

# О пионерских работах по математическому моделированию радиационного поля Земли при освоении космоса

Т.А. Сушкевич

*Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН (ИПМ РАН)*

*125047 Москва, Мусская пл., 4*

*E-mail: [tamaras@keldyshl.ru](mailto:tamaras@keldyshl.ru)*

Этот обзор ученым старшего поколения напомнит о некоторых исторических страницах нашей памяти и многих знакомых ученых, учителях и коллегах, а молодым специалистам и зарубежным коллегам будет полезно познакомиться с пионерскими достижениями советских ученых в области информационно-математического обеспечения задач космонавтики на заре космической эры. Основное внимание уделено научным экспериментам, осуществленным на пилотируемых космических кораблях, и научным коллективам, которые создали информационно-математическое обеспечение первых космических проектов. И, конечно, отмечена роль Мстислава Всеволодовича Келдыша – Главного Теоретика космонавтики, который фактически во многом определил основные направления развития космических исследований и дистанционного зондирования Земли и планет, которое кратко и ёмко назвали REMOTE SENSING.

## Введение

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, "кораблей-спутников" с космонавтами на борту и орбитальных долгосрочных станций советские ученые были первыми в мировой истории науки и техники, а специалисты США, Франции и других стран следовали за достижениями Советского Союза (СССР).

Настоящий обзор посвящается 50-летию запуска в Советском Союзе 04 октября 1957 года первого в истории цивилизации человечества искусственного спутника Земли (ИСЗ) и первопроходцам в освоении космического пространства и космических технологий:

- космонавтам-исследователям на первых пилотируемых космических кораблях (ПКК) и долгосрочных орбитальных станциях (ДОС) Ю.А.Гагарину, Г.С.Титову, А.Г.Николаеву, П.Р.Поповичу, В.В.Терешковой, В.Ф.Быковскому, А.В.Филипченко, Н.Н.Рукавишникову, А.А.Леонову, В.Н.Кубасову, В.А.Шаталову, А.С.Елисееву, В.И.Севастьянову, В.Г.Лазареву, О.Г.Макарову, П.И.Климуку, В.В.Лебедеву, Б.В.Волынову, Е.Б.Хрунову, В.Н.Волкову, В.С.Комарову, В.В.Горбатко, В.В.Аксенову, В.В.Коваленку, В.В.Рюмину, Г.Т.Береговому и др., а также Г.М.Гречко и член-корреспондентам РАН В.П.Савиных и В.В.Лебедеву, которые защитили докторские диссертации по материалам космических атмосферно-оптических исследований и дистанционного зондирования Земли из космоса;

- советским ученым, внесшим значимый вклад в становление космических исследований, М.В.Келдышу, А.Н.Тихонову, А.М.Обухову, К.Я.Кондратьеву, В.В.Соболеву, Г.И.Марчуку, Г.А.Михайлову, А.И.Лазареву, М.М.Мирошникову, Е.О.Федоровой, В.П.Козлову, В.Н.Сергеевичу, И.И.Кокшарову, Л.И.Чапурскому, Е.С.Кузнецову, Т.А.Гермогеновой,

М.В.Масленникову, М.С.Малкевичу, Г.В.Розенбергу, А.Б.Сандомирскому, Л.А.Пахомову, В.А.Амбарцумяну, И.Н.Минину, О.И.Смоктию, А.А.Бузникову, А.П.Гальцеву, О.Б.Васильеву, Ю.М.Тимофееву, О.М.Покровскому, В.М.Орлову, В.В.Козодерову, А.П.Тищенко, В.Н.Досову, М.А.Назаралиеву, Б.А.Каргину, Ч.Й.Виллману, О.А.Авасте, В.Е.Зуеву, М.В.Кабанову, В.Г.Золотухину, Д.А.Усикову, А.К.Городецкому, В.В.Бадаеву и др.

Автор обзора начала работать в Институте Келдыша Академии наук СССР после окончания физического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова (кафедра А.Н.Тихонова "математическая физика") и уже с 1961-1965 годов была лично знакома и сотрудничала со многими ведущими учеными, о которых идет речь ниже.

### **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.

Компьютер явился главным действующим лицом, основным двигателем НТР: использование ядерной энергии, полет в космос, информационные технологии, естественно, были бы невозможны без ЭВМ.

Два эпохальных научных проекта - атомный и космический - способствовали колоссальному развитию советской науки, которая могла конкурировать с мировой наукой XX века. 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 были установлены одни из первых ЭВМ, а 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. В 50-ые годы 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 специального назначения. В Обнинске Гурий Иванович подготовил первую книгу по теории и алгоритмам решения задач теории переноса [1]. Здесь же в 1961 году вместе с В.В.Орловым была опубликована первая статья по теории сопряженных решений и функции ценностей [2], а позже "функции ценности" как подход к решению обратных задач Г.И.Марчук внедрил в космические исследования и обработку данных метеорологических спутников [3].

В Арзамасе многие вычислительные задачи по атомному проекту были выполнены под руководством Василия Сергеевича Владимирова, который познакомился с Г.И.Марчуком ещё в годы студенчества на математико-механическом факультете Ленинградского Государственного Университета (ЛГУ) и дружит с ним до сих пор [4]. По теоретическим результатам была защищена докторская диссертация, на основе которой в 1961 году вышел широко известный обзор В.С.Владимирова "Математические задачи односкоростной теории переноса частиц" [5], который до сих пор является "настойной книгой" для ученых разных поколений.

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. [6]. 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 (10.02.1911-24.06.1978) 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 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.

Настоящий обзор ориентирован 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 были 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.

В настоящее время возрастает роль "космического земледения" 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 земледения, 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 земледение - 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, международного глобального проекта по изучению эволюции Земли, климата и опасных явлений требуется разработка нового математического обеспечения для решения прямых и об-

ратных задач теории переноса излучения в природных средах, реализуемого на высокопроизводительных многопроцессорных супер-ЭВМ.

А как это начиналось? Кто заложил основы дистанционного зондирования и получил первые результаты? Полезно почитать книгу В.С.Губарева "Русский космос" [7].

В истории нашей 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. Очень велика была роль Мстислава Всеволодовича Келдыша. В 1946 году М.В.Келдыш распростился с ЦАГИ, так как был назначен начальником Реактивного научно-исследовательского института (НИИ-1) и впоследствии оставался его научным руководителем до 1961 года. В 1953 году здесь были предложены и проанализированы оптимальные схемы составных ракет; баллистический спуск космического аппарата с орбиты и показана возможность его использования для возвращения космонавтов; возможная стабилизация аппарата посредством использования поля земного тяготения и многие другие идеи. М.В.Келдыш считался Главным Теоретиком космонавтики и действительно был организатором математической школы, которая обеспечила решение многих практических задач ракетодинамики, баллистики и навигации космических полетов.

Для атомной тематики М.В.Келдыш создал и возглавил "расчетное бюро", которое вместе с его отделом механики в Математическом институте Академии наук СССР имени В.А.Стеклова (МИАН) явилось частью организованного в 1953 году (Постановление от 27.04.1953) Отделения прикладной математики МИАН СССР (на правах института) – ОПМ. Из Геофизического института АН СССР в ОПМ перевели спецлабораторию А.Н.Тихонова. В ОПМ 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. Это был первый в мировой науке Институт прикладной математики, который в 1953 году переехал в историческое здание по адресу: Миусская площадь, дом 4, где с 1912 года находился Физический институт. Только в 1970 году благодаря содействию М.В.Келдыша и А.Н.Тихонова был открыт первый факультет такого профиля - "факультет вычислительной математики и кибернетики" в Московском Государственном Университете имени М.В.Ломоносова и специальность "прикладная математика".

В феврале 1954 года в кабинете М.В.Келдыша (с 1981 года это Мемориальный музей-кабинет академика М.В.Келдыша) в ОПМ 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.

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;

28 января 1960 г. - 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;

1961 г. (19 мая) - 1975 г. (19 мая) - Президент Академии наук СССР.

Для всей страны М.В.Келдыш был великим ее гражданином, выдающимся ученым и организатором науки, одним из трех "К" (И.В.Курчатов, М.В.Келдыш, С.П.Королев) – 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. [www.keldysh.ru](http://www.keldysh.ru)).

В ОПМ 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, многоразовой 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.

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 его указанию летом 1955 года из Академии наук 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. В январе 1956 года была организована Специальная комиссия по объекту "Д", которую возглавил М.В.Келдыш, С.П.Королев и М.К.Тихонравов – его заместители, ученый секретарь Г.А.Скуридин. Первый спутник имел шифр "ПС-1" – "простой спутник первый". "Корабль-спутник" - так называл С.П.Королев спутник с космонавтом.

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 [8]. 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. Выступали и сотрудники ОПМ МИАН АН 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 искусственного спутника Земли серии "Космос" положил начало осуществлению ком-

плексной научной программы оптических исследований и дистанционного зондирования околоземного космического пространства и Земли [9-12].

После первых запусков беспилотных космических кораблей 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. Военные и гражданские, научно-технические и научно-исследовательские проекты выполнялись как взаимно дополняющие. Для обобщения информации и обмена данными космических наблюдений были созданы специальные Межведомственные Научно-Технические Советы.

С 5 по 12 августа 1964 года по приглашению Академии наук СССР в Ленинграде работал очередной Международный симпозиум по исследованию радиационных процессов, созываемый раз в три года Комиссией по радиации Международной ассоциации метеорологии и физики атмосферы [13]. Среди участников представители 26 стран, из СССР 119 участников, из США - 45 человек. Иностранцев 107. 145 докладов. Открыл симпозиум Президент Международной комиссии по радиации Ф.Мёлер (ФРГ). Приветствовал президент Международной ассоциации метеорологии и физики атмосферы А.М.Обухов. Среди участников много знакомых фамилий: М.И.Будыко, Г.В.Розенберг, Л.М.Романова, Е.М.Фейгельсон, К.С.Шифрин, В.В.Иванов, Г.И.Марчук, В.В.Соболев, М.С.Малкевич, О.А.Авасте, Р.Мулламаа, Е.В.Пясковская-Фесенкова, А.Я.Перельман, Г.М.Швед, В.А.Барышев, В.И.Дианов-Клоков, Б.С.Непорент и М.С.Киселева, А.М.Броунштейн, В.Е.Зуев, М.В.Кабанов, Б.П.Кошелев, С.Д.Творогов, С.С.Хмелевцев и др.

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).

Только в 1966 году, после кончины С.П.Королева, появилась вывеска и 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". Но на международных мероприятиях сотрудники Института Келдыша ещё долго регистрировались как сотрудники Математического института имени В.А.Стеклова 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 народнохозяйственных 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.

В условиях России сохранился Совет по космосу РАН и Президент РАН являлся его Председателем, но в последние годы Председателя назначают из числа вице-президентов Президиума РАН. Однако Совет по космосу РАН не функционирует так же активно, как в СССР, и для разных функций используется Исполнительное бюро по космосу РАН. После большого перерыва в октябре 2005 года вышла Федеральная программа по космосу, направленная на неотложные меры по реанимации космонавтики. В настоящее время ситуация меняется: идет подготовка Федеральной программы по космосу на перспективу до 2020 и 2030 гг.

На прошедшем 1-5 октября 2007 года Международном космическом форуме "Космос: наука и проблемы XXI века", посвященном 50-летию запуска первого искусственного спутника Земли, 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.

### **К истории атмосферно-оптических исследований из космоса**

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:

- 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 земледевия".

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 [11-12]. 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 из космоса на Землю, т.е. первые визуальные наблюдения поверхности и ореола Земли*.

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. Этому достижению посвящена статья "К истории первого научного эксперимента по дистанционному зондированию Земли на пилотируемом космическом корабле" [14].

С ПКК "Союз-5" (Б.В.Волынов, 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.Филиппченко 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 [15].

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"* значительно расширилась программа визуально-инструментальных оптических наблюдений Земли. 24 апреля 1971 года произошла *первая стыковка ПКК "Союз-10"* (В.А.Шаталов, А.С.Елисейев, 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.

Становление, развитие и достижения оптических космических исследований нашли свое отражение в многочисленных монографиях, трудах, тематических сборниках. Более 800 ссылок содержится в обзорах [16-18].

## Научные коллективы

Следует обратить внимание на то, что на заре космической эры к работам были привлечены наиболее сильные специалисты (преимущественно, математики и физики) и разрабатывались са-

мые сложные модели радиационного поля Земли и передаточных характеристик системы “атмосфера - земная поверхность (суша, океан)”, практически с нулевого уровня. При этом многие методические работы советских ученых превосходили аналогичные работы зарубежных ученых, которые со всего мира приглашались в США.

Пионерские информационно-математические и теоретико-расчетные исследования при проектировании и реализации первых космических аппаратов, а также первых космических оптических экспериментов не случайно осуществлялись тремя ведущими коллективами специалистов по (математическому) моделированию переноса излучения в природных средах на ЭВМ, которые сформировались под руководством

- К.Я.Кондратьева и В.В.Соболева в Ленинграде;
- М.В.Келдыша, А.Н.Тихонова, Е.С.Кузнецова и А.М.Обухова в Москве;
- Г.И.Марчука и Г.А.Михайлова в Новосибирске.

В 40-50-ые годы 20-го века А.Н.Тихонов, Е.С.Кузнецов, А.М.Обухов, Г.В.Розенберг, К.Я.Кондратьев и Г.И.Марчук сотрудничали в Геофизическом Институте АН СССР, который основал академик О.Ю.Шмидт. Отто Юльевич Шмидт (1891-1956) в 1937 году на основе Института географии АН СССР организовал Институт Теоретической геофизики АН СССР, директором которого он и был. В 1946 году путем объединения Института Теоретической геофизики и Института Сейсмологии (в этом Институте работал С.Л.Соболев) был организован Геофизический институт АН СССР, директором которого до начала 1949 года был О.Ю.Шмидт. В 1949 году в связи с болезнью О.Ю.Шмидта директором Геофизического института АН СССР был назначен академик Г.А.Гамбургев.

В 1949 году по окончании математико-механического факультета ЛГУ Гурий Иванович Марчук специальным распоряжением был направлен в Геофизический институт, где закончил аспирантуру (1949-1952) и защитил кандидатскую диссертацию. В этот же Институт был направлен Кирилл Яковлевич Кондратьев после окончания математико-механического факультета ЛГУ, где его научным руководителем был Виктор Викторович Соболев. В Геофизическом институте в это время работали Е.С.Кузнецов, А.М.Обухов, Г.В.Розенберг. А.Н.Тихонов, будучи заведующим кафедры математики на физическом факультете МГУ, по-совместительству заведовал спецлабораторией Геофизического института. По-совместительству там же работал А.Н.Колмогоров.

Фактически большинство первых специалистов по освоению космических технологий являлись выпускниками ЛГУ и МГУ имени М.В.Ломоносова.

К.Я.Кондратьев и Г.И.Марчук были не только руководителями-организаторами космических исследований (и главными редакторами журнала "Исследование Земли из космоса"), но и большими друзьями со времен обучения в Ленинградском университете. На протяжении многих лет К.Я.Кондратьев сотрудничал с Лабораторией Г.А.Михайлова, который также закончил математико-механический факультет ЛГУ.

Так случилось, что именно с 1957 года Кирилл Яковлевич Кондратьев заведовал кафедрой физики атмосферы на физическом факультете Ленинградского государственного университета и уже выпустил монографии по лучистому теплообмену [19-20]. С первых лет освоения космоса и становления космических систем наблюдений и дистанционного зондирования, а также спутниковой метеорологии К.Я.Кондратьев являлся одним из ведущих руководителей-организаторов космических исследований и первых космических и подспутниковых экспериментов, что нашло отражение в его многочисленных монографиях. По этим монографиям получали информацию многие советские ученые, которые не могли выезжать за границу. К.Я.Кондратьев представлял советских ученых во многих международных комитетах, комиссиях, союзах и т.п., а также на конгрессах, конференциях, симпозиумах и т.д.

В Ленинградском Государственном Университете и Главной Геофизической Обсерватории работали группы под руководством В.В.Соболева и К.Я.Кондратьева. По проблемам переноса лучистой энергии в атмосферах звезд и планет вышли монографии В.А.Амбарцумяна (1960) и В.В.Соболева (1956; 1962), которые работали на кафедре астрофизики математико-механического

факультета ЛГУ. В Астрономической обсерватории Ленинградского университета с середины 50-х годов в исследования по теории многократного рассеяния включились многочисленные ученики академика В.В.Соболева, и к началу 60-х годов в основном сформировалась ленинградская научная школа по теории переноса излучения. Одним из представителей этой научной школы явился И.Н.Минин. Еще в период работы в Главной геофизической обсерватории (1954-1957 гг.) он совместно с К.С.Шифриным решил ряд практических задач атмосферной оптики. По инициативе К.Я.Кондратьева коллектив В.В.Соболева был привлечен к работам по освоению космоса и тогда появились первые работы В.В.Соболева и И.Н.Минина по приближенным моделям рассеяния света в сферической атмосфере (1962; 1963; 1964), которые далее вошли в монографии В.В.Соболева (1972) и И.Н.Минина (1988). Постановки задач исходили от К.Я.Кондратьева.

В.В.Соболев, И.Н.Минин и О.И.Смокий разработали первую комбинированную плоско-сферическую модель земной атмосферы в "приближении В.В.Соболева": однократное рассеяние для сферически-симметричного слоя, многократное рассеяние учитывалось частично в диффузионном приближении для плоского слоя. Олег Иванович Смокий - ученик К.Я.Кондратьева и В.В.Соболева - с начала 60-ых годов являлся ведущим специалистом по теоретико-расчетным исследованиям (по математическому моделированию, как сейчас принято называть), которые проводились под руководством К.Я.Кондратьева.

В Москве к этому времени из учеников Е.С.Кузнецова сформировалась научная школа по теории переноса. Проблемами переноса излучения Е.С.Кузнецов занимался с 1925 года [6] и под его редакцией в 1953 году вышло русское издание книги С.Чандрасекара "Перенос лучистой энергии". В эту школу входили в основном выпускники физического и механико-математического факультетов МГУ - сотрудники Института прикладной математики АН СССР и Института физики атмосферы АН СССР (основан в 1956), директором которого был академик А.М.Обухов. Теоретико-расчетные радиационные исследования проводились в отделе "Кинетические уравнения" Института Келдыша, в котором работали М.В.Масленников, Т.А.Гермогенова, М.Г.Кузьмина, Т.А.Сушкевич - последняя ученица Е.С.Кузнецова (скончался в 1966 году) и другие ученики Е.С.Кузнецова. В Институте Обухова теоретические и экспериментальные радиационные исследования проводились в отделе Г.В.Розенберга, в котором работали М.С.Малкевич, Е.М.Фейгельсон, Л.М.Романова и другие ученики Е.С.Кузнецова.

Более 40 лет назад Т.А.Сушкевич разработала первую в мире модель переноса солнечного излучения в сферической атмосфере Земли в масштабах планеты [21], на основе которой были получены пионерские результаты по дистанционному зондированию аэрозольных и озоновых слоев, а также решены многие прикладные задачи освоения космического пространства и становления космических исследований. В 70-ые годы стали активно развиваться работы по передаточному оператору. Теоретические основы этих исследований опубликованы в монографии Т.А.Сушкевич "Математические модели переноса излучения" [22]. В.Г.Бондур, А.С.Викторов, А.М.Волков, А.С.Исаев, В.В.Козодеров, Г.Н.Коровин, Л.А.Макриденко, В.А.Малинников, Г.М.Полищук, В.И.Сухих, С.А.Ушаков, В.П.Савиных, О.И.Смокий, Т.А.Сушкевич получили Премию Правительства РФ в области науки и техники 2002 года за работу "Разработка и внедрение методов и технологий аэрокосмического мониторинга природной среды".

В 1964-1965 годах в Академгородке, Новосибирск, в Вычислительном Центре СО АН СССР (Институт вычислительной математики и математической геофизики), основателем и директором которого являлся академик Г.И.Марчук, сформировалась Лаборатория по статистическому моделированию и методам Монте-Карло, основателем и руководителем которой является Г.А.Михайлов. В 1965 году Г.И.Марчук пригласил Г.А.Михайлова работать в Вычислительный центр, Академгородок, Новосибирск. Г.А.Михайлов закончил аспирантуру в Институте Келдыша, где получил подготовку по методам статистического моделирования под руководством И.М.Гельфанда и Н.Н.Ченцова. Как специалист по методам Монте-Карло Г.А.Михайлов в 29 лет стал Лауреатом Ленинской премии за работы по атомному проекту, работая в Челябинске.

Под руководством Г.И.Марчука и Г.А.Михайлова были разработаны первые алгоритмы локальных расчетов методом Монте-Карло для сферической модели Земли - неоднородной газовой-аэрозольной оболочки, освещаемой внешним параллельным потоком солнечных лучей. Весомую роль в эффективности этих алгоритмов сыграл математический аппарат сопряженных уравнений, предложенный Г.И.Марчуком и развитый в работах Г.А.Михайлова, М.А.Назаралиева, В.С.Антюфеева, Р.А.Дарбиняна. В сущности, в этих работах впервые были предложены алгоритмы решения прямых и обратных задач теории переноса излучения в поисках ответа на вопрос об интерпретационной ценности радиационной информации. Это был поворотный момент: впервые в мировой практике метод Монте-Карло применялся для моделирования переноса солнечного излучения в атмосфере Земли. В настоящее время уже нет сомневающихся в результативности и эффективности метода Монте-Карло, который покорила современные суперкомпьютеры с параллельной архитектурой. В 1979 году коллективу ученых в составе Г.И.Марчука (руководителя работы), Г.А.Михайлова, С.М.Ермакова, В.Г.Золотухина, Н.Н.Ченцова присуждена Госпремия "За цикл работ по развитию и применению метода статистического моделирования для решения многомерных задач теории переноса излучения".

### **Математическое моделирование и космические проекты**

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 технологий.

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 проводились по наклонным и касательным направлениям. Так что для решения задач "ракетно-ядерного щита" и "космического землеобзора", а также "Лунной" программы с возвращением ракеты с Луны на Землю по её яркостному изображению в первую очередь представляли интерес многомерные сферические и плоские модели радиационного поля. До сих пор это одни из самых сложных задач теории переноса излучения, требующие огромных ресурсов и высокой производительности ЭВМ [22]. В последнее десятилетие такие задачи решаются на суперкомпьютерах с распараллеливанием вычислений.

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 конце XIX века практически одновременно и независимо русским и немецким учеными было сформулировано скалярное уравнение переноса [23-24]. В 1889 году в Известиях Петербургской академии наук было опубликовано сочинение Ореста Даниловича Хвольсона "Основы математической теории внутренней диффузии света", в котором содержится вывод интегрального

уравнения теории многократного рассеяния света (статья была подготовлена в 1885 г.). Краткий реферат по докладу был опубликован в 1886 году в Журнале русского физико-химического общества.

В 1887 и 1889 гг. вышли статьи Е. Lommel (немецкий физик опередил работы Е.А. Milna) на ту же тему "Фотометрия диффузного отражения" и получено то же уравнение. Рассматривалось только изотропное рассеяние и в разложении учитывались только две кратности рассеяния. О. Хвольсон не ограничивает кратность рассеяния и даже рассматривает асимптотический режим, т.е. диффузионное приближение в глубине слоя. Опередил работы Е.А. Milna (1921, 1930). В 1989 году ученые отметили 100-летие уравнения переноса, которое было сформулировано русским профессором О.Д. Хвольсоном.

Но долго ещё их работы не замечали. Интегральные уравнения вновь появились через почти 25 лет в связи задачами о переносе излучения в атмосфере Земли и Солнце, но без ссылок... Первоначально теория переноса излучения развивалась преимущественно в области оптики и астрофизики при исследовании переноса лучистой энергии в атмосферах звезд и планет, в туманностях и межзвездной среде. В начале XX века уже были опубликованы астрофизические работы К. Шварцшильда, А. Шустера, Э. Милна, А. Эддингтона, Д. Джинса, Е. Хопфа и др.

В 1914 г. вышла статья астрофизика Карла Шварцшильда, которому принадлежит также двухпотокное приближение (Шварцшильда-Шустера). Шварцшильд указал на способ вывода интегрального уравнения, исходя из дифференциальной формы, а также на численное решение путем перехода к системе линейных алгебраических уравнений. Между 1915 и 1930 гг. становление теории переноса связано с Англией - это А. Эддингтон, Дж. Джинс и Э. Милн. В 1934 г. вышла книга немецкого ученого Э. Хопфа "Математические задачи лучистого переноса" - это первая книга такой направленности! Кстати, Хопф - соавтор метода Винера-Хопфа.

В 30-ые годы стали появляться статьи по переносу нейтронов, но геофизики и астрофизики ещё не понимали связи с чем это... Расцвет этого направления приходится на 50-ые годы в связи с работами по "атомному проекту" и важный вклад связан с именами Гурия Ивановича Марчука и Василия Сергеевича Владимирова.

Очередное существенное продвижение в теории переноса произошло в 40-ые годы, когда вышли публикации Е.С. Кузнецова, В.А. Амбарцумяна, С. Чандрасекара, В.В. Соболева и др. Следует отметить три наиболее значимых результата сороковых годов:

- сформулирована теория переноса в спектральных линиях;
- начались исследования по анизотропному рассеянию;
- началось изучение переноса поляризованного излучения.

Фундаментальный вклад в развитие теории переноса в XX веке в связи с работами по космическим исследованиям принадлежит советским ученым: В.А. Амбарцумяну, В.В. Соболеву, К.С. Шифрину, В.В. Иванову, И.Н. Минину, О.И. Смоктию, Г.А. Михайлову, а также московским ученым Г.И. Марчуку, В.С. Владимирову, Г.В. Розенбергу, Е.С. Кузнецову и его ученикам Е.М. Фейгельсон, Л.М. Романовой, М.С. Малкевичу, М.В. Масленникову, Т.А. Гермогеновой, М.Г. Кузьминой, Т.А. Сушкевич, С.А. Стрелкову и др.

Из зарубежных ученых необходимо отметить S. Chandrasekhar, J. Lenoble, Z. Sekera, J.V. Dave, R. Davies, J.W. Hovenier, Van de Hulst, J.E. Hansen, G.N. Plass, G.W. Kattawar, D.G. Collins, C.N. Adams, C.K. Whiney, Y.J. Kaufman, Y. Merler, D. Tanre, P.Y. Deschamps, R. Bellman, R. Kalaba, S. Ueno, W.J. Wiscombe, K.N. Liou et al.

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 [22]:

- 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.

Т.А.Сушкевич (Институт прикладной математики АН СССР) разрабатывала детерминированный подход к моделированию глобального поля излучения Земли: итерационным методом характеристик (ИМХ) была реализована на ЭВМ глобальная сферическая модель радиационного поля системы "атмосфера-Земля" в масштабах планеты. В постановке задач исследований и обсуждения результатов принимали участие Т.А.Гермогенова, М.В.Масленников, А.М.Обухов, М.С.Малкевич, Г.В.Розенберг, А.Б.Сандомирский, А.И.Лазарев, Е.О.Федорова, В.П.Козлов, В.Н.Сергеевич, И.И.Кокшаров, Ч.Й.Виллман, О.А.Авасте, В.Е.Плюта, Г.М.Гречко и др.

Проводился сравнительный анализ методов, которые использовались для интерпретации первых космических данных, в частности, спектрофотометрических измерений горизонта и фона Земли, а также съемок "космических зорь". Для сферической системы с осевой симметрией первые алгоритмы метода характеристик (без интерполяции и с интерполяцией) разработаны Т.А.Сушкевич. Частные случаи (при значительных ограничениях на структуру рассеивающей и поглощающей среды, а также условий освещения и наблюдения) интегрирования уравнения переноса в приближении однократного рассеяния содержатся в работах О.А.Авасте и О.И.Смоктя. Позже и в настоящее время практически во всех реализациях решения сферической задачи методом Монте-Карло приближение однократного рассеяния рассчитывается методом интегрирования по характеристикам, которые совпадают с траекториями световых лучей.

Приближенные подходы разрабатывал О.А.Авасте. Метод В.В.Соболева развивался Л.Г.Титарчуком. Сферические модели излучения планетных атмосфер вошли в диссертации И.Н.Минина, О.И.Смоктя, Г.А.Михайлова, Т.А.Сушкевич, Л.Г.Титарчука, М.А.Назаралиева, В.С.Антюфеева.

Первые попытки решения сферической задачи за рубежом (США) были предприняты Секерой и Ленобль [25], которые предложили использовать метод последовательных приближений, соответствующих разложению решения по малому параметру, взяв в качестве первого приближения решение плоской задачи, а в качестве малого параметра - отношение эффективной высоты однородной атмосферы к радиусу Земли. Большинство работ за рубежом выполняется методом Монте-Карло или приближенными численными методами. На уровне теории без практической реализации остался метод инвариантного погружения. Многопоточное приближение реализовано в пакете DART (США).

Задача дистанционного зондирования поверхности через атмосферу планеты обычно рассматривается в приближении плоской модели системы «атмосфера – земная поверхность». Развита эффективная методика атмосферной коррекции спутниковой информации. Модель передаточных свойств атмосферы представлена в форме линейного функционала – интеграла суперпозиции, лежащего в основе классического линейно-системного подхода. Оптический передаточный оператор построен математически строго и физически корректно методом функций влияния и пространственно-частотных характеристик. Функции влияния и пространственно-частотные характеристики системы "атмосфера - поверхность планеты" являются ядрами функционалов и объективными характеристиками, инвариантными относительно конкретных структур зондируемых объектов, условий освещенности и наблюдения. Пространственно-частотные характеристики вводятся как фурье-образы функции влияния по горизонтальным координатам.

Можно выделить следующие типы радиационных задач, требующих учета влияния поверхности планеты, отражающей излучение.

Первый тип - это задачи энергетики и радиационного баланса Земли, когда источником служит радиация Солнца и собственное излучение планеты. Такие задачи решаются преимущественно в приближении плоской модели земной оболочки с неявным или явным учетом вклада однородной ламбертовой или неортотропной подстилающей поверхности.

Второй тип - это задачи дистанционного зондирования атмосферы и облачности, когда земная поверхность является помехой.

Третий тип - это задачи дистанционного зондирования земной поверхности, когда необходимо устранить (провести атмосферную коррекцию) или достоверно учесть влияние атмосферы.

Разработана концепция линейно-системного подхода в задачах дистанционного зондирования. В любой активной или пассивной системе дистанционного зондирования земной поверхности всегда присутствуют четыре главные компоненты:

- (1) "сценарий", "сцена", т.е. распределение яркости наблюдаемых объектов или ландшафта;
- (2) атмосферный канал передачи изображения;
- (3) прибор регистрации электромагнитных волн;
- (4) комплекс обработки и распознавания изображения.

В трех компонентах проявляется влияние атмосферы: атмосферно-оптические механизмы воздействуют на формирование "сценария", на перенос его изображения через среду и учитываются в радиационной коррекции при анализе "сцен". Вследствие бесконечного многообразия возможных объектов наблюдения целесообразно использовать универсальный подход, который позволяет описывать весь канал наблюдения через объективные характеристики, инвариантные относительно конкретных структур зондируемых объектов, условий освещенности и визирования.

Такой подход широко применяется в классической оптике, в теориях видения, электрических цепей, оптико-электронных систем, фотографии, обработки изображений и известен как линейно-системный подход. Под системой следует понимать все то, что осуществляет преобразование ряда входных функций или воздействий в ряд выходных функций или реакций (откликов). Реакции систем на входные воздействия вследствие их аналогии можно описать некоторыми обобщенными характеристиками, определение которых не зависит от конкретного вида системы (электрической, оптической, радиофизической и т.д.). Общность состоит в том, что функциональное соотношение, связывающее входной и выходной двумерные сигналы системы имеет фундаментальный характер и известно как «интеграл суперпозиции», означающий, что линейная система полностью характеризуется суммой ее откликов на входные воздействия. Если выполняется условие пространственной инвариантности (изопланарности), то функция рассеяния системы, или функция рассеяния точки, зависит от разности аргументов и функционал принимает вид свертки.

С помощью теоремы о фурье-спектре свертки двумерный спектр выходного сигнала системы получается в виде произведения, где спектральная плотность входного сигнала (распределения яркости объекта). Спектральная плотность функции рассеяния называется передаточной функцией системы. Линейная (оптическая) система представляет собой линейный фильтр пространственных частот с коэффициентом передачи - пространственно-частотной характеристикой, которая в общем случае является комплексной функцией:

Концепция (оптической) пространственной фильтрации, т.е. манипулирование пространственными частотами с целью изменения или передачи свойств изображения, известна уже более 100 лет как результат работ Эрнста Аббе в 1873-1886 гг. (Abbe E. Arch. Microsc. 1873. V.9. P.413.). Эти работы оказали глубокое влияние на научную дисциплину, которая позже была названа фурье-оптикой (Применение методов фурье-оптики, 1982). Эта наука возникла на стыке классической оптики и теории информации. Результаты Аббе непосредственно привели к описанию отражающих оптических приборов как фильтров пространственных частот поля объекта.

Пространственная фильтрация оценивается с помощью пространственных и пространственно-частотных характеристик. Эта методика линейных преобразований в пространственной и пространственно-частотной областях, содержащая такие понятия, как импульсное воздействие (вместо точечного источника), импульсный отклик (вместо изображения точечного источника), может быть обобщена на системы с узкими и широкими мононаправленными пучками. В частности, такие пучки возникают в задачах для функций влияния при анизотропно отражающих поверхностях.

Атмосферный канал рассматривается как элемент оптической системы переноса излучения и теория (оптического) передаточного оператора формулируется, используя математический аппарат линейно-системного подхода и обобщенных функций влияния. Объективные характеристики:

функция размытия точки (ФРТ), оптическая передаточная функция (ОПФ), частотно-контрастная характеристика (ЧКХ), функция передачи модуляции (ФПМ), импульсно-переходная функция (ИПФ), функция рассеяния системы (ФР), пространственно-частотная характеристика (ПЧХ) другие характеристики качества изображения, воспроизводящих и передающих оптических, оптико-электронных, фотографических, кинематографических, телевизионных, радиотехнических, управляющих и прочих систем естественным путем переносятся на область теории переноса излучения в оптически-активных средах [22]. Метод функций влияния и теория передаточного оператора обобщены и развиты для задач со сферической геометрией.

Состояние методов расчета переноса излучения в рассеивающих и поглощающих атмосферах на 1990 год отражено в коллективной монографии [26], подготовленной под руководством Жакалин Ленобль – Президента Международной Комиссии по атмосферной радиации Международной ассоциации метеорологии и физики атмосферы. Не случайно ещё в 1964 году по приглашению Академии наук СССР в Ленинграде с 5 по 12 августа работал очередной Международный симпозиум по исследованию радиационных процессов [13], материалы которого представляют исторический интерес и свидетельствуют о признании высокого уровня работ советских ученых на заре космической эры.

Работа поддержана РФФИ (проект 06-01-00666) и Программой фундаментальных исследований РАН (проект ОМН-3(4)).

## Литература

1. *Марчук Г.И.* Численные методы расчета ядерных реакторов // М.: Атомиздат, 1958. 381 с.
2. *Марчук Г.И., Орлов В.В.* К теории сопряженных функций // В сб.: "Нейтронная физика", М.: Госатомиздат, 1961. С. 30-45.
3. *Марчук Г.И.* О постановке некоторых обранных задач // Докл. АН СССР, 1964, Т. 156, № 3, с. 503-506.
4. *Владимиров В.С.* Я – сын трудового народа // М.: ФАЗИС, 2007. 240 с.
5. *Владимиров В.С.* Математические задачи односкоростной теории переноса частиц // Труды МИАН им. В.А.Стеклова. Вып. 61. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 158 с.
6. *Кузнецов Е.С.* Избранные научные труды // М.: Физматлит, 2003. ??? с.
7. *Губарев В.С.* Русский космос (Сверхдержава. Русский прорыв) // М.: АЛГОРИТМ, 2006. 464 с.
8. 100-летие со дня рождения К.Э.Циолковского. Памятные даты (Чтения, заседания) // Вестник АН СССР, 1957, № 12, с. 102-107.
9. Исследования космического пространства // Труды Всесоюзной конференции по физике космического пространства, Москва, июнь 1965. Под ред. Г.А. Скуридина и др. М.: Наука, 1965. 623 с.
10. Космическая стрела. Оптические исследования атмосферы / / Под ред. А.М.Обухова и В.М.Ковтуненко. М.: Наука, 1974. 327 с.
11. *Лазарев А.И., Николаев А.Г., Хрунов Е.В.* Оптические исследования в космосе // Л.: Гидрометеиздат, 1979. 256 с.
12. *Лазарев А.И., Коваленок В.В., Авакян С.В.* Исследование Земли с пилотируемых космических кораблей // Л.: Гидрометеиздат, 1987. 400 с.
13. *Розенберг Г.В.* Международный симпозиум по исследованию радиационных процессов // Успехи физических наук. 1965. № 3. С. 564-577.
14. *Сушкевич Т.А.* К истории первого научного эксперимента по дистанционному зондированию Земли на пилотируемом космическом корабле // Настоящий сборник
15. *Розенберг Г.В., Сандомирский А.Б., Сушкевич Т.А., Матешвили Ю.Д.* Исследование стратификации аэрозоля в стратосфере по Программе "Союз-Аполлон" // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1980. Т. 16. № 4. С. 861-864.

16. Сушкевич Т.А., Максакова С.В. Обзор методов учета земной поверхности и задачах дистанционного зондирования в расчетах радиационного поля Земли – 2 // Препринт № 52. М.: ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, 1999. 32 с.
17. Сушкевич Т.А., Максакова С.В. Обзор методов учета земной поверхности и задачах дистанционного зондирования в расчетах радиационного поля Земли – 3 // Препринт № 53. М.: ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, 1999. 32 с.
18. Сушкевич Т.А., Максакова С.В. Обзор методов учета земной поверхности и задачах дистанционного зондирования в расчетах радиационного поля Земли – 4 // Препринт № 54. М.: ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, 1999. 32 с.
19. Кондратьев К.Я. Лучистая энергия солнца // Л.: Гидрометеиздат, 1954. 600 с.
20. Кондратьев К.Я. Лучистый теплообмен в атмосфере // Л.: Гидрометеиздат, 1956. 420 с.
21. Сушкевич Т.А. Осесимметричная задача о распространении излучения в сферической системе // Отчет № 0-572-66. М.: ИПМ АН СССР, 1966. 180 с.
22. Сушкевич Т.А. Математические модели переноса излучения // М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. 661 с.
23. Chwolson O.D. Grundzuge einer mathematischen Theorie der inneren Diffusion des Lichtes. Melanges physique et chimie Tires du Bulletin de l'Academie Imperiale des Sciences de St.-Petersbourgю 1889. Vol. XIII, № 3, pp. 83-90.
24. Иванов В.В. Столетие интегрального уравнения переноса излучения / Труды астрономической обсерватории. Т. XLIV. Ученые записки Санкт-Петербургского Университета № 428. Серия математических наук. Вып. 66. Доклады на Всесоюзном симпозиуме, посвященном 100-летию интегрального уравнения переноса излучения, Ленинград, октябрь 1990. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1994. 254 с.
25. Lenoble J., Sekera Z. Equation of radiative transfer in a planetary spherical atmosphere // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 1961. Vol. 47. № 3. P. 372--378.
26. Перенос радиации в рассеивающих и поглощающих атмосферах. Стандартные методы расчета // Под ред. Жаклин Ленобль. Перевод под ред К.С.Шифрина. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 263 с.