Теоретические основы и расчетные модели для супервычислений в проблемах мониторинга экосистемы, биосферы и климата Земли, возникновения и развития аварий и природных катастроф на основе аэрокосмического дистанционного зондирования // Труды Международной суперкомпьютерной конференции «Научный сервис в сети Интернет: все грани параллелизма», г. Новороссийск, 23-28 сентября 2013 года. М.: Издательство МГУ им. М.В. Ломоносова, 2013. С. 438-442. <http://agora.guru.ru/abrau2013/pdf/438.pdf>

28. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В. О глобальной модели радиационного форсинга на климат и дистанционное зондирование Земли // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 09. С. 725–732. <https://elibrary.ru/item.asp?id=26529236>

29. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В. «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) // Суперкомпьютерные дни в России: Труды международной конференции, 26-27 сентября 2016 г., Москва. М.: Издательство МГУ им. М.В. Ломоносова, 2016. С. 473-478. <https://elibrary.ru/item.asp?id=27206411>

30. Sushkevich T.A., Strelkov S.A., Maksakova S.V. The features of modeling of radiation forcing on the climate in the Arctic region // Proceedings SPIE – The International Society for Optical Engineering. V. 10035, 29 November 2016. 22rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 10435Z; Bellingham WA 98227-0010 USA. doi:10.1117/12.2248770; <http://dx.doi.org/10.1117/12.2248770>

31. Sushkevich T.A., Strelkov S.A., Maksakova S.V. Features of hyperspectral approach in remote sensing in the region of the Arctic // Proceedings SPIE – The International Society for Optical Engineering. V. 10035, 29 November 2016. 22rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 100351W; Bellingham WA 98227-0010 USA. doi:10.1117/12.2249155; <http://dx.doi.org/10.1117/12.2249155>

32. Sushkevich T.A. The history of a global spherical model of the solar radiation transfer in the Earth's atmosphere // Proceedings SPIE – The International Society for Optical Engineering. V. 10035, 29 November 2016. 22rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 100350; Bellingham WA 98227-0010 USA. doi:10.1117/12.2248534; <http://dx.doi.org/10.1117/12.2248534>

33. Sushkevich T.A. The beginning of the space age: information and mathematical aspect. To the 60-th anniversary of the launch of the first sputnik // Proceedings SPIE – The International Society for Optical Engineering. V. 10466, 30 November 2017. 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics:

Atmospheric Physics, 104666E; Bellingham WA 98227-0010 USA. doi: 10.1117/12.2287687; <http://dx.doi.org/10.1117/12.2287687>

34. Sushkevich T.A., Strelkov S.A., Maksakova S.V. On the division of contribution of the atmosphere and ocean in the radiation of the Earth for the tasks of remote sensing and climate // Proceedings SPIE – The International Society for Optical Engineering. V. 10466, 30 November 2017. 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 104666G; Bellingham WA 98227-0010 USA. doi: 10.1117/12.2287701; <http://dx.doi.org/10.1117/12.2287701>

35. Strelkov S.A., Sushkevich T.A., Maksakova S.V. Deterministic and stochastic methods of calculation of polarization characteristics of radiation in natural environment // Proceedings SPIE – The International Society for Optical Engineering. V. 10466, 30 November 2017. 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 104666D; Bellingham WA 98227-0010 USA. doi: 10.1117/12.2287684; <http://dx.doi.org/10.1117/12.2287684>

36. Сушкевич Т.А. Радиационный форсинг на климат и экологию (посвящается 100-летию академика Н.Н.Моисеева и 60-летию запуска первого спутника) // Моделирование коэволюции природы и общества: проблемы и опыт. Труды Всероссийской научной конференции, Москва, 7-10 ноября 2017. / Отв. редактор И.Г.Поспелов. М.: ФИЦ ИУ РАН, 2017. С. 365-375. <http://www.ccas.ru/mmes/moiseev100/Moiseev100proceedings.pdf>

37. Сушкевич Т.А К 55-летию открытия стратосферных аэрозольных слоев из космоса: вулканы и проблемы климата (Посвящается 65-летию ИПМ имени М.В.Келдыша и его достижениям в пилотируемой космонавтике) // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2018. № 125. 32 с. doi:10.20948/prepr-2018-125, http://keldysh.ru/papers/2018/prep2018_125.pdf

38. NASA uses Earth as laboratory to study distant worlds. June 29, 2018 by Calla Cofield, NASA. <https://phys.org/news/2018-06-nasa-earth-laboratory-distant-worlds.html#jCp>

39. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В. Альbedo планеты как индикатор эволюции климата Земли (65-летию ИПМ имени М.В.Келдыша и достижениям «Лунной программы» посвящается) // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. № 88. 28 с. doi:10.20948/prepr-2018-88, http://keldysh.ru/papers/2018/prep2018_88.pdf

Оглавление

1. Введение.....	3
2. Радиационное поле Земли и радиационный форсинг.....	4
3. Сферическая модель и передаточный оператор.....	10
4. О супервычислениях и параллельных алгоритмах.....	14
5. Заключение.....	16
Список литературы.....	16