

**КОСМОС, ЗЕМЛЯ И СУПЕРКОМПЬЮТИНГ:  
СОПРЯЖЕННЫЕ ЗАДАЧИ ЭКОЛОГИИ, КЛИМАТА,  
МОНИТОРИНГА И ДИСТАНЦИОННОГО  
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ, ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫЙ  
ПОДХОД И НАНОДИАГНОСТИКА ПРИРОДНЫХ СРЕД  
(посвящается 65-летию ИПМ им. М.В. Келдыша РАН)\***

© 2018 Т.А. Сушкевич, С.А. Стрелков, С.В. Максакова

*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук  
(125047 Москва, Миусская пл., 4)*

*E-mail: tamaras@keldysh.ru, strelka@mail.ru, svmmr@yandex.ru*

Поступила в редакцию: 11.09.2018

Сложнейшие задачи эволюции, климата, экологии, глобального мониторинга и дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с гиперспектральными подходами и нанодиагностикой природной среды и объектов впервые предлагается рассматривать как сопряженные. Электромагнитное излучение — единое физическое поле, объединяющее радиационное поле Земли с радиационно-активными компонентами. Например, извержение вулканов и трансграничный перенос загрязнений, которые влияют на экологию и состояние окружающей среды, могут быть обнаружены методами ДЗЗ, а далее через перенос лучистой энергии, зависящей от загрязнителей природных сред, может влиять на климат и в конечном итоге на тренд эволюции Земли как планеты. Непреодолима сложность проблемы состоит в том, что для исследований планеты не допустимы натуральные эксперименты и возможны только мониторинг и наблюдения разными средствами, с одной стороны, а с другой стороны на момент измерений радиации невозможно восстановить весь набор оптико-геофизических и оптико-метеорологических параметров системы «атмосфера-суша-океан», от которых зависит радиация, и не возможно повторить условия наблюдений, так как среда непрерывно изменяется и никогда не повторяется. И только математическое моделирование «больших» прямых и обратных задач теории переноса излучения с параллельным суперкомпьютерингом позволяет провести теоретико-расчетные исследования столь сложных проблем и получить качественные и количественные оценки для анализа и прогнозов, а также для разных тематических приложений на основе «сценариев».

*Ключевые слова: сопряженные задачи, радиационное поле Земли, дистанционное зондирование, климат, экология, супервычисления.*

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В. Космос, Земля и суперкомпьютеринг: сопряженные задачи экологии, климата, мониторинга и дистанционного зондирования Земли, гиперспектральный подход и нанодиагностика природных сред (посвящается 65-летию ИПМ им. М.В. Келдыша РАН) // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2018. Т. 7, № 4. С. 5–29. DOI: 10.14529/cmse180401.

### Введение

Важнейшая для всего человечества ГЛОБАЛЬНАЯ программа «Повестки XXI века» — это всемирная программа «Будущее Земли», фундаментальные основы для реа-

---

\*Статья рекомендована к публикации программным комитетом Международной конференции «Суперкомпьютерные дни в России — 2018».

лизации которой были заложены в XX веке благодаря изобретению компьютера и выхода человека в космос.

14 февраля 1954 года, в кабинете М.В. Келдыша (с 1981 года Мемориальный музей-кабинет академика М.В. Келдыша РАН) состоялось ПЕРВОЕ совещание [1, 2], 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 году. По указанию М.В. Келдыша в 1955 году 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?»** Это было время энтузиастов и мечтателей. Мнений и предложений поступило 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 году началось строительство космодрома «Байконур» и были созданы Министерство общего машиностроения и другие ведомства.

Подтверждается стратегический выбор, сделанный Главным Теоретиком Космонавтики академиком М.В. Келдышем в 1955 году и актуальный в XX и XXI веках. 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) [3–8]. 24 июня 2018 г. исполнилось 40 лет как скончался этот русский гений, масштабы интеллектуальной, научной и организационной деятельности которого потрясают воображение. **Статья посвящается памяти русского гения М.В. Келдыша** — «Великого ума России» — «Ломоносова XX века» [9], заложившего фундаментальные основы цивилизации и постиндустриального информационного общества XXI века, а также «цифровой экономики» и современных глобальных проблем по спасению планеты Земля. Это был лучший Президент Академии Наук, который в 1964 году спас Академию Наук СССР от волюнтаризма Н.С. Хрущева, угрожавшего на июльском Пленуме ЦК КПСС «разогнать академию наук...» [10], и при котором Академия Наук стала форпостом СССР в мире, существенно расширилось международное сотрудничество в науке, сложились ведущие в мире научные школы, советские ученые получали Нобелевские и Ленинские премии.

Двадцатый век в истории земной цивилизации — это век научно-технической революции (НТР), определенной тремя великими открытиями, и с ними связано имя М.В. Келдыша — единственного математика трижды Героя Социалистического Труда, который участвовал в руководстве тремя важнейшими стратегическими проектами и причастен к этим трем открытиям: 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 и создание «Ракетно-ядерного щита», до сих пор обеспечивающего безопасность страны.

С 1947 года М.В. Келдыш в СССР отвечал за создание математических ЭВМ [11–16], без которых не было бы успехов ни в атомном, ни в космическом проектах.

Статья посвящается **65-летнему юбилею ПЕРВОГО** в мировой науке и мировой практике **Института прикладной математики** [17], который до 1966 года работал в закрытом режиме и до нынешнего времени известен как «Институт Келдыша» — его создателя и первого директора (1953–1978). Институт создан в соответствии с распоряжением Совета Министров СССР от 18 апреля 1953 года № 611-рс и распоряжением Президиума Академии наук СССР от 27 апреля 1953 года № 0012002 как Отделение прикладной математики Математического института им. В.А. Стеклова Академии наук СССР (ОПМ МИАН СССР). В соответствии с постановлением Президиума Академии наук СССР от 8 июля 1966 года № 465-010 ОПМ МИАН СССР преобразовано в Институт прикладной математики Академии наук СССР. Ныне это Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук».

ВПЕРВЫЕ был основан академический Институт для выполнения государственной стратегической задачи создания «Ракетно-ядерного щита», в котором под руководством М.В. Келдыша и А.Н. Тихонова собрался уникальный коллектив специалистов для решения сложных математических проблем, связанных с государственными программами исследования космического пространства, развития атомной и термоядерной энергетики на основе создания и широкого использования вычислительной техники и программного обеспечения. Потребовались новые методы научных исследований и инженерно-проектных работ, прежде всего эффективный математический расчет. Их рождение и использование коренным образом изменили общенаучное и инновационное значение вычислительной математики и математического моделирования, на основе которых создан фундамент современных «Computer Sciences». В 1950 году коллектив лаборатории С.А. Лебедева в Киеве создал МЭСМ — это ПЕРВАЯ ЭВМ в СССР [18]. В 1953 году в СССР было организовано промышленное производство ЭВМ и ПЕРВАЯ серийная ЭВМ «Стрела» была установлена в Институте Келдыша, а далее коллектив обычно первым осваивал все поколения вычислительной техники и участвовал в развитии новых информационных технологий.

В ноябре 1955 года из АН СССР в ЦК КПСС и Совет Министров было направлено письмо с «Программой космических исследований». Так родилось новое научно-практическое направление REMOTE SENSING — дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) 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 4 октября 1957 года — 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 12 апреля 1961 года — это «ПОДАРОК» к 50-летию академика АН

СССР М.В. Келдыша — ГЛАВНОГО ТЕОРЕТИКА КОСМОНАВТИКИ. Этот день на Генеральной Ассамблее ООН 07.04.2011 признан как «Международный день полета человека в космос» [19].

## 1. Краткий обзор

Огромный научный потенциал, созданный отечественными учеными, позволяет ставить такие амбициозные задачи, лежащие в основе программы «Будущее Земли». О международном характере таких проблем свидетельствуют самые большие саммиты руководителей большинства стран, входящих в ООН [20, 21]. Участники проекта последовательно шли к постановкам и решению таких глобальных проблем [22–37].

В июне 1954 года прошел успешный запуск ПЕРВОЙ в мире атомной станции в г. Обнинске, расчетами которой под общим руководством Игоря Васильевича Курчатова (12.01.1903–07.02.1960) руководил Евграф Сергеевич Кузнецов (13.03.1901–17.02.1966) — основатель математического отдела в ФЭИ. В 1955 году в Институте Келдыша профессор МГУ имени М.В. Ломоносова ПЕРВЫЙ советский модельер-вычислитель задач теории переноса Е.С. Кузнецов [38] создал уникальный и единственный в мире отдел «Кинетические уравнения». В этом отделе проводились фундаментальные теоретические и прикладные 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, климате, космических проектах, астрофизике и т.д. В США и Англии его конкурентом был С. Чандрасекар, который написал первую в мировой науке монографию по переносу лучистой энергии, а Е.С. Кузнецов, первые работы которого по климату вышли в 1925–1927 годах, был редактором издания монографии на русском языке [39]. Состояние отечественного научного потенциала отражено в книге Ж. Ленобль [40], подготовленной на основе материалов Международной Комиссии по радиации. Очевидны ведущие позиции советских ученых по всем разделам теории и практики приложений теории переноса излучения.

После подписания «Парижского соглашения по климату» [21] в 2016 году 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 и мониторинг «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; 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. Это фундаментальные междисциплинарные исследования в высокотехнологичной области аэрокосмического дистанционного зондирования Земли и объектов природно-техногенной сферы, объединяющие теоретическую и прикладную математику, вычислительную математику и математическое моделирование, теорию информатики и инфор-

мационные технологии, физику взаимодействия излучения с веществом и молекулярную спектроскопию, науки о Земле и биосфере и нанотехнологии. Теоретические фундаментальные результаты и создаваемые информационно-математическое обеспечение и информационные технологии апробируются на новейших отечественных разработках аппаратуры и средств для гиперспектральных аэрокосмических наблюдений. Это новое научное, технологическое и техническое направление в развитии современного ДЗЗ с широкой сферой приложений в разных областях знаний.

Современная экология — сложнейшая, разветвленная междисциплинарная наука, четкие границы которой не определяются строго, поскольку в последние десятилетия эта наука активно развивается и принимает новые очертания и содержание. В 70-е годы XX века американский биолог и эколог Барри Коммонер (28.05.1917–30.09.2012) в книге «Замыкающийся круг» [41] сформулировал **четыре основных закона современной экологии**, отражающие суть субъектов и объектов исследования и динамические процессы происходящего с присутим им синергетическим характером:

*Первый закон. Все связано со всем.* Это закон об экосистемах и биосфере, обращающий внимание на всеобщую связь процессов и явлений в природе. Он призван предостеречь человека от необдуманного воздействия на отдельные части экосистем, что может привести к непредвиденным последствиям (например, осушение болот приводит к обмелению рек).

*Второй закон. Все должно куда-то деваться.* Это закон о хозяйственной деятельности человека, отходы от которых неизбежны, и потому необходимо думать, как об уменьшении их количества, так и о последующем их использовании.

*Третий закон. Природа «знает» лучше.* Закон имеет двойной смысл — одновременно призыв сблизиться с природой и призыв крайне осторожно обращаться с природными системами. Это закон разумного, сознательного природопользования. Нельзя забывать, что человек — тоже биологический вид, что он — часть природы, а не ее властелин. Это означает, что нельзя пытаться покорить природу, а нужно сотрудничать с ней. Пока мы не имеем полной информации о механизмах и функциях природы, а без точного знания последствий преобразования природы недопустимы никакие ее «улучшения».

*Четвертый закон. Ничто не дается даром* (в оригинале что-то вроде «Бесплатных обедов не бывает»). Это закон рационального природопользования. «...Глобальная экосистема представляет собой единое целое, в рамках которого ничего не может быть выиграно или потеряно и которая не может являться объектом всеобщего улучшения». Платить нужно энергией за дополнительную очистку отходов, удобрением — за повышение урожая, санаториями и лекарствами — за ухудшение здоровья человека...

Второй и четвертый законы по сути являются перефразировкой основного закона физики — сохранения вещества и энергии. Первый и третий законы — действительно основополагающие законы экологии, на которых должна строиться парадигма данной науки. Основным законом является первый, который может считаться основой экологической философии и системного научного исследования.

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 ино-

гда 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, проведения 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 еще в 70–90-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**»: необходимы анализ и синтез знаний о развитии планетарной цивилизации. Термин введен академиком Никитой Николаевичем Моисеевым (23.08.1917–29.02.2000) [42]. 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 земледования, космических систем землеобзора и т.д.

Электромагнитное излучение, регистрируемое разными средствами, является основным источником информации о строении и физических свойствах планетных атмосфер, поверхностей, биосферы при дистанционном зондировании. Для пассивных систем наблюдений источниками излучения являются внешний солнечный поток коротковолнового диапазона спектра (ультрафиолетовый, видимый, ближний инфракрасный) и собственное излучение планеты длинноволнового диапазона спектра (инфракрасный, миллиметровый), когда применимо квазиоптическое приближение теории переноса излучения. В активных системах в качестве источника инсоляции могут использоваться лазерный или прожекторный луч.

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 тео-

рии переноса излучения с учетом многократного рассеяния и поглощения солнечного и собственного излучения, (б) чтобы смоделировать перенос излучения в КСЗ, нужны данные об «оптической погоде» — пространственных и спектральных распределениях оптико-геофизических и оптико-метеорологических параметров природных сред, 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, такими как 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, вариантов визирования и способов измерений. Приходится иметь дело с краевыми задачами для интегро-дифференциального кинетического уравнения Больцмана, описывающего перенос излучения в рассеивающих, поглощающих, излучающих, преломляющих, поляризующих средах с 1D, 2D, 3D плоской или сферической пространственной геометрией [23, 24]. 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 коллектива Т.А. Сушкевич (начинала моделирование на ЭВМ «Стрела») — ПЕРВЫЙ специалист в СССР, которая создала ПЕРВУЮ БОЛЬШУЮ программу и построила ПЕРВЫЙ ГРАФИК на ПЕРВОЙ БОЛЬШОЙ ЭВМ «Весна» (1963–1964 гг.) [43].

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, двухпотокное 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, алгорит-

мы метода Монте-Карло и статистического моделирования на основе скалярных и векторных интегральных уравнений [44].

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: прежде всего для сферической оболочки (сферическая Земля с атмосферой), а позже для 3D плоского слоя (атмосфера над земной поверхностью), с двумя типами источников: внешним параллельным потоком солнечного (коротковолнового) излучения, собственным (длинноволновым, инфракрасным) излучением [22–24, 26].

В настоящее время мировое научное сообщество располагает практически достаточными фундаментальными знаниями и научным потенциалом, чтобы, объединив совместные усилия, провести достоверные комплексные и системные исследования на основе «сценариев», реализуемых на суперкомпьютерах с привлечением данных длительных временных рядов космических наблюдений двойного назначения. Однако такого объединения ученых не происходит, поскольку «кто владеет космосом, тот владеет миром»...

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), НЕОБХОДИМО консолидироваться и вновь занять ведущие позиции в компьютерном моделировании радиационных задач дистанционного зондирования Земли и других планет, радиационного баланса Земли, радиационного форсинга и радиационных блоков в моделях климата и прогноза (где до сих пор используются упрощенные плоские приближения для расчета переноса солнечного излучения!).

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

## 2. Постановка задачи

При дистанционном зондировании и мониторинге технических объектов и окружающей 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 [23, 24]. Даже на современных высокопроизводительных вычислительных системах стоят проблемы скорости вычислений и оптимальной организации параллельных расчетов при больших размерностях разностной сетки, а также передачи больших массивов результатов расчета по сетям от суперкомпьютера к рабочей станции оператора для последующей обработки.

Три типа радиационных проблем требуют учета эффектов, связанных с поверхностью Земли. *Первый тип* — это проблемы энергетики, радиационного баланса Земли и радиационных блоков для моделей климата и прогноза погоды, когда Солнце играет роль источника излучения. Такие задачи обычно решаются для полной системы атмосфера-Земля без разделения вкладов атмосферной радиации и излучения земной поверхности. *Второй тип* — это задачи дистанционного зондирования атмосферы и облачности, когда подстилающая поверхность рассматривается как помеха и необходимо выделить вклад излучения земной поверхности. *Третий тип* — это задачи дистанционного зондирования поверхности или океана, когда необходимо выделить атмосферный фон (провести атмосферную коррекцию) или по крайней мере принять этот эффект влияния атмосферы во внимание.

Для количественных оценок значимости разных климатообразующих факторов, зависящих от солнечного и собственного излучения, ввели специальную характеристику КСЗ — *радиационное воздействие (форсинг)* [45]. По экспертным оценкам последнего времени от 40 % до 60 % воздействия 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, в первую очередь таких как 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.

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 ультрафиолета (УФ) до миллиметровых волн (ММВ), содержащем миллионы спектральных линий поглощения компонентами и загрязнениями атмосферы.

Приходится иметь дело с общими краевыми задачами для интегро-дифференциального кинетического уравнения, описывающего перенос излучения в рассеивающих, поглощающих, излучающих, преломляющих, поляризующих средах с 1D, 2D, 3D сферической или плоской геометрией по пространству и единичной сферой направлений распространения излучения в каждой точке пространства. Используется линеаризованное уравнение Больцмана в приближении бинарных столкновений, основанном на дуализме «волна-частица». Теория переноса позволяет изучать влияние различных факторов на прохождение излучения в КСЗ и получать связи конкретных параметров среды с характеристиками радиационного поля. В рамках развития вычислительных средств рассматриваются следующие модели переноса излучения:

I. Спектральная, пространственная и угловая структуры поля излучения — интенсивности собственного и светового поля (солнечного излучения) при известных условиях

освещения или инсоляции рассчитываются как решения общей краевой задачи для уравнения переноса.

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

### 3. Сферическая модель и передаточный оператор

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  $\lambda$ ) или квазимонохроматического (при фиксированной  $\lambda$  и интервале разрешения  $\Delta\lambda$ ) стационарного излучения  $\Phi_\lambda(\mathbf{r}, \mathbf{s})$  (индекс  $\lambda$  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 [24]

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

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

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

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 обобщенных решений и функционалов, линейно-системного подхода и интеграла «суперпозиции». Общая краевая задача (1) с операторами (2)–(5) линейная относительно источников и ее решение можно представить в виде суперпозиции:  $\Phi = \Phi_a + \Phi_q$ . Фоновое излучение атмосферы  $\Phi_a$  определяется как решение ПКЗ (6). Вклад излучения  $\Phi_q$ , 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 [23, 24]. 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»

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

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

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

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»

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

с ядром — функцией влияния

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

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

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

Для анизотропного и горизонтально однородного источника

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

с ядром линейного функционала

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

Функция влияния  $\Theta_r$  есть решение одномерной сферической ПКЗ с азимутальной зависимостью (Модель 3)

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

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

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

рассчитывается через функцию влияния

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

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

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 пространственной 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

Даже на современных высокопроизводительных вычислительных системах стоят проблемы скорости вычислений и оптимальной организации распараллеливания расчета при больших размерностях разностной сетки и большом разнообразии «оптической погоды» в разных диапазонах спектра длин волн излучения. 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.

Цель разработки обеспечить максимально возможную переносимость комплекса программ, который развивается по мере появления новых суперкомпьютеров со своими архитектурами, и обеспечить прозрачную работу в распределенной сетевой среде. Комплекс должен без значительных переделок работать на кластере рабочих станций (workstation clusters) и/или массиве параллельных процессоров (massively parallel processor (MPP) и др. с 1989 года). Реализация функции управления и сетевого взаимодействия «унаследованным» комплексом программ производится с помощью оболочек (wrappers), написанных на языке описания сценариев Perl. Другими словами, производится упаковка Fortran-программ внутрь модулей на языке Perl (Perl scripts).

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 векторов 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;
- программные системы расчета спектральных характеристик взаимодействия (рассеяние, поглощение) излучения с компонентами 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.

## Заключение

29 июля 2018 года, когда уже начались работы по проектам и подготовка настоящей публикации, НАСА на сайте опубликовало информацию [46] 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 года издали публикацию [36], подтверждающую приоритет тематики исследований. С 2004 года более 50 стран участвуют в международном проекте GEOSSE 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 прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН совместно с Институтом оптики атмосферы имени В.Е. Зуева СО РАН, Институтом вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Институтом физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН, Центральной аэрологической обсерваторией, Московским физико-техническим институтом, МГУ имени М.В. Ломоносова, Новосибирским национальным исследовательским государственным университетом, Национальным исследовательским Томским государственным университетом. Авторы выражают благодарность участникам проекта В.В. Белову, А.В. Зимовой, В.В. Козодерову, С.М. Пригарину, В.А. Фалалеевой, Б.А. Фомину, Г.Э. Колокутину, Л.Д. Краснокутской, А.С. Кузьмичеву, А.А. Николенко, П.В. Страхову, Б.М. Шурыгину.*

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 16-01-00145, 16-01-00107, 17-01-00220, 18-01-00609.*

## Литература

1. Энеев Т.М., Овчинников М.Ю., Голиков А.Р. Прикладная небесная механика и управление движением. Сборник статей, посвященный 90-летию со дня рождения Д.Е. Охоцимского. Труды ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2010. 368 с.
2. 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.
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. Информационная система «Архивы Российской академии наук» (ИСАРАН): Фонд М.В. Келдыша. 2017. URL: <http://arran.ru/> (дата обращения: 01.09.2018).
6. Келдыш М.В. Творческий портрет по воспоминаниям современников. М.: Наука, 2001. 416 с. (при поддержке РФФИ)
7. Президент Академии наук СССР М.В. Келдыш. 100 лет со дня рождения // Архивы Российской академии наук. 2011. URL: <http://www.arran.ru/?q=ru/node/571> (дата обращения 01.09.2018).
8. Сушкевич Т.А. Космические проекты: информационно-математический аспект и супервычисления (история и перспективы) // Вестник Южно-Уральского государственного университета Серия: Математическое моделирование и программирование). 2011. Вып. 8. № 17 (234). С. 4–19.
9. Губарев В.С. Великие умы России. Том 2. Мстислав Келдыш. М.: Издательский дом «Комсомольская правда», 2016. 96 с.
10. Афиани В.Ю., Илизаров С.С. «Мы разгоним ... Академию Наук» — заявил 11 июля 1964 года первый секретарь ЦК КПСС Н.С. Хрущев // Вестник истории естествознания и техники. 1999. № 1. С. 167–173.
11. Лебедев С.А., Келдыш М.В. Научный отчет по теме «Большие счетные математические машины». М., 1952. Архив РАН. Ф. 1939. Оп. 2.
12. Соболев С.Л., Китов А.И., Ляпунов А.А. Основные черты кибернетики // Вопросы философии. 1955. № 4. С. 137–148.
13. Келдыш М.В., Ляпунов А.А., Шура-Бура М.Р. Математические вопросы теории счетных машин // Вестник АН СССР. 1956. № 11. С. 16–37.
14. Езерова Г.Н., Луховицкая Э.С. К вопросу об истории информатики в России // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2012. № 49. 12 с. URL: [http://keldysh.ru/papers/2012/prep2012\\_49.pdf](http://keldysh.ru/papers/2012/prep2012_49.pdf) (дата обращения: 01.09.2018).
15. Луховицкая Э.С., Езерова Г.Н. Информатика в ИПМ им. М.В. Келдыша. 1960-е годы // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2013. № 29. 33 с. URL: [http://keldysh.ru/papers/2013/prep2013\\_29.pdf](http://keldysh.ru/papers/2013/prep2013_29.pdf) (дата обращения: 01.09.2018).

16. Афендикова Н.Г. О роли М.В. Келдыша в некоторые ключевые моменты становления отечественной вычислительной техники // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2017. № 58. 12 с. DOI: 10.20948/prepr-2017-58.
17. Попов Ю.П. 50-летие Института прикладной математики им. М.В. Келдыша. 2003. URL: [http://www.keldysh.ru/grants/rffi//50\\_years/](http://www.keldysh.ru/grants/rffi//50_years/) (дата обращения: 01.09.2018).
18. Сергей Алексеевич Лебедев. К 100-летию со дня рождения основоположника отечественной электронной вычислительной техники / Отв. ред. В.С. Бурцев. Составители: Ю.Н. Никольская, А.Н. Томилин, Ю.В. Никитин, Н.С. Лебедева. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 440 с.
19. Резолюция Генеральной Ассамблеи ООН от 07.04.2011 A/RES/65/271. Международный день полета человека в космос. URL: <https://undocs.org/ru/A/RES/65/271> (дата обращения: 01.09.2018).
20. 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. URL: <http://www.prometeus.nsc.ru/koptuyug/ideas/unrio92/unrio92.pdf> (дата обращения: 01.09.2018).
21. Парижское соглашение согласно Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата («Парижское соглашение»). ООН. 2016. 19 с.; URL: [https://unfccc.int/files/meetings/paris\\_nov\\_2015/application/pdf/paris\\_agreement\\_russian\\_.pdf](https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_russian_.pdf) (дата обращения: 01.09.2018).
22. Сушкевич Т.А. Осесимметричная задача о распространении излучения в сферической системе // Отчет № 0-572-66. М.: ИПМ АН СССР, 1966. 180 с.
23. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Иолтуховский А.А. Метод характеристик в задачах атмосферной оптики. М.: Наука, 1990. 296 с.
24. Сушкевич Т.А. Математические модели переноса излучения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. 661 с.
25. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Владимиров Е.В., Волкович А.Н., Игнатъева 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 Всемирной конференции по изменению климата. М.: Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, 2003. С. 443.
26. 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, № 5. С. 165–180.
27. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В. О перспективах аэрокосмического гиперспектрального дистанционного зондирования для нанодигностики опасных явлений // Известия вузов. Физика. 2009. № 2/2. С. 149–155.
28. 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, № 6. С. 552–559.
29. 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.

30. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В., Козодеров В.В., Фомин Б.А. Нано-диагностика природной и техногенной среды и супервычисления // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7, №. 4. С. 176–186.
31. 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 // Научный сервис в сети Интернет: поиск новых решений: Труды Международной суперкомпьютерной конференции (Новороссийск, 17–22 сентября 2012 г.). М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2012. С. 320–324.
32. 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 // Научный сервис в сети Интернет: все грани параллелизма: Труды Международной суперкомпьютерной конференции (Новороссийск, 23–28 сентября 2013 г.). М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2013. С. 438–442.
33. 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.
34. 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 (Москва, 26–27 сентября 2016 г.) М.: Изд-во: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2016. С. 473–478.
35. 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. К 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Моисеева (МОИСЕЕВ-100). Москва, 7–10 ноября 2017. Труды Всероссийской научной конференции / Отв. ред. И.Г. Поспелов. М.: ФИЦ ИУ РАН, 2017. С. 365–375.
36. 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.
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.
38. Кузнецов Е.С. Избранные научные труды (в связи со 100-летием со дня рождения). М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 784 с.
39. Чандрасекар С. Перенос лучистой энергии. М.: Изд-во иностранной литературы, 1953. 432 с.

40. Ленобль Ж. Перенос радиации в рассеивающих и поглощающих атмосферах. Стандартные методы расчета. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 263 с.
41. Коммонер Б. Замыкающийся круг. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 272 с.
42. Моисеев Н.Н. Как далеко до завтрашнего дня. Свободные размышления. 1917–1993. М.: «Аспект пресс», 1994. 304 с.
43. Сушкевич Т.А. К 50-летию первой отечественной полупроводниковой ЭВМ «Весна» и отечественной компьютерной графики // Научный сервис в сети Интернет: многообразии суперкомпьютерных миров: Труды XVI Международной суперкомпьютерной конференции (Новороссийск, 22–27 сентября 2014 г.). М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2014. С. 122–125.
44. Марченко М.А., Сушкевич Т.А. О параллельном моделировании кинетических процессов методом Монте-Карло (посвящается памяти Главного Теоретика Космонавтики М.В. Келдыша в год 60-летия запуска первого ИСЗ) // Вычислительные методы и программирование. 2017. Т. 18, № 4. С. 434–446.
45. Кароль И.Л., Катцов В.М., Киселев А.А., Кобышева Н.В. О климате по существу и всерьез. Санкт-Петербург: ГГО им. А.И. О климате по существу и всерьез. Санкт-Петербург: ГГО им. А.И. Воейкова, 2008. 55 с.
46. NASA uses Earth as laboratory to study distant worlds. June 29, 2018 by Calla Cofield, NASA. URL: <https://phys.org/news/2018-06-nasa-earth-laboratory-distant-worlds.html#jCp> (дата обращения: 01.09.2018).

Сушкевич Тамара Алексеевна, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, отдел «Динамические системы», Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» (Москва, Российская Федерация)

Стрелков Сергей Александрович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, отдел «Динамические системы», Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» (Москва, Российская Федерация)

Максакова Светлана Викторовна, научный сотрудник, отдел «Динамические системы», Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» (Москва, Российская Федерация)

**SPACE, EARTH AND SUPERCOMPUTING: CONJUGATE  
PROBLEMS OF ECOLOGY, CLIMATE, MONITORING  
AND REMOTE SENSING  
OF EARTH, HYPERSPECTRAL APPROACH AND  
NANODIAGNOSTICS OF NATURAL ENVIRONMENTS**  
*(Dedicated to the 65th anniversary of the Keldysh Institute  
of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences)*

© 2018 T.A. Sushkevich, S.A. Strelkov, S.V. Maksakova

*Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences*

*(Miusskaya sq. 4, Moscow, 125047 Russia)*

*E-mail: tamaras@keldysh.ru, strelka@mail.ru, svmmr@yandex.ru*

Received: 11.09.2018

The most complex problems of evolution, climate, ecology, global monitoring and remote sensing of the Earth (ERS) with hyperspectral approaches and nanodiagnosics of the natural environment and objects are proposed to be considered as conjugate for the first time. Electromagnetic radiation is a single physical field that combines the radiation field of the Earth with radiation-active components. For example, the volcanic eruptions and transboundary transport of pollution that affect the ecology and the state of the environment can be detected by remote sensing, and then through the transfer of radiation energy dependent on environmental pollutants can affect the climate, and ultimately, the trend of the evolution of the Earth as a planet. The insurmountable difficulty of the problem lies in the fact that the natural experiments are not allowed for the study of the planet, and only monitoring and observation by different means are possible, on the one hand, and on the other hand, at the time of the radiation measurements it is impossible to restore the entire set of optical-geophysical and optical-meteorological parameters of the “atmosphere-land-ocean” system, on which the radiation depends, and it is not possible to repeat the conditions of observations, since the environment is constantly changing and never repeats. And only mathematical modeling of “big” direct and inverse problems of the radiation transfer theory with parallel supercomputing allows to conduct the theoretical and computational research of such complex problems and to obtain qualitative and quantitative estimates for analysis and forecasts, as well as for different thematic applications based on “scenarios”.

*Keywords: conjugate problems, radiation field of the Earth, remote sensing, climate, ecology, supercomputing.*

**FOR CITATION**

Sushkevich T.A., Strelkov S.A., Maksakova S.V. Space, Earth and Supercomputing: Conjugate Problems of Ecology, Climate, Monitoring and Remote Sensing of Earth, Hyperspectral Approach and Nanodiagnosics of Natural Environments (Dedicated to the 65th anniversary of the Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences). *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering*. 2018. vol. 7, no. 4. pp. 5–29. (in Russian) DOI: 10.14529/cmse180401.

*This paper is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non Commercial 3.0 License which permits non-commercial use, reproduction and distribution of the work without further permission provided the original work is properly cited.*

## References

1. Jeneev T.M., Ovchinnikov M.Ju, Golikov A.R. *Prikladnaja nebesnaja mehanika i upravlenie dvizheniem. Sbornik statej, posvjashhennyj 90-letiju so dnja rozhdenija D.E. Ohocimskogo. Trudy IPM im. M.V. Keldysha RAN* [Applied Celestial Mechanics and Motion Control. Collection of Articles Dedicated to the 90th Anniversary of the Birth of D.E. Okhotsimsky. Trudy of Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences]. Moscow, KIAM RAS, 2010. 368 p. (in Russian)
2. Sushkevich T.A., Strelkov S.A., Maksakova S.V. 60 Years from the First Meeting on the Satellite to the Modern Systems of Remote Sensing and Monitoring of Earth from Space: Information and Mathematical Aspect (History and Prospects). *Optika atmosfery i okeana* [Optics of Atmosphere and Ocean]. 2014. vol. 27, no. 7. pp. 573–580. (in Russian)
3. Sushkevich T.A. Chief Theorist M.V. Keldysh and Chief Designer S.P. Korolev of Cosmonautics – Conquerors of Space. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Actual Problems of Remote Sensing of the Earth from Space]. 2011. vol. 8, no. 1. pp. 9–25. (in Russian)
4. Sushkevich T.A. M.V. Keldysh – Organizer of International Cooperation in Space and the First «Soyuz-Apollo» Soviet-American Program (ASTP). *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Actual Problems of Remote Sensing of the Earth from Space]. 2011. vol. 8, no. 4. pp. 9–22. (in Russian)
5. *Informacionnaja sistema “Arhivy Rossijskoj akademii nauk” (ISARAN): Fond M.V. Keldysha* [Information System “Archives of the Russian Academy of Sciences” (ISARAN): M.V. Keldysh Foundation]. Available at: <http://arran.ru/> (accessed: 01.09.2018) (in Russian)
6. Keldysh M.V. *Tvorcheskij portret po vospominanijam sovremennikov* [Creative Portrait on the Memoirs of Contemporaries]. Moscow, Nauka, 2001. 398 p.
7. *Prezident Akademii nauk SSSR M.V. Keldysh 100 let so dnja rozhdenija* [The President of the Academy of Sciences of the USSR M.V. Keldysh 100 Years Since the Birth]. Moscow, the Archives of the Russian Academy of Sciences, 2011. Available at: <http://www.arran.ru/?q=ru/node/571> (accessed: 01.09.2018) (in Russian)
8. Sushkevich T.A. Space Projects: Information-Mathematical Aspect and Super Calculations (History and Prospects). *Vestnik Yuzho-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Matematicheskoe modelirovanie i programirovanie* [Bulletin of South Ural State University. Series: Mathematical Modeling, Programming & Computer Software]. 2011. vol. 8, no. 17(234). pp. 4–9. (in Russian)
9. Gubarev V.S. *Mstislav Keldysh. “Velikie umy Rossii” Vypusk 2* [“Great Minds of Russia”. Issue 2]. Moscow, Publishing House “Komsomolskaya Pravda”, 2016. 96 p.
10. Afiani V.Yu., Ilizarov S. “We Lose ... the Academy of Sciences” – Said July 11, 1964, the First Secretary of the Central Committee of the CPSU N.S. Khrushchev. *Vestnik istorii estestvoznaniya i tehniki* [Bulletin of the History of Science and Technology]. 1999. no 1. pp. 167–173. (in Russian)
11. Lebedev S.A., Keldysh M.V. *Nauchnyj otchet po teme “Bol’shie schetnye matematicheskie mashiny”* [A Scientific Report on the Theme “Large Calculating Mathematical Machines”]. Moscow, Arhiv RAN, 1952. F. 1939. Op. 2.

12. Sobolev S.L., Kitov A.I., Ljapunov A.A. The Main Features of Cybernetics. *Voprosy filosofii* [Problems of Philosophy]. 1955. no. 4. pp. 137–148. (in Russian)
13. Keldysh M.V., Lyapunov A.A., Shura-Bura M.R. Mathematical Problems of the Computing Machines Theory. *Vestnik AN SSSR* [Bulletin of USSR Academy of Sciences]. 1956. no. 11. pp. 16–37. (in Russian)
14. Ezerova G.N., Lukhovitskaya E.S. To a Question about a History of Information Science in Russia. *Preprinty KIAM RAS* [Preprints of the Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences]. 2012. no. 49. 12 p. Available at: [http://keldysh.ru/papers/2012/prep2012\\_49.pdf](http://keldysh.ru/papers/2012/prep2012_49.pdf) (accessed: 01.09.2018) (in Russian)
15. Lukhovitskaya E.S., Ezerova G.N. Informatics in Keldysh Institute. 1960s. *Preprinty KIAM RAS* [Preprints of the Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences]. 2013. no. 29. 33 p. Available at: [http://keldysh.ru/papers/2013/prep2013\\_29.pdf](http://keldysh.ru/papers/2013/prep2013_29.pdf) (accessed: 01.09.2018) (in Russian)
16. Afendikova N.G. About the Role of M.V. Keldysh in Some Key Moments of the Development of Russian Computer Technology. *Preprinty KIAM RAS* [Preprints of the Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences]. 2017. no. 58. 12 p. DOI: 10.20948/prepr-2017-58.
17. Popov Yu.P. *50-letie Instituta prikladnoj matematiki im. M.V. Keldysha* [The 50th Anniversary of the Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences KIAM RAS]. Available at: [http://www.keldysh.ru/grants/rffi//50\\_years/](http://www.keldysh.ru/grants/rffi//50_years/) (accessed: 01.09.2018) (in Russian)
18. Lebedev S.A. On the 100th Anniversary of the Birth of the Founder of the National Electronic Computer. Moscow, FIZMATLIT, 2002. 440 p. (in Russian)
19. *Rezoljucija General'noj Assamblei OON ot 07.04.2011 A/RES/65/271. Mezhdunarodnyj den' poleta cheloveka v kosmos* [UN General Assembly Resolution of 07.04.2011 A/RES/65/271. International Day of Human Space Flight 12 April]. Available at: <http://un.org/en/events/humanspaceflightday/> (accessed: 01.09.2018); <https://undocs.org/ru/A/RES/65/271> (accessed: 01.09.2018) (in Russian)
20. Koptyug V.A. *Konferencija OON po okruzhajushhej srede i razvitiju (Rio-de-Zhanejro, ijun' 1992 goda). Informacionnyj otchet* [United Nations Conference on environment and development (Rio de Janeiro, June 1992). Information report]. Novosibirsk, Siberian branch of Russian Academy of Sciences, 1992. 79 p. Available at: <http://prometeus.nsc.ru/unrio92.pdf> (accessed: 01.09.2018) (in Russian)
21. The Paris Agreement (French: Accord de Paris): Paris Climate Accord or Paris Climate Agreement is an Agreement within the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) Dealing with Greenhouse Gas Emissions Mitigation, Adaptation, and Finance Starting in the Year 2020, (2015). Available at: [http://english\\_paris\\_agreement.pdf](http://english_paris_agreement.pdf); <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf> (accessed: 01.09.2018)
22. Sushkevich T.A. *Osesimmetrichnaja zadacha o rasprostranenii izluchenija v sfericheskoj sisteme* [Axisymmetric Problem of the Radiation Transfer in a Spherical System]. Moscow, Report of Institute of Applied Mathematics of Sciences Academy of the USSR, N 0-572-6, 1966. 180 p.

23. Sushkevich T.A., Strelkov S.A., Ioltuhovskij A.A. *Metod harakteristik v zadachah atmosfernoj optiki* [The Method of Characteristics in Atmospheric Optics Problems]. Moscow, Nauka, 1990. 296 p.
24. Sushkevich T.A. *Matematicheskie modeli perenosa izluchenija* [Mathematical Models of Radiation Transfer]. Moscow, Binom. Knowledge Laboratory, 2005. 661 p.
25. Sushkevich T.A., Strelkov .A., Vladimirova E.V., Volkovich A.N., Ignatieva E.I., Kozoderov V.V., Kulikov A.K., Maksakova S.V., Mel'nikova I.N., Fomin B.A. Radiation Factor of Climate Change and Aerospace Monitoring of the Environment. *Vsemirnaya konferenciya po izmeneniju klimata: Tezisy dokladov Vsemirnoj konferencii (Moscow, 29 sentjabrja – 3 oktjabrja 2003)* [The World Climate Change Conference: Abstracts of Reports of the World Conference (Moscow, Russia, September, 29 – October, 3, 2003)]. Moscow, Publishing of the Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, 2003. pp. 443.
26. Sushkevich T.A. About Pioneering Work on Mathematical Modeling of the Earth Radiation Field during Space Exploration. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Actual Problems of Remote Sensing of the Earth from Space]. 2008. vol. 1, no. 5. pp. 165–180. (in Russian)
27. Sushkevich T.A., Strelkov S.A., Maksakova S.V. On the Prospects of Aerospace Hyperspectral Remote Sensing for Nanodiagnostic of Dangerous Phenomenon. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika* [News of Higher Educational Institutions. Physics]. 2009. no. 2/2. pp. 149–155.
28. Sushkevich T.A., Strelkov S.A., Kozoderov V.V., Gavrilovich A.B., Maksakova S.V., Fomin B.A. Information-Mathematical Aspect of Aerospace Hyperspectral Monitoring of the Environment. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Actual Problems of Remote Sensing of the Earth from Space]. 2009. vol. 2, no. 6. pp. 552–559. (in Russian)
29. Sushkevich T.A., Strelkov S.A., Maksakova S.V. Global Radiation Field of the Earth, Radiation Forcing and Supercomputing. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Actual Problems of Remote Sensing of the Earth from Space]. 2010. vol. 7, no. 4. pp. 165–175. (in Russian)
30. Sushkevich T.A., Strelkov S.A., Maksakova S.V., Kozoderov V.V., Fomin B.A. Nanodiagnosics of Natural and Technogenic Environments and Supercomputing. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Actual Problems of Remote Sensing of the Earth from Space]. 2010. vol. 7, no. 4. pp. 176–186. (in Russian)
31. Sushkevich T.A., Kozoderov V.V., Kondranin T.V., Strelkov S.A., Dmitriev E.V., Maksakova S.V. Parallel Computations in Problems of Space Environmental Monitoring and Hyperspectral Remote Sensing. *Nauchnyj servis v seti Internet: poisk novyh reshenij: Trudy Mezhdunarodnoj superkomp'yuternoj konferencii (Novorossiysk, 17–22 sentjabrja 2012)* [Scientific Service in the Internet: the Search for New Solutions: Proceedings of the International Supercomputer Conference (Novorossiysk, Russia, September, 17–22, 2012)]. Moscow, Publishing House of Moscow State University of M.V. Lomonosov, 2012. pp. 320–324. (in Russian)
32. Sushkevich T.A., Strelkov S.A., Maksakova S.V. Theoretical Bases and Computational Models for Super-Calculations in Problems of Monitoring of Ecosystem, Biosphere and Climate of the Earth, Occurrence and Development of Accidents and Natural disasters

- on the Basis of Aerospace Remote Sensing. *Nauchnyj servis v seti Internet: vse grani parallelizma: Trudy Mezhdunarodnoj superkomp'juternoj konferencii (Novorossiysk, 23–28 sentjabrja 2013)* [Scientific Service in the Internet: all facets of parallelism: Proceedings of the International Supercomputer Conference (Novorossiysk, Russia, September, 23–28, 2013)]. Moscow, Publishing House of Moscow State University of M.V. Lomonosov, 2013. pp. 438–442. (in Russian)
33. Sushkevich T.A., Strelkov S.A., Maksakova S.V. On the Global Radiation Forcing Model for the Climate and Remote Sensing of the Earth. *Optika atmosfery i okeana* [Optics of Atmosphere and Ocean]. 2016. vol. 29, no. 9. pp. 725–732. (in Russian)
34. Sushkevich T.A., Strelkov S.A., Maksakova S.V. “Paris Agreement” and the Global Model Radiation Forcing on the Climate in the Planet Wide (Dedicated to the Memory of the Main Theorist of Cosmonautics Academician M.V. Keldysh in the Year of its 105th Anniversary). *Superkomp'juternye dni v Rossii: Trudy mezhdunarodnoj konferencii (Moskva, 26–27 sentjabrja 2016)* [Supercomputer Days in Russia: Proceedings of the International Conference (Moscow, Russia, September, 26–27, 2016)]. Moscow, Publishing House of Moscow State University of M.V. Lomonosov, 2016. pp. 473–478. (in Russian)
35. Sushkevich T.A. Radiation Forcing on Climate and Ecology (Dedicated to the 100th Anniversary of Academician N.N. Moiseev and the 60th Anniversary of the Launch of the First Sputnik). *Modelirovanie kojevoljucii prirody i obshhestva: problemy i opyt. K 100-letiju so dnja rozhdenija akademika N.N. Moiseeva (MOISEEV-100): Trudy Vserossijskoj nauchnoj konferencii (Moskva, 7–10 nojabrja 2017)* [Modeling of Coevolution of Nature and Society: Problems and Experience. To the 100 Anniversary from the Birthday of Academician N.N. Moiseev (MOISEEV-100): Proceedings of the all-Russian Scientific Conference (Moscow, Russia, November, 7–10, 2017)]. Moscow, Publishing of the Federal Research Center “Computer Science and Control” of RAS, 2017. pp. 365–375. (in Russian)
36. Sushkevich T.A., Strelkov S.A., Maksakova S.V. Albedo of the Planet as an Indicator of the Evolution of the Earth's Climate (Dedicated to the 65th Anniversary of the Keldysh Institute of Applied Mathematics and the Achievements of the “Lunar Program”). *Preprinty KIAM RAS* [Preprints of the Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences]. 2018. no. 88. 28 p. (in Russian) DOI: 10.20948/prepr-2018-88.
37. Sushkevich T.A. To the 55th Anniversary of the Discovery of Stratospheric Aerosol Layers from Space: Volcanoes and Climate Problems (Dedicated to the 65th Anniversary of the Keldysh Institute of Applied Mathematics and its Achievements in Manned Cosmonautics). *Preprinty KIAM RAS* [Preprints of the Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences]. 2018. no. 125. 32 p. (in Russian) DOI: 10.20948/prepr-2018-125.
38. Kuznecov E.S. *Izbrannye nauchnye trudy (v svjazi so 100-letiem so dnja rozhdenija)* [Selected Scientific Works (in Connection with the 100th Anniversary of His Birth)]. Moscow, FIZMATLIT, 2003. 784 p.
39. Chandrasekar S. Radiative Transfer. London, Oxford, Clarendon Press, 1950. 405 p.
40. Lenoble J. Radiative Transfer in Scattering and Absorbing Atmospheres: Standard Computational Procedures. Hampton, Virginia, USA, A. DEEPAK Publishing, 1985. 264 p.

41. Commoner B. The Closing Circle: Nature, Man, and Technology. New York, Knopf, 1971. 326 p.
42. Moiseev N.N. *Kak daleko do zavtrashnego dnja. Svobodnye razмышlenija. 1917–1993* [How far is it to tomorrow. Free thinking. 1917–1993]. Moscow, Aspect press, 1994. 304 p. (in Russian)
43. Sushkevich T.A. On the 50th Anniversary of the First National Semiconductor Computer “Vesna” and Domestic Computer Graphics. *Nauchnyj servis v seti Internet: mnogoobrazie superkomp'yuternyh mirov: Trudy Mezhdunarodnoj superkomp'yuternoj konferencii (Novorossiysk, 22–27 sentjabrja 2014)* [Scientific Service in the Internet: the Diversity of Supercomputer Worlds: Proceedings of the International Supercomputer Conference (Novorossiysk, Russia, September, 22–27, 2014)]. Moscow, Publishing House of Moscow State University of M.V. Lomonosov, 2014. pp. 122–125. (in Russian)
44. Marchenko M.A., Sushkevich T.A. Parallel Simulation of Kinetic Processes by Monte Carlo Method (Dedicated to the Memory of the Chief Theoretician of Cosmonautics Academician M.V. Keldysh in the 60th Anniversary of the Launch of the First Artificial Sputnik). *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye* [Numerical Methods and Programming]. 2017. vol. 18, no. 4. pp. 434–446. (in Russian)
45. Karol I.L., Kattsov V.M., Kiselev A.A., Kobysheva N.V. *O klimate po sushhestvu i user'ez* [About the Climate on the Merits and Seriously]. Saint Petersburg, GGO im. A.I. Voeikov, 2008. 55 p. (in Russian)
46. NASA uses Earth as laboratory to study distant worlds Calla Cofield, NASA, June 29, 2018. Available at: <https://phys.org/news/2018-06-nasa-earth-laboratory-distant-worlds.html#jCp> (accessed: 01.09.2018)