

К истории первого научного эксперимента по дистанционному зондированию Земли на пилотируемом космическом корабле

Т.А. Сушкевич

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

125047 Москва, Миусская пл., 4

E-mail: tamaras@keldyshl.ru

В июне 2008 года исполняется 45 лет с момента проведения первого в истории мировой науки научно-го эксперимента, осуществленного космонавтами на пилотируемых "кораблях-спутниках". Это был и первый научный эксперимент по дистанционному зондированию Земли из космоса. Основное внимание уделено научным коллективам, которые создали информационно-математическое обеспечение первых космических проектов, и истории первых фотометрических и спектрографических научных экспериментов, проведенных советскими космонавтами с пилотируемых космических кораблей.

Введение

Статья посвящается 45-летию осуществления в СССР в июне 1963 года первого научного эксперимента по дистанционному зондированию Земли космонавтами на пилотируемых "кораблях-спутниках". Валерий Федорович Быковский на ПКК "Восток-5" и Валентина Васильевна Терешкова на ПКК "Восток-6" (июнь 1963) *впервые сфотографировали дневной и сумеречный горизонты Земли - провели первый научный эксперимент из космоса*. На рис. 1. представлены примеры снимков горизонта Земли. Было положено *начало инструментальным исследованиям оптически активных компонентов атмосферы с ПКК*. Теоретическое обоснование этих экспериментов провел Георгий Владимирович Розенберг [1-4], о чем речь пойдет ниже.

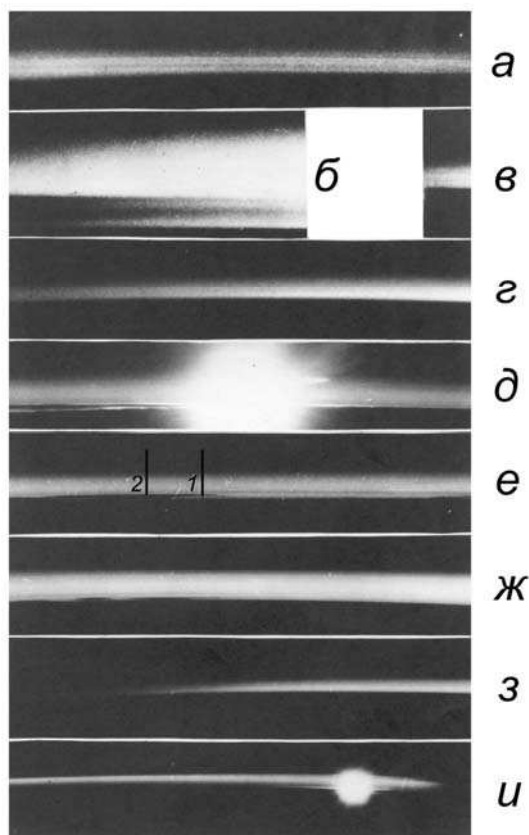


Рис. 1. Снимки горизонта Земли

С ПКК "Союз-5" (Борис Валентинович Волынов, Евгений Васильевич Хрунов, январь 1969) под руководством Кирилла Яковлевича Кондратьева начались спектрографические эксперименты. Были получены *первые в мире спектры излучения атмосферы и поверхности Земли в видимой области спектра*. Анатолий Васильевич Филипченко и Николай Николаевич Рукавишников с ПКК "Союз-16" (декабрь 1974) *впервые провели фотографирование земной поверхности и атмосферы в поляризованном свете* на трассе протяженностью около 30 тыс. км. На рис. 2 приведены примеры панорамных снимков горизонта Земли.

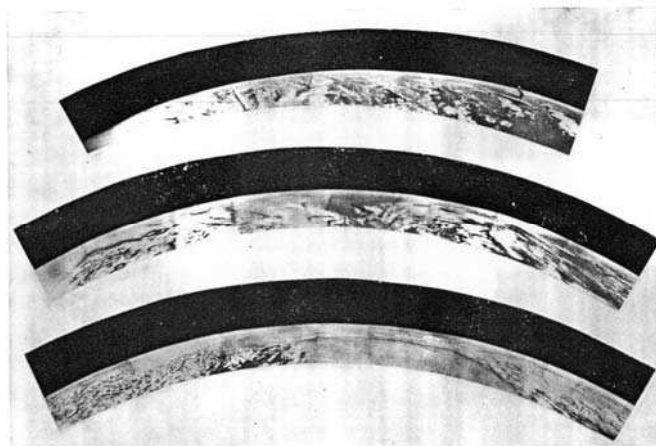


Рис. 2. Панорамные снимки горизонта Земли

По программе "Союз-Аполлон" с ПКК "Союз-19" (июль 1975) оптические исследования проводились Алексеем Архиповичем Леоновым и Валерием Николаевичем Кубасовым. *Эксперимент по наблюдениям последствий газовых и аэрозольных выбросов из вулкана в стратосфере* подготовили Георгий Владимирович Розенберг и Анатолий Борисович Сандомирский, а моделирование обеспечила Тамара Алексеевна Сушкевич [5-9].

Космонавт № 2 Георгий Степанович Титов 6 августа 1961 года в начале второго витка пилотируемого космического корабля (ПКК) "Восток-2" *впервые в мире провел киносъемку Земли из космоса*. Образец такого снимка Земли в терминаторе приведен на рис. 3, на котором черными и белыми точками помечены места сравнения натуральных данных и теоретико-расчетных результа-



Рис. 3. Снимок Земли в терминаторе

тов, полученных Т.А. Сушкевич. На рис. 4 показаны изолинии яркости Земли в терминаторе, а на рис. 5. представлен типичный профиль яркости Земли в терминаторе. Не случайно первые эксперименты на ПКК были направлены на изучение горизонта Земли в условиях наблюдений из космоса, поскольку такие эксперименты были наиболее информативными для установления высотной стратификации оптических параметров и состава атмосферы, с одной стороны, а с другой стороны, это было необходимо для разработки систем ПРО по упреждению стартов ракет.



Рис. 4. Изолинии яркости Земли в терминаторе

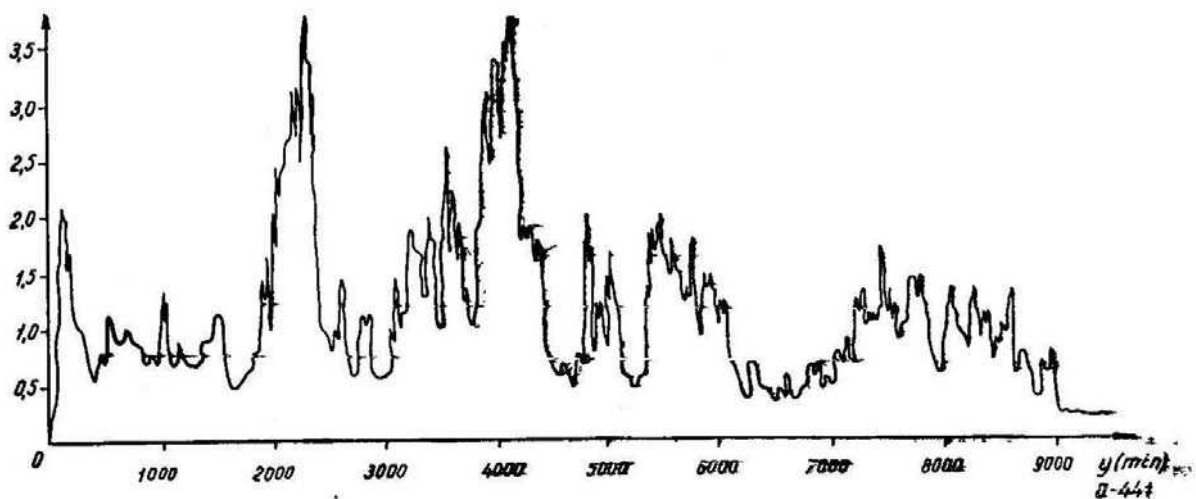


Рис. 5. Профиль яркости Земли в терминаторе

Было очевидно, что спектральная, пространственная и угловая структуры поля яркости Земли чрезвычайно сложны и требуется разработка сферических моделей поля излучения Земли, достаточно адекватно описывающих натурные условия. При решении такой задачи преуспели советские ученые.

К истории первого научного эксперимента из космоса

До начала космической эры сферические модели планетных атмосфер рассматривались в теории сумеречных явлений, в астрофизических исследованиях и в связи с проблемой лучистого теплообмена и равновесия. По мнению С.Чандрасекара, задача лучистого переноса в планетных атмосферах с учетом их сферичности анализировалась в работах W.McCrea (1928), Н.А.Козырева (1934), S.Chandrasekhar (1934), L.Gratton (1937). Это были модели однородной консервативной сферы с изотропным рассеянием. Астрофизики предпочитали приближенные явные способы решения задач теории переноса излучения. Численные методы, предложенные Е.С.Кузнецовым, В.С.Владимировым и Г.И.Марчуком, позволили существенно усложнить сферические модели и приблизить их к натурным условиям.

Проблема использования сумеречных явлений для оптического зондирования атмосферы впервые, после Альгазена (XI век) и Кеплера (1604), была выдвинута В.Г.Фесенковым (1923). Первые построения теории яркости, поляризации и рефракции света в атмосфере Земли основаны на геометрической картине освещения планеты солнечными лучами в условиях наблюдения с земной поверхности дневного и сумеречного неба. По мнению Г.В.Розенберга, впервые такая задача была сформулирована схематически Р.Grunner (1919). Приближения однократного рассеяния солнечного света в сферически симметричной земной атмосфере разрабатывались В.Г.Фесенковым (1923), F.Link (1933), Н.М.Штауде (1936), И.А.Хвостиковым (1936), Г.В.Розенбергом [1, 2] для применения фотометрических наблюдений сумерек как метода изучения стратосферы и верхней атмосферы.

Второй этап формирования сумеречного метода (с 1945 года) связан с выяснением роли вторично рассеянного света и началом ракетных исследований верхней атмосферы.

Эпохальным оказался третий этап - этап становления и совершенствования сумеречных исследований планетных атмосфер с космических аппаратов (КА). Г.В.Розенберг не только первым сформулировал такую задачу, но и впервые реализовал теоретические построения в первом инструментальном исследовании земной атмосферы с ПКК: 17 июня 1963 г. с борта с ПКК "Восток-6" были получены космонавтом первые в мире фотографические снимки края Земли с окружающим ее сумеречным и заревым ореолом, позволившие впервые установить и обосновать существование динамичных стратосферных аэрозольных слоев оптическими методами и средствами дистанционного зондирования с космических орбит.

Космические оптические наблюдения, сопровождающиеся репрезентативным математическим моделированием, позволили не только обнаружить, но и впервые исследовать оптическую структуру и динамику стратосферных аэрозольных и озоновых слоев методами дистанционного зондирования. Анализ и интерпретацию первых космических черно-белых, а позже цветных фотографических снимков и спектрограмм независимо проводили три научных коллектива:

- К.Я.Кондратьев, О.И.Смоктый в Ленинграде;
- Г.И.Марчук, Г.А.Михайлов, М.А.Назаралиев в Новосибирске;
- Г.В.Розенберг, А.Б.Сандомирский, Т.А.Сушкевич в Москве.

Публикации К.Я.Кондратьева, О.И.Смоктя [10-14] и Г.И.Марчука, Г.А.Михайлова [15-18] явились первыми в мире работами по численному имитационному моделированию условий проведения первых космических фотосъемок и спектрографии зари и сумерек.

На основе имитационного моделирования, выполненного Т.А.Сушкевич [5], и анализа результатов космических фотографий сумеречного горизонта Земли, проведенного Г.В.Розенбергом, А.Б.Сандомирским и Т.А.Сушкевич, стратосферные аэрозольные слои были обнаружены впервые из космоса. Впервые результаты исследований стратификации и динамики изменений эрозоля и озона в земной атмосфере с помощью оптического фотометрического дистанционного зондирования горизонта Земли с пилотируемых космических кораблей были получены экспериментально Г.В.Розенбергом и А.Б.Сандомирским с коллегами и с привлечением имитационного моделирования, проведенного Т.А.Сушкевич [19-21].

В.В.Соболев, И.Н.Минин и О.И.Смокий разработали первую комбинированную плоско-сферическую модель земной атмосферы в "приближении В.В.Соболева" [22-27]: 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. К.Я.Кондратьев и его коллеги на основе спектрографического дистанционного зондирования горизонта Земли с пилотируемых космических кораблей не только установили наличие стратификации озона и аэрозоля в земной атмосфере, но и исследовали его динамику [28-32].

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. Ученики Г.А.Михайлова многие годы активно сотрудничали с К.Я.Кондратьевым [33] и некоторое время с Г.В.Розенбергом.

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 из космоса. Параллельно развивались исследования по научно-фундаментальным проблемам метеорологии, океанологии, физики атмосферы, изучения природных ресурсов, дистанционного зондирования атмосферы, суши, океана, облачности, гидрометеоров.

Две концепции - фотометрия и спектрография, успешно реализованные в первых научных космических экспериментах, позволили на многие годы вперед заложить методические основы дистанционного зондирования атмосферы Земли и других планет. Эти пионерские работы подтвердили достоверность разработанных сферических моделей поля излучения Земли, которые в дальнейшем использовались для подготовки и реализации уникальных космических проектов, а также в опытно-конструкторских работах по проектированию космических систем разного назначения.

Запуск советской АМС "Зонд-5" впервые в мире позволил увидеть планету Земля с большого расстояния и осуществить ее фотометрирование, которое было продолжено с АМС "Зонд-6, 7, 8". Важным результатом научного фотографического (в нескольких спектральных интервалах) эксперимента было определение фотометрических характеристик планеты, коэффициентов яркости ее объектов, звездной величины Земли. При проектировании съемочной аппаратуры и фотометрическом анализе изображений Земли использовались результаты Т.А.Сушкевич по математическому моделированию яркостного поля сферической Земли с разными типами подстилающей поверхности.

Созданный в Институте прикладной математики имени М.В.Келдыша АН СССР в 60-е - 80-е годы 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.

Впервые были получены теоретико-расчетные результаты по моделям излучения Земли для проектов астронавигации по визированию восходящих и заходящих звезд; датчиков ориентации лунных аппаратов и космического комплекса "Луна-9", обеспечивающего возвращение ракеты с Луны на Землю, по яркостному лимбу Земли и планете Земля (впервые в мире были рассчитаны звездные величины и фазовые кривые планеты Земля для характерных состояний атмосферы и подстилающих поверхностей); приборов автоматической и ручной ориентации и стабилизации КА по яркостному горизонту Земли в ближнем космосе; фотосъемок и картографии Антарктиды ("Космос-2000"); оптико-электронных систем наблюдений и т.д.

В исследованиях по физике атмосферы и оптических свойствах различных компонентов атмосферы (аэрозоль, влажность, газовые примеси) с помощью космических экспериментов, проводимых на ПКК ("Восток-6", "Восход", "Союз-3, 4, 5, 6, 7, 8, 16", ДОС "Салют", "Мир", комплекс "Союз-Аполлон"), а также спектрофотометрии с ракет "Зонд-5, 7, 8" использованы численные результаты по глобальным моделям излучения сферической Земли и математическому моделированию для решения обратных задач восстановления высотной стратификации аэрозоля и озона в атмосфере Земли.

Впервые были оценены условия применимости (в частности, размытие за счет многократного рассеяния и подсветки от подстилающей поверхности) рефрактометрического метода при лимбовых исследованиях состава атмосферы из космоса (фото- и киносъемки захода Солнца с ДОС "Салют") и при визировании звезд по горизонтальным трассам через атмосферу с учетом влияния рефракции на пространственную структуру яркости горизонта Земли.

Созданные вычислительные средства существенно подняли уровень математического моделирования атмосферно-оптических явлений в земных условиях. Практическое применение результатов математического моделирования в Институте Келдыша осуществлялось в рамках директивных заданий, а также по Договорам о научном сотрудничестве со следующими организациями: ГОИ имени С.И.Вавилова, ГГО, ИФА АН, ИО АН, МГИ АН Украины, ИРЭ АН, ИКИ АН, ИФА АН, ИФ АН БССР, ЦАО, НПО "Планета", Физфак МГУ, ГОСНИЦИПР, ИЭМ, ИПГ, ЛГУ, ВНИИОФИ, Институт астрофизики КазССР, МИЭиА МАП, ИОА СО АН СССР, ЦКБ "Стрела", ЦКБ "Алмаз", ЦНИИ "Комета" МРП, НИИ-2 МО, Гос. НИПЦ "Природа", КБ "Южный", ЦСКБ "Сатурн", НПО им. Лавочкина, ЦНИИМАШ, ГИПО, Абастуманская обсерватория, ИАиА и Тартуская обсерватория АН ЭССР, Калининский политехнический институт и др.

В середине 70-х годов теоретико-расчетные исследования в области космических технологий принимают массовый характер. О приоритете отечественных работ по сферическим моделям планетных атмосфер свидетельствует и книга – обзор [34], подготовленный Жаклин Ленобль - Президентом Международной комиссии по атмосферной радиации Международной ассоциации метеорологии и физики атмосферы. Ж.Ленобль и Секера сформулировали первую сферическую модель излучения Земли [35], которая не была реализована, поскольку оказалась неэффективной для учета сферичности Земли и атмосферы.

Краткий обзор приоритетных работ по атмосферной коррекции спутниковых данных [36] опубликован при одобрении К.Я.Кондратьева – главного редактора журнала "Исследование Земли из космоса". Научному и организационному вкладу и роли К.Я.Кондратьева в становлении космических исследований и аэрокосмического дистанционного зондирования Земли посвящены мои обзоры [37, 38], опубликованные в специальном выпуске журнала, посвященном памяти К.Я.Кондратьева.

Сферические модели, с острой необходимостью разработанные на заре космической эры, в последние годы, особенно после принятия "Конвенции по климату" (Рио-де-Жанейро, 1992) и ряда межправительственных соглашений по охране озоносферы и глобальному мониторингу Земли, в том числе Соглашения более 40 стран (2005) о сотрудничестве, имеют повышенный интерес.

Работа поддержана РФФИ (проект № 06-01-00666) и Программой фундаментальных исследований РАН (проект ОМН-3(4)).

Литература

1. Розенберг Г.В. О новом явлении в рассеянном свете сумеречного неба // Докл. АН СССР, 1942. Т. 36. № 9. С. 288-293.
2. Розенберг Г.В. Сумерки // М.: ГИФМЛ, 1963. 380 с.
3. Розенберг Г.В. О сумеречных исследованиях планетных атмосфер с космических кораблей // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1965. Т. 1. № 4. С. 377-385.
4. Розенберг Г.В., Николаева-Терешкова В.В. Стратосферный аэрозоль по измерениям с космического корабля // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1965. Т. 1. № 4. С. 386-394.
5. Сушкевич Т.А. Осесимметричная задача о распространении излучения в сферической системе // Труды ИПМ АН СССР. О-572-66. М.: ИПМ АН СССР, 1966. 180 с.
6. Гермогенова Т.А., Сушкевич Т.А., Копрова Л.И. Исследование угловой, пространственной и спектральной структуры поля яркости Земли для характерной модели сферической атмосферы // Изв. АН СССР. Серия Физика атмосферы и океана, Т. 5. № 12, 1969. С. 1266-1277.
7. Численное решение задач атмосферной оптики // Под ред. М.В.Масленникова, Т.А.Сушкевич. Научные труды ИПМ им. М.В.Келдыша АН СССР. М.: ИПМ им. М.В.Келдыша АН СССР, 1984. 234 с.
8. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Иолтуховский А.А. Метод характеристик в задачах атмосферной оптики // М.: Наука, 1990. 296 с.
9. Сушкевич Т.А. Математические модели переноса излучения // М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. 661 с.
10. Смоктий О.И. Многократное рассеяние света в однородной сферически-симметричной планетной атмосфере // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1967. Т. 3. № 3. С. 245-257.
11. Смоктий О.И. Об определении яркости неоднородной сферически-симметричной планетной атмосферы // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1967. Т. 3. № 4. С. 384-393.
12. Смоктий О.И. Многократное рассеяние света в неоднородной сферически-симметричной планетной атмосфере // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1967. Т. 3. № 5. С. 496-506.
13. Смоктий О.И. Рассеяние света в аэрозольной сферической атмосфере // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1969. Т. 5. № 1. С. 46-61.
14. Смоктий О.И. Моделирование полей излучения в задачах космической спектрофотометрии // Л.: Наука, 1986. 352 с.
15. Марчук Г.И., Михайлов Г.А. О решении задач атмосферной оптики методом Монте-Карло // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1967. Т. 3. № 3. С. 258-273.
16. Марчук Г.И., Михайлов Г.А. Результаты решения некоторых задач атмосферной оптики методом Монте-Карло // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1967. Т. 3. № 4. С. 394-401.
17. Марчук Г.И., Михайлов Г.А., Назаралиев М.А., Дарбинян Р.А. Решение прямых и некоторых обратных задач атмосферной оптики методом Монте-Карло // Новосибирск: Наука, 1968. 100 с.
18. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике // Под ред. Г.И.Марчука. Новосибирск: Наука, 1976. 283 с.
19. Розенберг Г.В., Сандомирский А.Б., Сушкевич Т.А., Альтовская Н.П. Поле яркости зари, наблюдаемой с космических кораблей // Изв. АН СССР. Серия Физика атмосферы и океана, Т. 7. № 3. 1971. С. 279-290.
20. Розенберг Г.В., Сандомирский А.Б., Сушкевич Т.А., Альтовская Н.П. Некоторые результаты фотометрических исследований дневного горизонта Земли с космических кораблей "Союз-4" и "Союз-5" // Изв. АН СССР. Серия Физика атмосферы и океана, Т. 7. № 6. 1971. С. 590-598.
21. Розенберг Г.В., Сандомирский А.Б., Сушкевич Т.А., Матешвили Ю.Д. Исследование стратификации аэрозоля в стратосфере по программе "Союз-Аполлон" // Изв. АН СССР. Серия Физика атмосферы и океана, Т. 16. № 8. 1980. С. 861-864.
22. Соболев В.В. Перенос лучистой энергии в атмосферах звезд и планет // М.: Изд-во ГИТТЛ, 1956. 391 с.

23. *Соболев В.В., Минин И.Н.* Рассеяние света в сферической атмосфере – I // Искусственные спутники Земли. Вып. 14. М.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 7-12.
24. *Соболев В.В., Минин И.Н.* Рассеяние света в сферической атмосфере – II // Космич. исслед., 1963. Т. 1. № 2. С. 227-234.
25. *Соболев В.В., Минин И.Н.* Рассеяние света в сферической атмосфере – III // Космич. исслед., 1964. Т. 2. № 4. С. 610-618.
26. *Соболев В.В.* Рассеяние света в атмосферах планет // М.: Наука, 1972. 335 с.
27. *Минин И.Н.* Теория переноса излучения в атмосферах планет // М.: Наука, 1988. 264 с.
28. *Кондратьев К.Я., Авасте О.А., Федорова М.П., Якушевская К.Е.* Поле излучения Земли как планеты // Л.: Гидрометеиздат, 1967. 314 с.
29. *Кондратьев К.Я., Волюнов Б.В., Гальцев А.П., Кольцов В.В., Смоктий О.И., Хрунов Е.В.* Некоторые результаты визуальных наблюдений и спектрофотометрирования сумеречного ореола земной атмосферы с космического корабля "Союз-5" // Докл. АН СССР, 1970. Т. 190. № 2. С. 327-330.
30. *Кондратьев К.Я., Гальцев А.П., Смоктий О.И., Хрунов Е.В.* Визуальные оценки цвета сумеречного неба по наблюдениям с космического корабля "Союз-5" // Докл. АН СССР, 1970. Т. 191. № 4. С. 824-825.
31. *Кондратьев К.Я., Гальцев А.П., Смоктий О.И., Хрунов Е.В.* Колориметрия сумеречного неба по спектрам горизонта, полученным с космического корабля "Союз-5" // Докл. АН СССР, 1970. Т. 191. № 5. С. 1044-1047.
32. *Кондратьев К.Я., Волюнов Б.В., Гальцев А.П., Смоктий О.И., Хрунов Е.В.* Анализ результатов спектральных исследований сумеречного ореола земной атмосферы с космического корабля "Союз-5" // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1970. Т. 6. № 4. С. 388-411.
33. *Кондратьев К.Я., Марчук Г.И., Бузников А.А., Минин И.Н., Михайлов Г.А., Назаралиев М.А., Орлов В.М., Смоктий О.И.* Поле излучения сферической атмосферы // Л.: Изд-во ЛГУ, 1977. 215 с.
34. Перенос радиации в рассеивающих и поглощающих атмосферах. Стандартные методы расчета // Под ред. Жаклин Ленобль. Перевод с английского Шифрина К.С. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 263 с.
35. *Lenoble J., Sekera Z.* Equation of radiative transfer in a planetary spherical atmosphere // Proceedings of National Academy of Science USA, 1961. Vol. 47. № 3. P. 372-378.
36. *Сушкевич Т.А.* О решении задач атмосферной коррекции спутниковой информации // Исслед. Земли из космоса, 1999. № 6. С. 49-66.
37. *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. № 9. P. 2585-2597.
38. *Sushkevich T.A.* Pioneering Remote Sensing in the USSR. 2. Global spherical models of radiation transfer // International Journal of Remote Sensing, Vol. 29. № 9. P. 2599-2613.