

Перенос излучения, радиационное поле Земли и космические проекты: информационно-математический аспект и супервычисления (история и перспективы) *

Т.А. Сушкевич

Учреждение Российской академии наук
Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН
E-mail tamaras@keldysh.ru

Основное внимание уделено проблемам информационно-математического обеспечения проблем космонавтики: исторический экскурс и современные перспективы. Речь идет о проектах навигации, ориентации, стабилизации космических кораблей, упреждения стартов ракет из космоса, космического землеобзора, Лунном проекте, пионерских космических исследованиях по дистанционному зондированию Земли, которые проводились советскими космонавтами на пилотируемых космических кораблях и долгосрочных орбитальных станциях. Отмечена важнейшая роль М.В. Келдыша, который фактически определил основные направления становления и развития космических исследований и дистанционного аэрокосмического зондирования Земли как планеты, называемых в настоящее время во всем мире кратко REMOTE SENSING.

1. Введение

Настоящая статья посвящается *100-летию юбилею Главного Теоретика космонавтики академика М.В. Келдыша (10.02.1911–24.06.1978)* — идеолога и организатора космических исследований и *50-летию запуска в Советском Союзе 12 апреля 1961 года ПЕРВОГО в истории земной цивилизации человечества "корабля-спутника"* — так называл Главный Конструктор космонавтики академик С.П. Королев искусственный спутник Земли с космонавтом — и *полета в космическое пространство ПЕРВОГО в мире космонавта* — гражданина Советского Союза Юрия Алексеевича Гагарина (09.03.1934–27.03.1968) — *ГЛАВНЫМ событиям 2011 года, объявленного международным годом космоса.*

В *2007 году* прогрессивное научное сообщество отметило *ТРИ ЭПОХАЛЬНЫХ юбилея*, которые разделяют ровно 50 лет:

- *150 лет со дня рождения Э.К.Циолковского (05.09.1857-19.09.1935);*
- *100 лет со дня рождения С.П.Королева (12.01.1907-14.01.1966);*
- *50 лет со дня запуска первого искусственного спутника Земли (04.10.1957).*

Одно событие в полвека — закон природы? Но в 2007 году этот закон нарушен, поскольку ничего эпохального в 2007 году не состоялось. Следует отметить, что в отличие от работ по созданию первой атомной бомбы и одной из ракет, где имели место элементы информированности о работах в США и Германии, в разработках и создании межконтинентальной ракеты и осуществлении запусков искусственных спутников Земли (ИСЗ), "кораблей-спутников" с космонавтами на борту (ПКК) и орбитальных долгосрочных станций (ДОС) *советские ученые были первыми в мировой истории науки и техники, а специалисты США, Франции и других стран следовали за достижениями Советского Союза (СССР).* На прошедшем 1–5 октября 2007 года *Международ-*

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 09-01-00071, 11-01-00021).

ном космическом форуме "*Космос: наука и проблемы XXI века*", посвященном 50-летию запуска первого ИСЗ, администратор НАСА Майкл Гринфилд свою речь посвятил успехам советских ученых — пионерам в области космонавтики и отметил огромное влияние советской космонавтики на космические проекты в США. По мнению НАСА и Европейского космического Агентства: *в первые 10–15 лет космической эры советская космонавтика занимала лидирующее положение и многие достижения в космосе являлись пионерскими.*

Далее речь пойдет о космических исследованиях и аэрокосмическом дистанционном зондировании и мониторинге Земли, в частности, связанных с обнаружением стратосферных аэрозольных слоев, возникающих в результате извержений вулканов, мощных пожаров и последствий военных операций (война во Вьетнаме), которые учитываются при расчетах радиационных членов в климатических моделях и оценках радиационного форсинга на климат. **ВПЕРВЫЕ** такую проблему автору пришлось решать при математическом моделировании ореола Земли, **ВПЕРВЫЕ** увиденного из космоса Ю.А. Гагариным (первые визуальные наблюдения) и **ВПЕРВЫЕ** сфотографированного (первые инструментальные наблюдения) с пилотируемых космических кораблей в июне 1963 года Валерием Федоровичем Быковским на ПКК "Восток-5" и Валентиной Васильевной Терешковой на ПКК "Восток-6": *космонавты ВПЕРВЫЕ сфотографировали дневной и сумеречный горизонты Земли и провели ПЕРВЫЙ научный эксперимент по исследованию Земли из космоса при участии космонавтов.*

2. Атомный и космический проекты

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.*

Два эпохальных научных проекта — атомный и космический — способствовали колоссальному развитию советской науки, которая могла конкурировать с мировой наукой XX века. Компьютер явился главным действующим лицом, основным двигателем НТР: использование ядерной энергии, полет в космос, информационные технологии, естественно, были бы невозможны без ЭВМ. Впервые для реализации инженерно-конструкторских проектов потребовалось решение больших задач на ЭВМ и были заложены основы новой технологии, которую позже назвали "математическое моделирование" или "computer science".

Разработка информационно-математических аспектов этих проектов привела к расцвету *кинетической теории переноса нейтронов, заряженных частиц, излучения разной природы в широком диапазоне спектра длин волн.* В Институте Келдыша в 1955 году был создан Отдел № 7 "Кинетические уравнения", который принимал активное участие в работах по обоим проектам. Этот отдел основал профессор Евграф Сергеевич Кузнецов (13.09.1901-17.02.1966), который уже в 1952 году заложил фундамент и ныне работающего "Математического отдела" Физико-энергетического института (ФЭИ, г. Обнинск). В ФЭИ под руководством Е.С. Кузнецова проводились расчеты для запуска первой в мире атомной станции в 1954 году. Е.С. Кузнецов сотрудничал с Игорем Васильевичем Курчатовым, заместителем которого по вычислительным работам являлся академик Сергей Львович Соболев (06.10.1908-03.01.1989).

После Е.С. Кузнецова с 1955 года математическим отделом ФЭИ руководил академик Гурий Иванович Марчук, который работал по проектам создания атомных реакторов спе-

циального назначения. В Арзамасе многие вычислительные задачи по атомному проекту были выполнены под руководством Василия Сергеевича Владимирова.

В 50-ые годы В.С. Владимиров, Е.С. Кузнецов, Г.И. Марчук являлись главными специалистами по теории переноса, ориентированной на атомный проект и атомную энергетику.

Но ещё с 1925 года Е.С. Кузнецов занимался теорией переноса солнечного и теплового излучения в атмосфере и море в связи с проблемами авиации, климата, прогноза погоды, метеорологии, урожайности и т.д. Не случайно ученики Е.С. Кузнецова и сотрудники отдела "Кинетические уравнения" Института Келдыша были привлечены и приняли активное участие в информационно-математическом обеспечении первых и последующих космических проектов. Не случайно в этих проектах участвовал Институт Келдыша, поскольку М.В. Келдыш являлся Главным Теоретиком по космонавтике, а его заместитель А.Н. Тихонов (30.10.1906-07.10.1993) уже имел большой опыт по проведению вычислительных экспериментов и решению больших задач в рамках атомного проекта: в 1948 году Андрей Николаевич при активном участии Александра Адреевича Самарского провел **ПЕРВЫЙ в мировой науке вычислительный эксперимент** для решения большой и сложной задачи, связанной с моделированием взрыва водородной бомбы по модели "слойка" А.Д. Сахарова, да ещё с распараллеливанием вычислений.

Настоящая статья ориентирована на приложения теории переноса излучения в космических проектах. Сложность становления космических исследований и реализации космических проектов была обусловлена тем, что приходилось иметь дело с "замкнутым кругом": — чтобы запустить на космические орбиты аппараты и измерить характеристики радиационного поля Земли, нужны предварительные оценочные расчеты этих характеристик на основе моделей теории переноса излучения с учетом многократного рассеяния и поглощения солнечного излучения, а также собственного излучения атмосферы и поверхности Земли; — чтобы смоделировать перенос излучения в системе "атмосфера – земная поверхность", нужны были данные о пространственных и спектральных распределениях оптико-геофизических параметров атмосферы, описывающих взаимодействие солнечного и собственного излучения с компонентами земной атмосферы и земной поверхностью.

Радиационное поле системы "атмосфера – земная поверхность (суша, океан)" — это **неотъемлемая компонента** биосферы, экосистемы и климата Земли, с одной стороны. С другой стороны, радиационные характеристики системы являются **носителями информации** о состоянии окружающей среды, атмосферы, облачности, океана, гидрометеоров и всевозможных выбросов с загрязняющими примесями (последствия техногенных аварий, военных действий, лесных и степных пожаров, извержений вулканов и т.д.), а также промышленной и транспортной инфраструктуры. **Электромагнитное излучение**, регистрируемое разными средствами, является **основным источником информации** о строении и физических свойствах планетных атмосфер и поверхностей 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 настоящее время возрастает роль "космического земледования" как той дисциплины, которая должна объединить усилия различных специалистов и позволить им всем вместе "заговорить" на общем языке спутниковых исследований. Важным становится рассмотрение информационно-математических основ "космического земледования", объединяющего междисциплинарные исследования, связанные

— с оценкой информационного содержания данных дистанционных и контактных измерений,

— с разработкой методов анализа и интерпретации аэрокосмических изображений,

— с оценкой состояния и пониманием проблем предсказуемости глобальных и региональных изменений природных сред на базе временных рядов регулярных спутниковых наблюдений, — с исследованиями по оптимизации и эффективности систем наблюдений в интересах различных областей приложений.

"Космическое землеведение" — это оперативная информация о стихийных бедствиях и экологических катастрофах антропогенно-техногенного и естественно-природного происхождения и космический мониторинг глобальных изменений окружающей среды, включая экологические катастрофы замедленного действия.

В интересах международной кооперации по аэрокосмическому глобальному мониторингу Земли и международного глобального проекта по изучению эволюции Земли, климата и опасных явлений (в конце 2004 года около 50 стран подписали международное Соглашение) требуется развитие и разработка нового математического обеспечения для решения прямых и обратных задач теории переноса излучения в природных средах, реализуемого на высокопроизводительных суперкомпьютерах. Ежегодно проводятся саммиты по проблемам климата и загрязнения окружающей среды с участием руководителей правительств почти 200-х стран!

3. А как это начиналось?

Кто заложил основы космических исследований, дистанционного зондирования и получил первые результаты? Полезно почитать книгу В.С. Губарева "Русский космос" [1]. В мае 1946 года советским руководством было принято Постановление о развитии ракетостроения в СССР. В истории отечественной ракетно-космической техники решающая роль принадлежит Сергею Павловичу Королеву и созданному под его началом в 1947 году Совету главных конструкторов, не имевшему прецедента в истории мировой науки. Королев был признанным вождем, руководителем и полководцем советской космонавтики. Однако, очень велика была роль Мстислава Всеволодовича Келдыша. **М.В. Келдыш** считался Главным Теоретиком космонавтики и действительно был **организатором математической школы**, которая обеспечила решение многих практических задач ракетодинамики, небесной механики, баллистики и навигации космических полетов и заложила основы космического землеобзора и дистанционного зондирования Земли.

В феврале 1954 года в кабинете М.В. Келдыша (с 1981 года это Мемориальный музей-кабинет академика М.В. Келдыша в Главном корпусе ИПМ РАН) прошло **ПЕРВОЕ совещание по искусственному спутнику Земли**. В 1954 году М.В. Келдышем, С.П. Королевым и М.К. Тихонравовым было представлено письмо в ЦК КПСС и Совет министров с предложением о создании и запуске искусственного спутника Земли. 12 февраля 1955 года вышло Постановление о строительстве космодрома "Байконур".

О космических исследованиях заговорили в 1955 году. **М.В. Келдыш — идеолог и организатор космических исследований**. По указанию М.В. Келдыша летом 1955 года из Академии наук СССР разослали письма 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 выделил две главные задачи: **разведка и наблюдения Земли**, вокруг которых сформировались многие научно-исследовательские проекты. **В ноябре 1955 года** из АН СССР в ЦК КПСС и Совет Министров было направлено письмо с **Программой космических исследований**. Актуально и в XXI веке.

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 РАКЕТ из КОСМОСА. Этот фантастический проект до сих пор актуален и является мощным факто-

ром сдерживания военных конфликтов.

В январе 1956 года была организована Специальная комиссия по объекту "Д". 30 января 1956 года М.В. Келдыш был назначен председателем Специальной комиссии Академии наук по ИСЗ; С.П. Королев и М.К. Тихонравов — его заместители. Первый спутник имел шифр "ПС-1" — "простой спутник первый". Тогда уже мечтали о полете в космос человека и спутник с космонавтом С.П. Королев называл "корабль-спутник", отражая мечту человечества о космических путешествиях.

17 сентября 1957 года в Колонном зале Дома союзов состоялось торжественное собрание, посвященное 100-летию со дня рождения К.Э. Циолковского — основоположника теории реактивного движения, мечтавшего о межпланетных полетах и завоевании космического пространства. С докладом о практическом значении научных и технических предложений К.Э. Циолковского для развития ракетной техники и запуска искусственных спутников Земли выступил член-корреспондент АН СССР С.П. Королев.

Это были годы жесткого противостояния СССР–США и конкуренции в ракетостроении. В докладе С.П. Королева прозвучало о произведенном успешном испытании сверхдальней межконтинентальной баллистической ракеты: "В наши дни сбываются замечательные предсказания Циолковского. Советские ученые работают над многими новыми проблемами ракетной техники, например, над проблемой посылки ракеты на Луну и облета Луны с возвращением ракеты (или некоторой части аппаратуры) на Землю, над проблемой полета человека на ракете, над глубоким исследованием космического пространства при помощи искусственных спутников. То, что было невозможно вчера, стало возможным сегодня."

18–19 сентября 1957 года в Московском Доме ученых состоялась Научно-техническая конференция отделения Технических и Физико-математических наук, посвященная развитию идей К.Э. Циолковского в области теории и практики реактивного движения и освоения космического пространства. В докладах обсуждались проблемы использования долговременных наблюдений на летающих лабораториях в виде искусственных спутников Земли. В докладе В.А. Егорова (ОПМ МИАН АН СССР) рассматривались некоторые задачи динамики полета к Луне, которые были реализованы в лунных проектах СССР. Через пару недель 04 октября 1957 года в СССР был запущен первый в истории человеческой цивилизации искусственный спутник Земли.

На встрече Нового 1961 года М.В. Келдыш произнес тост: "За космический год! И за полет человека!" **12 апреля 1961 года советский космонавт Юрий Алексеевич Гагарин совершил первый полет человека в космос.** А уже 16 марта 1962 года запуск первого ИСЗ серии "Космос" положил начало осуществлению комплексной научной Программы оптических исследований и дистанционного зондирования околоземного космического пространства и Земли.

После первых запусков беспилотных космических кораблей состоялась **встреча "Трёх К" (И.В. Курчатова, М.В. Келдыша, С.П. Королева)** и далее атомный и космический проекты развивались параллельно, состоялась их "свадьба", поскольку была поставлена грандиозная стратегическая задача "упреждения старта ракет из космоса" в рамках проекта создания "ракетно-ядерного щита", который и в настоящее время является главным сдерживающим фактором глобальных войн.

Военные и гражданские, научно-технические и научно-исследовательские проекты выполнялись как взаимно дополняющие. Для принятия решений по программам космических полетов, обобщения информации и обмена данными космических наблюдений были созданы специальные Межведомственные Научно-Технические Советы с многочисленными секциями, в которых главную роль играли ученые и конструкторы из академических институтов и отраслевых организаций. После большого перерыва в октябре 2005 года вышла Федеральная программа по космосу, направленная на неотложные меры по реанимации космонавтики. В настоящее время ситуация меняется: подготовлена Федеральная программа по космосу на перспективу до 2020 и 2030 гг.

Отметим важные ключевые даты и должности М.В. Келдыша:
1953 г. – 1978 г. — директор ОПМ МИАН (1953-1966) и ИПМ АН СССР (1966-1978);
1953 г. – 1955 г. — Академик-секретарь Отделения физико-математических наук АН СССР;
1953 г. – 1960 г. — Член Президиума АН СССР;
30 января 1956 г. — назначен председателем Специальной комиссии АН СССР по ИСЗ;
1960 г. – 1961 г. — Вице-президент АН СССР;
1961 г. (19 мая) – 1975 г. (19 мая) — Президент Академии наук СССР.

28 января 1960 года Решением Правительства для координации работ был образован Межведомственный научно-технический совет по космическим исследованиям при Академии наук СССР и М.В. Келдыш назначен его председателем, С.П. Королев и М.К. Тихонравов — заместители председателя. Этот совет функционирует до сих пор. Заслугой Мстислава Всеволодовича на этом посту было проведение сбалансированной программы исследований, обеспечившей органичное сочетание всех аспектов освоения космического пространства. Подтверждением тому явились мировое признание успехов нашей страны, уважение и авторитет М.В. Келдыша, избранного в мае 1961 года Президентом Академии наук. Он руководил Академией 14 лет (с 19 мая 1961 г. по 19 мая 1975 г.).

С избранием М.В. Келдыша Президентом Академии наук СССР происходят существенные изменения как в работе самого Президиума, так и в общественном положении Академии наук в целом. Часто употреблявшееся тогда выражение **"Академия стала штабом советской науки"** все больше наполнялось реальным содержанием.

В титанической работе по решению атомной проблемы и ракетно-космических задач большой вклад Мстислава Всеволодовича состоял не только в руководстве научным коллективом, но и в личном участии как автора, *создателя новых вычислительных методов и алгоритмов*. Эти работы предопределили современное развитие в стране **вычислительной математики** и численных методов решения задач математической физики.

Для всей страны М.В. Келдыш был великим ее гражданином, выдающимся ученым и организатором науки, одним из "Трех К" — руководителей Программы "Ракетно-ядерный щит СССР", Главным Теоретиком космонавтики, Президентом Академии наук СССР, Кавалером трех золотых звезд "Герой Социалистического Труда" и многих других наград и званий (см. "Страницы памяти" www.keldysh.ru).

В ОПМ МИАН был организован Баллистический центр, который, начиная с запуска первого искусственного спутника Земли, успешно решает проблемы баллистико-навигационного обеспечения полетов пилотируемых кораблей, долговременных орбитальных станций "Салют", "Мир", МКС, многоцветной космической системы "Энергия-Буран", автоматических аппаратов научного назначения "Луна", "Венера", "Марс", "Фобос" и др., участвует в разработке и реализации международных космических проектов. В 1967 году за большие заслуги перед отечественной наукой и государством Институт был награжден орденом Ленина, в 1978 году Институту присвоено имя М.В. Келдыша.

В 1965 году был организован Институт космических исследований АН СССР. Организатором и первым директором ИКИ (1965–1973) по рекомендации Президента АН СССР М.В. Келдыша являлся академик Георгий Иванович Петров (1912–1987). В 1966 году, после кончины С.П. Королева, появилось открытое название Института Келдыша: "Отделение прикладной математики Математического института имени В.А. Стеклова АН СССР", основанное в 1953 году, приняло статус "Института прикладной математики АН СССР".

В 1961 году М.В. Келдыш стал Президентом АН СССР и сохранил свой пост Председателя Совета по космосу АН СССР. Далее по традиции Президенты АН СССР являлись Председателями Совета по космосу АН СССР. Как известно, последним Президентом АН СССР и последним Председателем Совета по космосу АН СССР являлся Гурий Иванович Марчук. Ни один космический проект не принимался даже к проектированию без экспертного заключения Совета по космосу АН СССР. В 1980 году Председателем Государственного Комитета по науке и техники СССР (ГКНТ) был назначен Гурий Иванович Марчук,

по инициативе которого ГКНТ стал играть существенную роль в подготовке и реализации космических проектов. Под руководством Гурия Ивановича были организованы Государственные научно-технические программы по развитию мирного космоса и использованию космических технологий для решения фундаментальных и народно-хозяйственных задач. В 1981 году академик Г.И.Марчук получил первую "Золотую медаль имени М.В.Келдыша" Академии наук СССР за выдающиеся результаты в области прикладной математики и механике.

4. Космические проекты и математическое моделирование

В течение тысячелетий человечество изучает звезды и планеты солнечной системы путем визуальных, а позднее фотографических и фотоэлектрических наблюдений. Только планета Земля до конца 50-х годов оставалась недоступной. Лишь по отраженному свету от поверхности Луны (пепельный свет) представлялось возможным оценить интегральное излучение Земли. Широкие возможности исследований радиационных характеристик нашей планеты появились в результате создания и развития ракетной и космической техники. Опыт осуществления в СССР космической программы подтвердил реальность тех перспектив, которые связаны с использованием ПКК, ДОС, автоматических межпланетных станций (АМС), космических аппаратов (КА), искусственных спутников Земли (ИСЗ) для исследования природной среды и природных ресурсов Земли из космоса. 20 ноября 1998 года состоялся запуск первого модуля "Заря" (Россия) первой Международной космической станции (МКС) — космической лаборатории настоящего и будущего.

Важной составной частью первых научных космических программ являлись оптические исследования [2–6]:

- визуальные наблюдения, фотометрические и спектральные исследования сумеречной и дневной атмосферы с целью изучения вертикальных профилей оптически активных компонентов (аэрозоль, озон, газовые примеси);
- исследования спектров отражения различных типов природных образований на поверхности Земли и оценка влияния атмосферы на спектральные яркости и контрасты природных объектов при наблюдениях (съемке) из космоса.

Анализ космических спектров природных образований (спектральных яркостей, коэффициентов спектральных яркостей, спектральных контрастов) показал принципиальную возможность решения ряда фундаментальных и практических задач "космического земледения".

В хронологии пионерских работ советских ученых по дистанционному зондированию атмосферы и земной поверхности Земли особое место занимают достижения советской пилотируемой космонавтики, связанные с огромной ролью ПКК и ДОС с экипажами космонавтов, которые проводили пионерские уникальные космические эксперименты в контролируемых условиях. США предпочтение отдавали искусственным спутникам Земли, работающим в автоматическом режиме.

Полет Ю.А. Гагарина 12 апреля 1961 г. на ПКК "Восток", который совершил один виток за 108 мин. вокруг Земли. *Это был ПЕРВЫЙ ВЗГЛЯД человека из космоса на Землю, т.е. ПЕРВЫЕ визуальные наблюдения поверхности и ореола Земли, когда ВПЕРВЫЕ человек увидел "КОСМИЧЕСКУЮ ЗАРЮ"*.

Полеты Г.С. Титова на ПКК "Восток-2" (август 1961), А.Г. Николаева на ПКК "Восток-3" и П.Р. Поповича на ПКК "Восток-4" (август 1962) расширили представления о возможностях визуальных наблюдений. Г.С. Титов 6 августа 1961 г. в начале второго витка ПКК "Восток-2" *ВПЕРВЫЕ в мире провел киносъемку Земли из космоса.*

В.Ф. Быковский на ПКК "Восток-5" и В.В. Терешкова на ПКК "Восток-6" (июнь 1963) *впервые сфотографировали дневной и сумеречный горизонты Земли — провели первый научный эксперимент из космоса.* Было положено начало инструментальным

исследованиям оптически активных компонентов атмосферы с ПКК. Теоретическое обоснование этих экспериментов провел Г.В. Розенберг. Математическое моделирование обеспечила Т.А. Сушкевич [4].

С ПКК "Союз-5" (Б.В. Волинов, Е.В. Хрунов, январь 1969) под руководством К.Я. Кондратьева начались спектрографические эксперименты. Были получены первые в мире спектры излучения атмосферы и поверхности Земли в видимой области спектра. Фотографирование и спектрографирование космической зари позволило одновременно получать дополняющие друг друга сведения о пространственной и спектральной структуре излучения и атмосферы Земли, в частности, об аэрозольных и озоновых слоях.

Под руководством К.Я. Кондратьева с ПКК "Союз-7" (В.Н. Волков, В.В. Горбатко, октябрь 1969) впервые осуществлен совмещенный эксперимент по фотографированию отдельных участков территории СССР с самолетов и из космоса в интересах изучения влияния передаточной функции атмосферы на результаты оптических наблюдений из космоса, а на ПКК "Союз-9" (А.Г. Николаев, В.И. Севастьянов, июнь 1970) в интересах метеорологического прогнозирования. Фотографирование геолого-географических объектов совмещалось с аэросъемками. С ПКК "Союз-12" (В.Г. Лазарев, О.Г. Макаров, сентябрь 1973) параллельно со спектрографированием земной поверхности проведена первая спектрально-зональная съемка отдельных участков Земли. Многозональное фотографирование и спектрометрирование атмосферы и поверхности Земли выполнено с ПКК "Союз-13" (П.И. Климук, В.В. Лебедев, декабрь 1973).

А.В. Филипченко и Н.Н. Рукавишников с ПКК "Союз-16" (декабрь 1974) впервые провели фотографирование земной поверхности и атмосферы в поляризованном свете на трассе протяженностью около 30 тыс. км. По программе "Союз-Аполлон" с ПКК "Союз-19" (июль 1975) оптические исследования проводились А.А. Леоновым и В.Н. Кубасовым. Эксперимент по наблюдениям последствий газовых и аэрозольных выбросов из вулкана в стратосферу подготовили Г.В. Розенберг и А.Б. Сандомирский, в обработке космических данных принял участие Ю.Д. Матешвили, а моделирование обеспечила Т.А. Сушкевич.

Отработка научно-технических методов и средств изучения из космоса поверхности Земли и ее геолого-географических характеристик проходила с ПКК "Союз-22" (В.Ф. Быковский, В.В. Аксенов, сентябрь 1976). Совмещение с самолетными съемками способствовало осуществлению первого полномасштабного эксперимента. Исследования акватории морей, океанов и поверхности суши, проведенные В.В. Коваленком и В.В. Рюминым с ПКК "Союз-25" (октябрь 1977), завершили научную космическую программу с ПКК.

После запуска в апреле 1971 г. ПЕРВОЙ ДОС "Салют" расширилась программа визуально-инструментальных оптических наблюдений Земли. 24 апреля 1971 года произошла ПЕРВАЯ стыковка ПКК "Союз-10" (В.А. Шаталов, А.С. Елисеев, Н.Н. Рукавишников) с ДОС "Салют". Начиная с ДОС "Салют-3" (июнь 1974) и на всех последующих ДОС "Салют-4" (декабрь 1974), "Салют-5" (июнь 1976), "Салют-6" (сентябрь 1977), "Салют-7" (апрель 1982), "Мир" (1986) выполнялась программа "космического землеобзора". В июле 1985 года прошел первый крупномасштабный комплексный международный эксперимент "Курск-85", когда наблюдения проводились одновременно с ДОС "Салют-7", ИСЗ, самолетов-лабораторий, вертолетов, наземных пунктов.

5. О супервычислениях и параллельных алгоритмах

К середине 70-ых годов благодаря работам советских и американских ученых фактически уже были заложены методические основы современных космических технологий дистанционного зондирования, которые в настоящее время являются массовыми и в них принимают участие ученые и специалисты из более 40 стран. Существенное отличие современных технологий от предыдущих касается, преимущественно, технологий приема, обработки и представления космических данных, т.е. лежит в области информационных тех-

нологий. *Космические исследования — это такая область фундаментальных и прикладных работ, которая с первых шагов своего становления не могла развиваться без использования ЭВМ.*

Освоение космического пространства послужило значительным фактором совершенствования ЭВМ и формирования *новых научных направлений, связанных с математическим моделированием радиационного поля Земли, теорией переноса изображения, теорией видения, теорией обработки и распознавания образов и т.д. Информационно-математическое обеспечение — обязательная составная часть любого космического проекта.* Вести "космические наблюдения" над чужой территорией запрещено международным правом, а потому наблюдения проводятся по наклонным и касательным направлениям. Для решения задач "ракетно-ядерного щита" и "космического землеобзора", а также "Лунной" программы с возвращением ракеты с Луны на Землю по её яркостному изображению и многих других приложений представляют интерес многомерные сферические и плоские модели радиационного поля [2].

Речь идет о кинетическом подходе к моделированию переноса электромагнитного излучения в природных и искусственных средах на основе общих краевых задачах для кинетического уравнения, которое является линеаризованным приближением уравнения Больцмана с бинарными столкновениями. Естественно, используется "дуализм", когда излучение можно рассматривать и как "электромагнитные волны" и как "частицы" (фотоны). До сих пор это одни из самых сложных задач теории переноса излучения, требующие огромных ресурсов и высокой производительности ЭВМ. В последнее десятилетие такие задачи решаются на суперкомпьютерах с распараллеливанием вычислений.

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 [2]:

- 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.

В Институте Келдыша Т.А. Сушкевич начинала на ЭВМ "Стрела" (1961 г.). После участия в сдаче ЭВМ "Весна" в августе 1964 года (параллельно осваивали "Восток", "М-20", "БЭСМ-4" и "АЛГОЛ") участвовала среди первых в освоении многих новых ЭВМ разных поколений и архитектур. Сферические многомерные модели переноса излучения, несмотря на их сложность и громоздкость численной реализации на первых поколениях ЭВМ (М-20, БЭСМ-4, БЭСМ-6, АС-6), в 60-е – 80-е годы имели исключительную актуальность в связи с проектированием и созданием ракетно-космических систем, освоением ближнего и дальнего космического пространства, организацией и проведением космических исследований и наблюдений. ЗАДАЧИ для сферической Земли на БЭСМ-6 считались по 300 часов (использовалась 14 МЛ и 6 МД, программа 25 тысяч перфокарт на Автокоде, 1965-1966 гг.) без потерь на внешние обмены, поскольку ВПЕРВЫЕ были реализованы возможности РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ расчета по ресурсам внутренней и внешней памяти: память была разбита на 4 "листа" и пока с одного "листа" памяти шла запись (чтение) на магнитную ленту, на другом "листе" накапливались результаты!

С 1989 года коллектив проводил испытания на всех поколениях и архитектурах суперкомпьютеров с распараллеливанием вычислений. Началось это под личным влиянием академика В.В. Воеводина и его первого доклада про параллельные алгоритмы в задачах алгебры на Конференции в МГУ в начале 80-ых годов. Это направление поддерживал академик Г.И. Марчук, будучи Председателем ГКНТ СССР, и по четвергам в "Зале коллегии" ГКНТ собирался Всесоюзный семинар, на котором обсуждались перспективные направления в развитии ЭВМ.

Созданный в Институте прикладной математики имени М.В. Келдыша АН СССР вычислительный аппарат использовался

- *для фундаментально-поисковых научных исследований по разработке методов и средств космических наблюдений,*
- *дистанционного зондирования из космоса,*
- *ориентации, стабилизации и навигации КА, астронавигации ракет,*
- *для интерпретации и анализа данных космических и комплексных экспериментов, проводимых на ПКК и ДЭС, а также аэростатных, самолетных и наземных наблюдений.*

Под руководством Т.А. Сушкевич продолжены работы по информационно-математическому аспекту космических исследований и супервычислениям с параллельными алгоритмами. При дистанционном зондировании и мониторинге технических объектов и окружающей среды носителем информации об их состоянии и свойствах является электромагнитное излучение, регистрируемое различными средствами. Представляют актуальность перспективные гиперспектральные системы нанодиагностики природной и техногенной среды на основе данных аэрокосмического дистанционного зондирования атмосферы и поверхности (объектов техносферы на поверхности). Для решения таких проблем требуется информационно-математическое обеспечение, включающее прямые и обратные задачи теории переноса излучения, модели которых основаны на передаточном операторе [2].

Используются следующие приемы распараллеливания вычислений для задач с поляризацией:

- (1) распределенные вычисления по физическим моделям:
 - многоспектральные (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 вектора параметров Стокса функций влияния;
 - по параметрам вектора параметров Стокса пространственно-частотных характеристик;
 - по компонентам матричных функционалов;
- (3) алгоритмическое распараллеливание для многомерных моделей:
 - однократное рассеяние по характеристикам;
 - многократное рассеяние по интегралам столкновений;
 - по квадрантам угловых разностных сеток;
 - по подобластям с разными сеточно-характеристическими схемами.

Основные составные части математического обеспечения:

- банки данных по оптико-метеорологическим моделям атмосферы и земной поверхности;
- система автоматизированного расчета спектро-энергетических и других радиационных характеристик атмосферы и Земли в различных диапазонах спектра от УФ до ММВ;
- банки данных радиационных характеристик (функции влияния локальных возмущений параметров или источников в атмосфере, дымах, облаках, гидрометеорах, океане и на земной поверхности, пространственно-угловые и спектральные распределения яркости системы Земля-атмосфера, функции пропускания и сферическое альbedo атмосферы и т.д.);
- пакеты программ обработки, визуализации и диагностики результатов численного эксперимента и аэрокосмических данных.

С учетом источников и процессов трансформации излучения выделяются четыре основные физико-математические модели, отвечающие спектральным диапазонам:

- оптический диапазон (источник — Солнце, многократное рассеяние);
- ближний ИК-диапазон (источники — Солнце и собственное излучение, многократное рассеяние);
- ИК-диапазон (источник — собственное излучение, без многократного рассеяния, сложная структура спектров поглощения);
- ММВ диапазон (источник — собственное радиоизлучение, многократное рассеяние в гидрометеорах и облаках, сложные спектры поглощения).

Создаваемая система содержит три группы программных комплексов, соответствующих трем этапам решения задачи для создания оперативных баз данных (спектральных радиационных атласов):

Первая группа программ — формирование оптико-метеорологических моделей среды:

- программы работы с архивом и базами данных моделей атмосферы, облаков, дымов, земной поверхности, океана;
- банк спектров поглощения атмосферных газов;
- банк характеристик аэрозольного рассеяния и поглощения;
- формирование модели атмосферы;
- пакеты данных к программам расчета радиационных характеристик и т.д.

Вторая группа программ — численное решение уравнения переноса излучения быстрыми приближенными и репрезентативными высокоточными методами:

- для плоской и сферической геометрии,
- для системы свободная атмосфера-дымовая завеса,
- для системы атмосфера-океан,
- для системы атмосфера с многоярусными облаками,
- для функции влияния атмосферы, дымов, облачности, гидрометеоров, океана,
- для функции пропускания атмосферы, отягощенной многократным рассеянием, и т.д.

Третья группа программ — обработка и диагностика результатов расчетов:

- расчет функционалов;
- аналитическая аппроксимация и параметризация табличных функций;
- компьютерная графика и визуализация;
- решение обратных задач по восстановлению параметров среды и т.д.

Предложенная архитектура программного обеспечения с функциональным наполнением, ориентированным на решение задач мониторинга развития и оценки последствий воздействия техногенных аварий и природных катастроф, а также природно-ресурсных, экологических, геоэкоинформационных и т.п. задач, позволяет осуществлять модификацию и адаптацию вычислительно-информационной системы применительно к конкретным проблемам математического моделирования радиационных процессов в системе Земля-атмосфера или восстановления набора параметров зондируемой среды.

В настоящее время, в отличие от момента начала работ в 60-е годы, благодаря активному развитию теоретических и экспериментальных исследований по проблемам светорассеяния, а также систем космических наблюдений мы располагаем достаточно достоверными данными

- о тонкой структуре полос поглощения водяного пара и газовых компонент атмосферы и способах учета этих данных для математического моделирования радиационного переноса в поглощающей реальной атмосфере;
- о коэффициентах и индикатрисах рассеяния атмосферы с учетом аэрозольных примесей;
- об отражающих свойствах естественных поверхностей;
- о географических, сезонных, суточных распределениях, вариациях и статистических характеристиках влажности, давления, температуры, концентраций газовых и аэрозольных компонент и облачности, имеющих случайный характер и играющих основную роль в изменчивости радиационного поля Земли.

Каждая из этих моделей описывается совокупностью оптико-метеорологических (гео-

физических) характеристик атмосферы, облаков, подстилающей поверхности, которые являются входными физическими данными для уравнения переноса (через коэффициенты, граничные условия, источники).

6. Заключение

Всемирная система мониторинга и иерархия моделей — главные инструменты для прогнозирования изменений в природных процессах и разделения естественных и антропогенных воздействий.

Одно из важных направлений Федеральной программы по космосу связано с использованием космических данных для оптимального управления регионами с целью обеспечения их устойчивого развития.

В масштабах планеты стоит актуальная проблема создания международного глобального мониторинга Земли с целью исследования её эволюции и прогнозирования естественно-природных стихийных бедствий и антропогенно-техногенных катастрофических процессов.

Это грандиозные задачи, решение которых требует разработки нанотехнологий для космических проектов, в частности, гиперспектральной аппаратуры дистанционного зондирования и миниспутников и математического моделирования больших задач.

Литература

1. Губарев В.С. Русский космос (Сверхдержава. Русский прорыв). М.: АЛГОРИТМ, 2006. 464 с.
2. Сушкевич Т.А. Математические модели переноса излучения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. 661 с.
3. Сушкевич Т.А. О пионерских работах по математическому моделированию радиационного поля Земли при освоении космоса / Методы и алгоритмы обработки спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Институт космических исследований РАН. Сборник научных статей. Выпуск 5. Том 1. М.: ООО "Азбука-2000", 2008. С. 165–180. ISSN 2070-7401.
4. Сушкевич Т.А. К истории первого научного эксперимента по дистанционному зондированию Земли на пилотируемом космическом корабле / Вопросы создания и использования приборов и систем для спутникового мониторинга состояния окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Институт космических исследований РАН. Сборник научных статей. Выпуск 5. Том 1. М.: ООО "Азбука-2000", 2008. С. 315–322. ISSN 2070-7401.
5. Sushkevich T.A. Pioneering remote sensing in the USSR. 1. Radiation transfer in the optical wavelength region of the electromagnetic spectrum // International Journal of Remote Sensing, Vol. 29, N. 9. P. 2585–2597.
6. Sushkevich T.A. Pioneering Remote Sensing in the USSR. 2. Global spherical models of radiation transfer // International Journal of Remote Sensing, Vol. 29, N. 9. P. 2599–2613.