



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

Препринты ИПМ • Препринт № 88 за 2018 г.



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

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

Альbedo планеты как индикатор эволюции климата Земли (65-летию ИПМ имени М.В.Келдыша и достижениям «Лунной программы» посвящается)

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В. Альbedo планеты как индикатор эволюции климата Земли (65-летию ИПМ имени М.В.Келдыша и достижениям «Лунной программы» посвящается) // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. № 88. 28 с. doi:[10.20948/prepr-2018-88](https://doi.org/10.20948/prepr-2018-88)
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-88>

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

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

**Альbedo планеты как индикатор
эволюции климата Земли
(65-летию ИПМ имени М.В.Келдыша и
достижениям «Лунной программы» посвящается)**

Москва — 2018

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

Альbedo планеты как индикатор эволюции климата Земли (65-летию ИШМ имени М.В.Келдыша и достижениям «Лунной программы» посвящается)

Цель настоящей публикации - обратить внимание на класс больших задач аэрокосмического дистанционного зондирования и глобального мониторинга климата Земли как планеты, для решения которых требуются параллельные супервычисления и высокопроизводительные суперкомпьютеры. Предлагается сферическая модель радиационного поля Земли для моделирования спектрального и глобального альbedo планеты и немного истории.

Ключевые слова: исследование, эволюция климата, планета Земля, дистанционное зондирование, модель спектрального альbedo, компьютерное моделирование, советская лунная программа

Tamara Alexeevna Sushkevich, Sergey Aleksandrovich Strelkov, Svetlana Victorovna Maksakova

Albedo of the planet as an indicator of the evolution of the Earth's climate (Dedicated to the 65th anniversary of the Keldysh Institute of Applied Mathematics and the achievements of the "Lunar Program")

The purpose of this publication is to draw attention to a class of large problems of aerospace remote sensing and global monitoring of the Earth's climate as a planet, for which solutions require parallel supercomputers and high-performance supercomputers. A spherical model of the Earth's radiation field is proposed to simulate the spectral and global albedo of the planet and a bit of history.

Key words: research, climate evolution, planet Earth, remote sensing, spectral albedo model, computer simulation, Soviet lunar program

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

Оглавление

1. Введение	3
2. Немного истории	4
3. Сферическая модель радиационного поля Земли	7
4. Модель альbedo планеты Земля	10
5. Заключение	15
Список литературы	16
Приложение	24

1. Введение

Настоящая статья посвящается 65-летию ПЕРВОГО в мире Института прикладной математики – ИНСТИТУТА КЕЛДЫША (1953-2018) [1] и его достижениям в советской «Лунной программе», которые несомненно полезны для будущих «Лунных проектов». Институт создан в соответствии с распоряжением Совета Министров СССР от 18 апреля 1953 г. № 611-рс и распоряжением Президиума Академии наук СССР от 27 апреля 1953 г. № 0012002 как Отделение прикладной математики Математического института им. В.А. Стеклова Академии наук СССР (ОПМ МИАН СССР). В соответствии с постановлением Президиума Академии наук СССР от 8 июля 1966 г. № 465-010 ОПМ МИАН СССР преобразовано в Институт прикладной математики Академии наук СССР. Указом Президиума Верховного Совета СССР от 19 апреля 1967 г. № 999-7 Институт награжден орденом Ленина. В соответствии с постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 17 июля 1978 г. № 691 Институту присвоено имя М.В. Келдыша.

Институт Келдыша был создан специально для решения больших задач атомно-водородного и ракетно-космического проектов и создания «ракетно-ядерного щита» с использованием электронно-вычислительных машин (ЭВМ). М.В.Келдыш и С.П.Королев – ОБА ПОКОРИТЕЛИ КОСМОСА [2-15]. Институту Келдыша принадлежит ведущая роль в реализации советской «Лунной программы» [16-20]. В.В.Ивашкин [20]: «Это, в первую очередь, фундаментальная работа В.А.Егорова по теории лунных траекторий [19]. Далее, это работы по определению траекторий первых «лунников»: КА Луна-1 «Мечта» (запуск 02.01.1959) с первым пролетом у Луны, КА Луна-2 (запуск 12.09.1959) с первым попаданием в Луну и КА Луна-3 (запуск 04.10.1959), впервые облетевшего Луну, сделавшего фотографии ее обратной стороны и передавшего эти фото на Землю» (КА - космический аппарат).

В рамках «Лунной программы» было запущено 24 КА [18]. Баллистические расчеты и навигационные средства всех отечественных «лунных» КА обеспечили в Институте Келдыша. На Луну были доставлены два «лунохода» (1970, 1973); три ракеты стартовали с Луны и доставили лунный грунт на Землю (1970, 1972, 1976); с 1966 по 1974 гг. запущены семь искусственных спутников Луны (ИСЛ); Автоматические межпланетные станции (АМС) «Зонд 5»-«Зонд 8» (1968-1970) облетели Луну и доставили уникальные многочисленные данные фото- и кино-съемок Земли и Луны. В Мемориальном музее-кабинете академика М.В.Келдыша [20] хранятся макеты «глобуса Луны» и «лунохода».

В те годы работа проводилась в условиях повышенной секретности и жесточайшей конкуренции за приоритеты в космической гонке с США, потому в открытых изданиях новейшие результаты фундаментальных и прикладных исследований практически либо не публиковали вообще, либо публиковали без раскрытия истинного назначения работ. Лишь мизерная часть результатов

экспериментов и расчетов сохранилась в журнальных статьях. Многие архивные данные до сих пор не рассекречены, поскольку представляют важный интерес для современных и будущих проектов.

Спектральные наблюдения - один из важных каналов информации в астрономии и астрофизике. Измерение спектрального альbedo Земли как планеты во всех спектральных диапазонах от ультрафиолетовых до миллиметровых длин волн позволяет получить важную информацию как о свойствах источников и механизмах их излучения, так и о той среде, которая поглощает, рассеивает и отражает электромагнитные волны.

В плане реализации натуральных наблюдений это грандиозная задача будущего, а в настоящее время предлагается развитие информационно-математического аспекта и сценарного подхода к решению поставленной проблемы на основе математического моделирования на суперкомпьютерах и параллельных супервычислениях, для которых уже создаются приемлемые технические и технологические средства. Важно сформулировать универсальные системные модели и методы для супервычислений в задачах космического экологического и климатического мониторинга и исследования спектральных характеристик радиационного баланса и альbedo сферической Земли как глобальных характеристик эволюции климата планеты. В перспективе важны приложения такой задачи и для энергоснабжения космических аппаратов и МКС (кроме прямого солнечного излучения используется отраженное от Земли для двухсторонних «солнечных батарей») и для навигации автоматических межпланетных станций (АМС) в будущих лунных проектах и полетах на другие планеты и космические объекты.

Цель настоящей публикации - обратить внимание на класс задач аэрокосмического дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и глобального мониторинга климата Земли как планеты, для решения которых требуются перспективные информационные технологии, параллельные супервычисления и экзафлопсные суперкомпьютеры. Не случайно высокопроизводительные суперкомпьютеры и средства для big data устанавливаются в центрах NASA, а также в центрах по изучению климата и космическим исследованиям ЕС, Японии, Китая, Германии, Бразилии и т.д. Прежде чем создавать дорогие и эффективные космические системы глобального мониторинга планеты Земля (а за ними будущее международной космонавтики) целесообразно смоделировать эти системы на основе «сценарного» подхода, реализованного на суперкомпьютерах.

2. Немного истории

В настоящей работе используются открытые опубликованные данные соавторов по «Лунной программе» [22-23] для исследований приложения теории переноса излучения с гиперспектральным подходом в перспективных космических проектах дистанционного зондирования глобальной климатической системы Земли (КСЗ) по аналогии с подходами изучения планет

солнечной системы и Галактик и с учетом опыта реализации «Лунной программы», в которой принимала участие Т.А.Сушкевич. Режим выполнения расчетов в Институте Келдыша не позволял открыто публиковать результаты, однако свидетельством этого участия является сохранившийся оттиск статьи [23] с автографом соавторов (рис. 1). Результаты этого цикла работ были использованы в системах навигации «лунных» КА и ракет по звездам, а также в изданиях ПЕРВЫХ уникальных фотоальбомов «Земля из Космоса» (первый – с черно-белыми фото, второй – с цветными фото), которые презентовали лидерам стран, прибывающим с официальными визитами в СССР. Прежде чем сделать ПЕРВЫЕ фотосъемки Земли из космоса, нужно было рассчитать её яркость и создать специальные фото- и киноаппараты и специальные пленки [24-26]. Одним из создателей этих фотоальбомов была Надежда Павловна Лаврова (эти результаты легли в основу её докторской диссертации в 1976 г.), которая с 18.03.1968 г. по 19.06.1989 г. возглавляла кафедру аэрокосмических съемок МИИГАиК. Н.П.Лаврова (1926-1998) участвовала в организации и выполнении работ по космическим съемкам Земли, Луны, Марса. С её участием получены первые снимки Земли с окололунной орбиты при полете автоматических станций «Зонд» [22-23]. NASA фотоальбомы Земли из космоса выпустило позже. До сих пор завораживают изображения Земли из Космоса, которые в большом количестве теперь можно посмотреть в интернет.

Основателем и первым директором Института прикладной математики имени М.В. Келдыша Российской академии наук являлся математик-легенда Трижды Герой Социалистического Труда Главный Теоретик космонавтики академик Мстислав Всеволодович Келдыш. Успехам достижений в «Лунной программе», а также в стратегических космических проектах оборонного и гражданского назначения способствовали теоретико-расчетные исследования, «константное обеспечение» в которых формировалось на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), полученных преимущественно с помощью программы «пилотируемой космонавтики» [27, 28], выполняемой в Институте Келдыша.

Статья посвящается 55-летию полета в космос первой женщины-космонавта В.В.Терешковой; 55-летию первого в мировой практике научного эксперимента, проведенного человеком в космосе на борту пилотируемого космического корабля (ПКК); 55-летию первого научного эксперимента по дистанционному зондированию Земли из космоса (ДЗЗ); 55-летию обнаружения стратосферных аэрозольных слоев из космоса; памяти профессора Георгия Владимировича Розенберга (29.04.1914-09.12.1982), который теоретически обосновал этот эксперимент и обеспечил успешную обработку космических данных [29-36], и памяти профессора Евграфа Сергеевича Кузнецова (13.03.1901-17.02.1966) – основателя советской научной школы по теории переноса излучения, нейтронов, заряженных частиц и создателя в 1955 году уникального отдела «Кинетические уравнения» в Институте Келдыша, где выполнялись работы по информационно-математическому обеспечению

космических исследований [37]. Т.А.Сушкевич – последняя ученица Е.С.Кузнецова и участница космических исследований, проводимых в Институте физики атмосферы АН СССР под руководством Г.В.Розенберга.

С борта ПКК «Восток-5» Валерий Федорович Быковский (14-19 июня 1963 г.) и ПКК «Восток-6» Валентина Владимировна Терешкова (16-19 июня 1963 г.) провели фотосъемки сумеречного горизонта Земли. Одна фотопленка оказалась настолько удачной [32], что в результате её обработки и имитационного физического моделирования, организованного А.Б.Сандомирским, и математического моделирования, проведенного Т.А.Сушкевич, которая разработала уникальное математическое обеспечение [38, 39], удалось впервые из космоса обнаружить стратосферные аэрозольные слои в атмосфере Земли, сформированные вследствие извержения вулкана Агунг. Было положено начало инструментальным исследованиям оптически активных компонентов атмосферы с ПКК. Не случайно кандидатскую диссертацию Т.А.Сушкевич защищала в ИФА АН СССР [40], ведущей организацией был ГОИ им. С.И.Вавилова, а оппонентами Г.А.Михайлов и К.С.Шифрин (1918-2011), 100-летие которого отмечается в 2018 году.

Это были годы покорения космоса, с одной стороны, а с другой стороны, шла жесткая конкуренция с США не только за приоритеты в покорении космоса, но и в создании космических средств военного и оборонительного назначения. В СССР теоретико-расчетные работы проводились в трех научных центрах: в Ленинграде под руководством К.Я.Кондратьева и В.В.Соболева преимущественно приближенными аналитическими методами [41-49], в Вычислительном центре СО РАН в Новосибирске под руководством Г.И.Марчука и Г.А.Михайлова в основном методами Монте-Карло [50-54], но в этой конкуренции выиграли Институт Келдыш и персонально Т.А.Сушкевич [38-40, 55-70], потому что в Институте Келдыша были научная школа, научная среда и большой опыт решения больших задач на ЭВМ. Т.А.Сушкевич в течение 30 лет являлась членом секций НТС ВПК и обеспечивала расчетами многие космические проекты с разными приложениями.

Первая публикация со сферической моделью (методом возмущений пытались описать сферу плоскими приближениями) в США была подготовлена известными теоретиками Ж.Ленобль и З.Секера [71]. Эта теоретическая модель не была реализована на практике. Состояние расчетов радиационного поля Земли отражено в обзоре, подготовленном под редакцией председателя Международной Комиссии по радиации Жаклин Ленобль [72], который выходил первоначально как отчеты Комиссии. Однако до сих пор сохраняется приоритет – никто в мире не превзошел наши результаты по многомерным моделям радиационного поля Земли. Достаточно изучить отчет [72], переведенный на русский язык под редакцией К.С.Шифрина, который включил в книгу публикации Т.А.Сушкевич, и обзоры публикаций [73-78].

3. Сферическая модель радиационного поля Земли

Этот раздел статьи посвящаем ведущим советским ученым 20-го века - первопроходцам в освоении космического пространства и космических технологий, которые стояли у истоков космонавтики и создали основы теоретического и информационно-математического обеспечения для освоения космического пространства и систем наблюдения Земли из космоса разного тематического и специального назначения: 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, Т.А.Сушкевич, 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, Г.М.Вайникко, В.Е.Зуеву, М.В.Кабанову, В.Г.Золотухину, Д.А.Усикову, А.К.Городецкому, В.В.Бадаеву и др.

После съемок Земли из космоса Г.С.Титовым с ПКК «Восток-2» (август 1961) и с АМС «Зонд 5-8» (облет Луны и посадка на Землю в 1968-1970 гг.) 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. Сферические модели радиационного поля Земли использовались в компьютерном имитационном моделировании для обеспечения съемки Земли с АМС, для научных экспериментов по ДЗЗ, проводимых с ПКК и долгосрочных орбитальных станций (ДОС), в проектах ПРО (в частности, упреждение стартов ракет из космоса), в лунных проектах (возврат ракеты с лунным грунтом на Землю), в астроориентации баллистических ракет и т.д.

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. В частности, такие оценки по «пепельному свету» были использованы как один из подходов для верификации сферической модели расчета поля яркости Земли, разработанной Т.А.Сушкевич [38-39], на основе которой в рамках «Лунной программы» СССР проводилось имитационное моделирование распределения яркости планеты Земля в условиях, приближенных к наблюдению Земли с возвращающейся ракеты на всей трассе от старта на Луне до достижения ближнего космоса Земли, когда, подобно Луне, виден полный диск Земли или его часть, половина диска или даже «серпик».

В статьях [22-23] приведены снимки Земли с «Зондов» и сравнение результатов расчетов «фазовой кривой» Земли, проведенных Т.А.Сушкевич, с данными экспериментальных наблюдений «пепельного света» Луны на солнечной обсерватории в США (см. рис. 2-5 в Приложении). В условиях «космической гонки» и конкуренции двух супердержав СССР и США для выполнения столь ответственного проекта по доставке лунного грунта с помощью автоматических средств предварительно было осуществлено несколько запусков АМС «Зонд», с борта которых проводились съемки Земли, которые также помогали разработке адекватной сферической модели радиационного поля Земли с учетом разнообразия подстилающей поверхности (суша, океаны, облака и т.д.). В сентябре 1968 года «Зонд-5» первым из «Зондов» успешно облетел Луну и стал первым из советских космических кораблей, совершившим благополучное приводнение (в Индийском океане). Он также стал **первым в мире космическим аппаратом, возвратившим на Землю фотопленку, отснятую на участке траектории около Луны.**

13 июля 1969 г. за три дня до старта «Аполлона-11» (16-24 июля 1969 г.) СССР запустил автоматическую станцию «Луна-15», которая должна была достигнуть Луны как раз в день старта. 16 июля «Луна-15» благополучно вышла на окололунную орбиту. Для американцев этот запуск был загадкой, но высказывались предположения, что его цель – мягкая посадка аппарата на Луну и возвращение его на Землю с образцами лунного грунта до возвращения «Аполлона-11». В течение 52 витков на лунной орбите с ней были проведены 86 сеансов связи, но АМС разбилась при попытке посадки на Луну 21 июля 1969 г., всего за несколько часов до взлёта Армстронга и Олдрина с Луны. Баллистические расчеты для Лунных проектов обеспечивал коллектив сотрудников из Института Келдыша под руководством Д.Е.Охоцимского и Т.М.Энеева [17-18]. Как сейчас, помню этот запуск АМС «Луна-15», история которого до сих пор загадка для многих. В зале ЭВМ, где проводились расчеты, после запуска высказывалось мнение, что «наши наблюдают за посадкой американских астронавтов на Луну».

Достоверность сферических моделей и расчетов яркости и фазовой кривой Земли подтверждены успешными запусками трех АМС: «Луна-16» (12-24 сентября 1970 г.), «Луна-20» (14-21 февраля 1972 г.), «Луна- 24» (09-22 августа 1976 г.), доставивших лунный грунт на Землю в автоматическом режиме. Советская АМС **«Луна-16» стала первым автоматическим аппаратом, доставившим взеземное вещество на Землю** (и третьим после ПКК «Аполлон-11» (16-24 июля 1969 г.), «Аполлон-12» (14-24 ноября 1969 г.)). 12 сентября 1970 г. был осуществлён пуск ракеты-носителя «Протон-К/Д», которая вывела на траекторию полёта к Луне АМС «Луна-16». 20 сентября 1970 г. АМС «Луна-16» совершила мягкую посадку на поверхности Луны в районе Моря Изобилия. Старт возвратной ракеты с поверхности Луны с образцами лунного грунта состоялся 21 сентября. Продолжительность обратного перелета составила 84 часа. 24 сентября 1970 г. возвращаемый

аппарат АМС «Луна-16» совершил мягкую посадку на территории СССР в 80 километрах юго-восточнее города Дзержинск в Казахстане.

Широкие возможности исследований радиационных характеристик нашей планеты появились в результате создания ракетной и космической техники. Не случайно ученики Е.С.Кузнецова и сотрудники отдела «Кинетические уравнения» Института Келдыша приняли активное участие в информационно-математическом обеспечении первых и последующих космических проектов. Не случайно Е.С.Кузнецов явился редактором перевода на русский язык ПЕРВОЙ в мире книги по теории переноса излучения [79], автором которой является Нобелевский лауреат Субрахманьян Чандрасекар (Subrahmanyan Chandrasekhar (19.10.1910 - 21.08.1995)). С.Чандрасекар, как и Е.С.Кузнецов, принимал участие в атомном проекте (Манхэттенский проект США). Е.С.Кузнецов и С.Чандрасекар – первые модельеры-вычислители задач переноса излучения, заряженных частиц, нейтронов с разными приложениями.

Не случайно в этих проектах участвовал ОПМ, поскольку М.В.Келдыш являлся Главным Теоретиком по космонавтике, а его заместитель А.Н.Тихонов уже имел большой опыт по решению больших задач в рамках атомного проекта. В 2018 г. исполняется **65 лет со дня испытания первой в мире водородной бомбы** («бомба Сахарова») 12 августа 1953 г., за разработку которой Указом Верховного Совета СССР от 4 января 1954 г. были присвоены звания Героев Социалистического Труда математику-вычислителю А.Н.Тихонову в компании с физиками И.Е.Таммом, А.Д.Сахаровым, Л.Д.Ландау, А.П.Александровым, Е.И.Забабахиным.

Сферические модели переноса излучения рассматриваются и в рамках развития вычислительных средств с целью создания информационно-математического обеспечения для решения прямых и обратных (больших) задач нанодиагностики природных и техногенных сред методами гиперспектрального (сотни и тысячи диапазонов спектра электромагнитных волн от УФ до ММВ) аэрокосмического дистанционного зондирования Земли.

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 [41].

Численные методы, разработанные Е.С.Кузнецовым, В.С.Владимировым [80] и Г.И.Марчуком в рамках атомного проекта, позволили существенно усложнить сферические модели и приблизить их к натурным земным условиям. В своей докторской диссертации, на основе которой подготовлена публикация [80] В.С.Владимиров описал метод характеристик для одномерной сферы.

Стоит обратить внимание на то, что на заре космической эры к работам были привлечены самые сильные специалисты и практически с нулевого уровня разрабатывались самые сложные модели радиационного поля Земли. Пионерские информационно-математические и теоретико-расчетные исследования проводились тремя коллективами специалистов, 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. Руководители этих научных школ не случайно были привлечены к космическим проектам, поскольку в 40-50-ые годы А.Н.Тихонов, Е.С.Кузнецов, А.М.Обухов, К.Я.Кондратьев и Г.И.Марчук сотрудничали в институтах, которыми руководил академик О.Ю.Шмидт (математик-алгебраист по своему образованию, полученному в Киевском университете). В 1937 г. Отто Юльевич создал Институт Теоретической геофизики АН СССР, а в 1946 г. путем объединения Института Теоретической геофизики и Института Сейсмологии был организован Геофизический институт АН СССР. В 1949 г. директором Геофизического института был назначен академик Г.А.Гамбурцев. 18 ноября 1955 г. Геофизический институт реорганизован и на его базе созданы Институт физики Земли АН СССР (ИФЗ), Институт физики атмосферы АН СССР (ИФА), Институт прикладной геофизики (ИПГ).

При этом многие теоретические и методические работы советских ученых превосходили аналогичные работы зарубежных ученых, которые со всего мира приглашались в США. Анализ и интерпретацию первых космических черно-белых, а позже цветных фотографических снимков и спектрограмм независимо проводили три группы:

- К.Я.Кондратьев, В.В.Соболев, И.Н.Минин, О.И.Смокий;
- Г.И.Марчук, Г.А.Михайлов, М.А.Назаралиев;
- Г.В.Розенберг, А.Б.Сандомирский, Т.А.Сушкевич.

Эти ПИОНЕРСКИЕ работы заложили фундаментальные основы в современные методы и средства ДЗЗ из космоса и мониторинга последствий естественно-природных и антропогенных катастроф, а также подтвердили гипотезы о стратосферных аэрозольных и озоновых слоях, их происхождении и релаксации.

4. Модель альbedo планеты Земля

Как развитие опыта, приобретенного в «Лунных проектах», предлагается идея нового подхода к изучению эволюции климата Земли как планеты на основе компьютерного моделирования спектрального альbedo Земли в сферической геометрии с использованием «сценариев» состояния КСЗ в контролируемых условиях с разделением вкладов, обусловленных изменчивостью атмосферы и подстилающих поверхностей, что позволяет отслеживать влияние разных факторов климатической системы. Можно смоделировать и «пепельный свет» Луны, который всё более интересует

исследователей в связи с неоднозначной оценкой «потепления» или «похолодания» на Земле.

В «Лунной программе» и других космических проектах использовалась 4d сферическая модель с цилиндрической симметрией относительно оси «Солнце-центр Земли» [81-83]. На БЭСМ-6 расчет одного варианта занимал порядка 300 часов процессорного времени, для хранения данных требовалось 6 магнитных дисков, 14 магнитных лент. В настоящее время и мощности и ресурсы вычислительных систем выросли на порядки, так что можно рассматривать 5d-сферическую модель [82-84]. Кроме того, Т.А.Сушкевич построена теория передаточного оператора для общих краевых задач теории переноса излучения в приближении кинетических уравнений Больцмана [70, 87-91], которая позволяет разделить вклады быстро меняющейся атмосферы и более медленно изменяющейся земной поверхности (суша, океан) в суммарное радиационное поле Земли как планеты и климатической системы. Разработаны алгоритмы методического распараллеливания супервычислений [92-93].

Задача состоит в определении интенсивности ослабленного прямого излучения от источников и стационарного поля интенсивности однократно и многократно рассеянного излучения в рассеивающей, поглощающей и излучающей сферической оболочке (атмосфере) с отражающей и излучающей подстилающей поверхностью (суша, океан, облака) или за её пределами. Такая модель описывает радиационное поле Земли как планеты с атмосферой. Приближение стационарного поля физически корректно, поскольку исследуется процесс распространения солнечного или собственного излучения, распространяющегося со скоростью света.

Полную интенсивность монохроматического (при фиксированном λ или квазимонохроматического (при фиксированных λ и $\Delta\lambda$) стационарного излучения в КСЗ $\Phi_\lambda(\mathbf{r}, \mathbf{s})$, где индекс λ - длина волны (ниже везде опускается), в точке $A(\mathbf{r})$ с радиус-вектором \mathbf{r} в направлении \mathbf{s} находим как решение общей краевой задачи теории

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

с линейными операторами: интегродифференциальный оператор записан как $K \equiv D - S$; дифференциальный оператор переноса

$$D \equiv (\mathbf{s}, \text{grad}) + \sigma_{tot}(\mathbf{r}), \quad (2)$$

для трехмерной сферической геометрии задачи

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

интеграл столкновений - функция источника, описывающая многократное рассеяние,

$$B(\mathbf{r}, \mathbf{s}) \equiv S\Phi = \sigma_{sc}(\mathbf{r}) \int_{\Omega} \gamma(\mathbf{r}, \mathbf{s}, \mathbf{s}') \Phi(\mathbf{r}, \mathbf{s}') ds', \quad ds' = \sin \vartheta' d\vartheta' d\varphi'; \quad (4)$$

оператор отражения в общем случае можно представить интегралом

$$[R\Phi](\mathbf{r}_b, \mathbf{s}) = \int_{\Omega^-} q(\mathbf{r}_b, \mathbf{s}, \mathbf{s}^-) \Phi(\mathbf{r}_b, \mathbf{s}^-) ds^-, \quad \mathbf{s} \in \Omega^+. \quad (5)$$

Функция $F^{in}(\mathbf{r}, \mathbf{s})$ описывает источники излучения внутри сферической оболочки, например, собственное излучение; функции $F^b(\mathbf{r}_b, \mathbf{s}^+)$ и $F^t(\mathbf{r}_t, \mathbf{s}^-)$ - источники излучения на границах сферической области, определенные для направлений внутрь сферической оболочки (в частности, это может быть внешний поток солнечного излучения и собственное излучение подстилающей поверхности). Оператор R описывает закон отражения излучения от подстилающей поверхности, расположенной на уровне нижней границы r_b ; параметр $0 \leq \varepsilon \leq 1$ фиксирует акт взаимодействия излучения с подстилающей поверхностью. Если $R \equiv 0$ (или $\varepsilon = 0$), то имеем дело с первой краевой задачей теории переноса для сферического слоя с прозрачными, неотражающими, абсолютно "черными" границами или с "вакуумными" граничными условиями

$$K\Phi_a = F^{in}, \quad \Phi_a|_t = F^t, \quad \Phi_a|_b = F^b \quad (6)$$

Можно выделить три типа радиационных задач, требующих учета земной поверхности. Первый тип - это задачи энергетики и радиационного баланса Земли, когда источником служит радиация Солнца. 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.

В любой активной или пассивной системе ДЗЗ всегда присутствуют четыре главные компоненты: «сценарий», «сцена», т.е. распределение яркости наблюдаемых объектов или ландшафта; атмосферный канал передачи изображения; прибор регистрации электромагнитных волн; комплекс обработки и распознавания изображения. В трех компонентах (кроме прибора) обязательным элементом является влияние атмосферы: атмосферно-оптические механизмы воздействуют на формирование «сценария», на перенос его изображения через среду и учитываются в радиационной коррекции при анализе «сцен». Используем универсальный подход, который позволяет описывать весь канал наблюдения через объективные характеристики, инвариантные относительно конкретных структур зондируемых объектов, условий освещенности и визирования. Такой подход известен как линейно-системный подход. Функциональное соотношение, связывающее входной и выходной сигналы системы, имеет фундаментальный характер и известно как «интеграл суперпозиции», означающий, что линейная система полностью характеризуется суммой ее откликов на входные воздействия.

Общая краевая задача (1) с операторами (2)-(5) линейна (в зависимости от источников) и её решение можно представить в виде суперпозиции: $\Phi = \Phi_a + \Phi_q$. Фоновое излучение атмосферы Φ_a определяется как решение первой краевой задачи (6). Компонента Φ_q , обусловленная эффектами отражения излучения от подстилающей поверхности, находится как решение общей краевой задачи

$$K\Phi_q = 0, \quad \Phi_q|_t = 0, \quad \Phi_q|_b = \varepsilon R\Phi_q + \varepsilon E \quad (7)$$

с источником $E = R\Phi_a$, описывающим отражение фонового излучения.

Теоретические конструкции и алгоритмы расчета вклада отражающей подстилающей поверхности основаны на теории обобщенных решений, теории интегральных преобразований обобщенных функций и рядах общей теории регулярных возмущений (асимптотический метод для представления решения в виде ряда с малым параметром). Такой подход, основанный на строгой математической основе, называем методом функций влияния [70].

Решение первой краевой задачи с источником на подстилающей поверхности

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

можно записать в форме линейного функционала – «интеграла суперпозиции»

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

Ядром этого функционала является функция влияния $\Theta(\mathbf{s}_h^+; r, r_\perp, \mathbf{s})$, которая определяется как решение первой краевой задачи

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

с параметром $\mathbf{s}_h^+ \in \Omega^+$ и источником $f_\delta(\mathbf{s}_h^+; r_\perp, \mathbf{s}) = \delta(r_\perp) \delta(\mathbf{s} - \mathbf{s}_h^+)$.

На основе теории регулярных возмущений с помощью ряда по малому параметру

$$\Phi_q(\mathbf{s}^h; \mathbf{r}, \mathbf{s}) = \sum_{k=1}^{\infty} \varepsilon^k \Phi_k$$

общая краевая задача (7) сводится к рекуррентной системе первых краевых задач (8):

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

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

Вводится оператор, описывающий один акт взаимодействия излучения с подстилающей поверхностью с помощью функции влияния:

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

Решения уравнений из системы первых краевых задач (9) находятся как линейные функционалы

$$\Phi_1 = (\Theta, E), \quad \Phi_k = (\Theta, R\Phi_{k-1}) = (\Theta, G^{k-1}E).$$

Асимптотически точное решение общей краевой задачи (7) получается как линейный функционал в форме оптического передаточного оператора

$$\Phi_q = (\Theta, Y),$$

где оптический образ «сценария» распределения яркости на подстилающей поверхности

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

описывается суммой ряда Неймана по кратности отражения излучения от подстилающей поверхности с учетом многократного рассеяния отраженного излучения в атмосфере через функцию влияния. «Сценарий» (10) удовлетворяет уравнению Фредгольма второго рода

$$Y = R(\Theta, Y) + E,$$

которое называют уравнением для «near-ground image» (или «уравнением фотографии» подстилающей поверхности). Суммарное излучение или «space image» (космическое изображение) Земли описывается линейным функционалом

$$\Phi = \Phi_a + (\Theta, Y). \quad (11)$$

Линейный функционал (11) – это обобщенная математическая модель переноса излучения в КСЗ, в которой разделены фоновое излучение атмосферы Земли и вклад поверхности Земли и которая адекватна исходной общей краевой задаче (1). Такая математическая (физически корректная) модель описывает перенос солнечного и собственного излучения и радиационное поле Земли при различных структурах источников излучения E и разных типах подстилающей поверхности не зависимо от размерности КСЗ (1d, 2d или 3d по пространству).

Астрономия – древняя наука. Человечество всегда интересовало и звезды и планеты и, конечно, Земля. ВПЕРВЫЕ Землю из космоса увидел Ю.А.Гагарин и воскликнул: «Земля голубая!» Благодаря полетам космических аппаратов, узнали многое про планеты Марс и Венера, которые находятся в одной Солнечной системе, но такие разные... Уже несколько десятилетий ученые озабочены проблемой эволюции Земли как планеты. В настоящее время создан инструментарий для теоретико-расчетных исследований этой эволюции с помощью «сценарного» подхода и оценки спектрального и глобального альбеда Земли как планеты, которое чувствительно к изменениям и в атмосфере, и в

океане, и на суше. Для оценки такого альбеда требуются сферические модели, подобные той, что представлена в данной публикации.

5. Заключение

Великие советские ученые многогранно изучали альbedo нашей планеты. Весомый вклад внесли академик В.Г.Фесенков [94] и Н.П.Барабашов [95]. Герой Социалистического Труда (1969) академик Барабашов Николай Павлович (1894-1971) - один из авторов и редактор первого «Атласа обратной стороны Луны» (1960), который составлен по фотографиям, полученным автоматической межпланетной станцией «Луна-3». Более 15 лет возглавлял Комиссию по физике планет Астрономического совета АН СССР.

В связи с началом исследования Луны космическими аппаратами нидерландский и американский астроном Койпер Джерард Петер (Kuiper, Gerard Peter) (1905–1973) проводил многочисленные фотографические наблюдения ее поверхности. Койпер был руководителем программы фотографирования Луны с космических аппаратов серии «Рейнджер», создания фотографических атласов Луны. Койпер был инициатором создания коллективных монографий «Солнечная система» (в 4-х томах, 1953–1961) и «Звезды и звездные системы» (в 9 томах, издание начато в 1960), которые подводили итог накопленным к середине 20 века данным по астрономии, астрофизике и геофизике.

В 1963 году под редакцией В.И.Мороза (работал в ИКИ АН СССР) на русском языке вышло издание «Солнечная система» [96], которое позволило оперативно найти уникальные результаты по измерениям «пепельного света» Луны на американских «солнечных станциях» и восстановления наблюдаемой «фазовой кривой» Земли. Помогли результаты А. Danjon [97].

На всю жизнь осталось незабываемое впечатление, когда расчетные значения «звездной величины» Земли качественно совпали с наблюдаемыми и позволили оценить «коридор» её изменений при разработке и создании «звездного датчика» в «Лунной программе». Проект был реализован успешно: три ракеты вернулись на Землю.

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, а также экологических и климатических изменений в локальных и глобальных масштабах. Впереди новые «Лунные проекты».

Это ГРАНДИОЗНЫЕ ЗАДАЧИ, которые охватывают ряд важных направлений фундаментальных исследований в разных областях знаний (математика, физика, химия, биология, геофизика, метеорология, инженерно-конструкторские разработки, информационные технологии), имеющих междисциплинарный характер и тематически объединяемых задачами комплексного изучения окружающей природной, космической и техногенной

среды с использованием кинетической теории переноса излучения, спектральных методов молекулярной физики, методов и средств космических исследований и космического землеведения с использованием перспективных гиперспектральных технологий дистанционного зондирования и нанодиагностики, математического моделирования и эффективных численных методов с распараллеливанием супервычислений на современных и перспективных суперкомпьютерах [92-93].

Пользуясь возможностью, Т.А.Сушкевич считает своим долгом вспомнить тех, с кем начинался её незабываемый научный путь молодого исследователя в покорении космоса и с кем успешно выполнялся «Лунный проект» в части информационно-математического обеспечения навигации «лунных кораблей» и «лунных ракет», стартовавших с Луны на Землю, по яркостному полю Земли как планеты, яркость которой на траектории полета в течение суток меняется на порядки. Искренняя благодарность и вечная память моим соавторам Г.В.Розенбергу (ИФА АН СССР), А.Б.Сандомирскому, Н.П.Альтовской, Г.Т.Трифоновой (МИЭиА МАП), которые ставили грандиозные задачи и предоставляли реалистичное «константное обеспечение», что стимулировало разрабатывать методы решения сложнейших больших многомерных сферических задач теории переноса излучения, которые до настоящего времени никто в мире не превзошел. И только в Институте Келдыша, который отличался высококвалифицированным и опытным коллективом реализации больших задач на больших ЭВМ, можно было ВПЕРВЫЕ в мировой науке создать полный инструментарий для моделирования радиационного поля Земли для разных приложений. И этим мы обязаны Е.С.Кузнецову, который занялся проблемами климата и ролью излучения ещё в далекие 1925-1927 гг. [37] и передал нам, его многочисленным ученикам, свой научный потенциал.

Список литературы

1. Доклад Ю.П.Попова на 50-летию Института Келдыша. <http://keldysh.ru>; http://www.keldysh.ru/grants/rffi//50_years/; ИПМ им. М.В. Келдыша РАН http://keldysh.ru/httpd/kiam-info_fr.html;
2. Творческое наследие академика Сергея Павловича Королева. Избранные труды и документы / Под ред. М.В.Келдыша. М.: Наука, 1980. 591 с.
3. Королева Н.С. С.П.Королев: Отец: К 100-летию со дня рождения: в 3 кн. / Кн. 1: 1907-1938 годы. М.: Наука, 2007. 360 с.
4. Королева Н.С. С.П.Королев: Отец: К 100-летию со дня рождения: в 3 кн. / Кн. 2: 1938-1956 годы. М.: Наука, 2007. 314 с.
5. Королева Н.С. С.П.Королев: Отец: К 100-летию со дня рождения: в 3 кн. / Кн. 3: 1957-1966 годы. М.: Наука, 2007. 253 с.
6. Келдыш М.В., Маров М.Я. Космические исследования. М.: Наука, 1981. 192 с.
7. Келдыш М.В. Избранные труды. Математика. М.: Наука, 1985. 447 с.

8. Келдыш М.В. Избранные труды. Механика. М.: Наука, 1985. 567 с.
9. Келдыш М.В. Избранные труды. Общие вопросы развития науки. М.: Наука, 1985. 703 с.
10. Келдыш М.В. Избранные труды. Ракетная техника и космонавтика. М.: Наука, 1988. 493 с.
11. Келдыш М.В. Творческий портрет по воспоминаниям современников. М.: Наука, 2001. 398 с.
12. Мстислав Всеволодович Келдыш. 100 лет со дня рождения / ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Составители: Езерова Г.Н., Попов Ю.П., Лукичев М.А. Ярославль: ООО Издательство РМП, 2011. 344 с.
13. Мстислав Всеволодович Келдыш. К 100-летию со дня рождения. <http://келдыш.рф>
14. Сушкевич Т.А. Главный Теоретик М.В.Келдыш и Главный Конструктор космонавтики С.П.Королев покорители космоса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 1. С. 9-25.
15. Сушкевич Т.А. М.В.Келдыш организатор международного сотрудничества в космосе и первой советско-американской Программы «Союз-Аполлон» (ЭПАС) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 4. С. 9-22.
16. Путешествия к Луне. Электронная книга. Издано «КулЛиб – Классная библиотека», 2009. 461 с. Авторы: Владимир Георгиевич Сурдин, Александр Евгеньевич Марков, Жанна Федоровна Родинова, Вадим Иванович Чикмачёв, Вячеслав Владимирович Шевченко. Добавлена: 24.12.2012 Версия 1. ISBN: 978-5-9221-1105-8 . М.: Издательство «Физико–математическая литература» МАИК «Наука/Интерпериодика», 2012. <https://coollib.net/b/227304>
17. Прикладная небесная механика и управление движением. Сборник статей, посвященный 90-летию со дня рождения Д.Е.Охотимского / Составители: Т.М.Энеев, М.Ю.Овчинников, А.Р.Голиков. // Труды ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2010. 368 с.
<http://keldysh.ru/memory/okhotsimsky/index.htm>
18. Аким Э.Л., Энеев Т.М. Движение искусственных спутников Земли. Межпланетные полеты. С. 7-17.
<http://keldysh.ru/memory/okhotsimsky/akim.pdf>
19. Егоров В.А. О некоторых задачах динамики полета к Луне // Успехи физических наук, 1957. Т. 63, вып. 1а. С. 73-117.
https://ufn.ru/ufn57/ufn57_9/Russian/r579f.pdf
20. Ивашкин В.В. Лунные траектории космических аппаратов: пионерские работы в Институте прикладной математики и их развитие. С. 73-106.
<http://keldysh.ru/memory/okhotsimsky/ivashkin.pdf>
21. Мемориальный музей-кабинет академика М.В.Келдыша
<http://keldysh.ru/MVKeldysh/>

22. Лаврова Н.П., Сандомирский А.Б. Фотометрия планеты Земля с космических станций «Зонд» // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1972. Вып. 4. С. 109-114.

23. Лаврова Н.П., Сандомирский А.Б. Яркостные карты Земли, составленные по фотографическим данным АМС «Зонд» // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1973. Вып. 3. С. 75-85.

24. Селиванов А.С., Алешин Г.М., Голенко Г.А. и др. Фототелевизионные устройства для космических исследований // Техника кино и телевидения. 1969. № 7. С. 3-12.

25. Родионов Б.Н. Иконика и иконология // Космическая иконика. М.: Наука, 1973. С. 5-19.

26. Селиванов А.С. Перспективы развития фототелевизионных методов в космических исследованиях // Космическая иконика. М.: Наука, 1973. С. 20-25.

27. Лазарев А.И., Николаев А.Г., Хрунов Е.В. Оптические исследования в космосе. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 256 с.

28. Лазарев А.И., Коваленок В.В., Авакян С.В. Исследование Земли с пилотируемых космических кораблей. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 400 с.

29. Розенберг Г.В. О новом явлении в рассеянном свете сумеречного неба // Докл. АН СССР. 1942. Т. 36. № 9. С. 288-293.

30. Розенберг Г.В. Сумерки. М.: ГИФМЛ, 1963. 380 с.

31. 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.

32. 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.

33. Розенберг Г.В., Сандомирский А.Б., Сушкевич Т.А., Альтовская Н.П. Поле яркости зари, наблюдаемой с космических кораблей // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1971. Т. 7. № 3. С. 279-290.

34. 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. Физика атмосферы и океана. 1971. Т. 7. № 6. С. 590-598.

35. Розенберг Г.В., Сандомирский А.Б. Оптическая стратификация атмосферного аэрозоля // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1971. Т. 7. № 7. С. 737-749.

36. 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. № 8. С. 861-864.

37. Кузнецов Е.С. Избранные научные труды: Под ред. составителя Т.А. Сушкевич. М.: Физматлит, 2003. 784 с.

38. 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.

39. Сушкевич Т.А. Об одном методе решения уравнения переноса для задач с двумерной сферической геометрией // Препринты ИПМ АН СССР. 1972. № 15. 31 с. Депонирован, № 5557-73 от 28.02.73.

40. Сушкевич Т.А. Поле яркости сферической атмосферы. Кандидатская диссертация. Автореферат. Москва, ИФА АН СССР. 1972. С. 190/11.

41. Соболев В.В. Перенос лучистой энергии в атмосферах звезд и планет. М.: Изд-во ГИТТЛ, 1956. 391 с.

42. 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.

43. Соболев В.В., Минин И.Н. Рассеяние света в сферической атмосфере – II // Космич. исслед. 1963. Т. 1. № 2. С. 227-234.

44. Соболев В.В., Минин И.Н. Рассеяние света в сферической атмосфере – III // Космич. исслед. 1964. Т. 2. № 4. С. 610-618.

45. 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.

46. 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.

47. 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.

48. Смоктий О.И. Рассеяние света в аэрозольной сферической атмосфере // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1969. Т. 5. № 1. С. 46-61.

49. Смоктий О.И. Моделирование полей излучения в задачах космической спектрофотометрии. Л.: Наука, 1986. 352 с.

50. 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.

51. 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.

52. 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.

53. Михайлов Г.А. Статистическое моделирование процессов переноса излучения в атмосфере. Дисс. докт. физ.-мат. наук. Новосибирск, 1971.

54. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике / Под ред. Г.И. Марчука. Новосибирск: Наука, 1976. 283 с.

55. Гермогенова Т.А., Копрова Л.И., Сушкевич Т.А. Исследование

угловой, пространственной и спектральной структуры поля яркости Земли для характерной модели сферической атмосферы // Изв. АН СССР. Серия Физика атмосферы и океана, 1969. Т. 5. № 12. С. 1266-1277.

56. Малкевич М.С., Сушкевич Т.А. Об учете рассеяния солнечной радиации в сферической атмосфере при определении массы водяного пара // Тезисы Всесоюзного совещания по рассеянию света в атмосфере, Алма-Ата, 1969. Алма-Ата: Изд-во «Наука» КазССР, 1969. С. 4-5.

57. Гермогенова Т.А., Копрова Л.И., Малкевич М.С., Сушкевич Т.А. Исследование характеристик поля рассеянного солнечного излучения в сферической атмосфере // Тезисы Всесоюзного совещания по рассеянию света в атмосфере, Алма-Ата, 1969. Алма-Ата: Изд-во «Наука» КазССР, 1969. С. 5-6.

58. Сушкевич Т.А. Некоторые качественные закономерности радиационного поля Земли // 8-е научное совещание по оптике атмосферы и актинометрии. Томск: Изд. ИОА СО АН СССР, 1970. С. 15-16.

59. Гермогенова Т.А., Копрова Л.И., Малкевич М.С., Сушкевич Т.А. Исследование характеристик поля рассеянного солнечного излучения в сферической атмосфере // Рассеяние света в земной атмосфере. Алма-Ата: Изд. "Наука" Каз.ССР, 1972. С. 17-20.

60. Сушкевич Т.А., Раевская И.С. Первый порядок рассеяния света в безоблачной сферической атмосфере // Препринты ИПМ АН СССР. 1976. № 118. 32 с.

61. Назаралиев М.А., Сушкевич Т.А. Расчеты характеристик поля многократно рассеянного излучения в сферической атмосфере // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1975. Т. 11. № 7. С. 705-717.

62. Сушкевич Т.А., Коновалов Н.В. Об области применимости плоской модели в задачах о многократном рассеянии излучения в земной атмосфере // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1978. Т. 14. № 1. С. 44-57.

63. Сушкевич Т.А. Об уравнении переноса в сферической геометрии с пространственной неоднородностью и рефракцией // Численное решение задач атмосферной оптики. Сборник научных трудов ИПМ им. М.В.Келдыша АН СССР. / Под редакцией Масленникова М.В., Сушкевич Т.А. М.: ИПМ АН СССР, 1984. С. 138-151.

64. Сушкевич Т.А. Об уравнении переноса в сферической геометрии с пространственной неоднородностью и рефракцией // Тезисы докладов на X Всесоюзном симпозиуме по распространению лазерного излучения в атмосфере. Томск: ИОА СО АН СССР, 1989. С. 85.

65. Сушкевич Т.А. О сферической модели излучения Земли // Вычислительная математика и математическое моделирование. Труды международной конференции, посвященной 75-летию академика Г.И. Марчука и 20-летию Института вычислительной математики РАН / Под ред. академика В.П. Дымникова. Т. 1. М.: ИВМ РАН, 2000. С. 168-191.

66. Сушкевич Т.А. Численное решение задач атмосферной оптики // Научные труды ИПМ им. М.В.Келдыша АН СССР. М.: ИПМ им.

М.В.Келдыша АН СССР, 1984. 234 с.

67. Сушкевич Т.А. О решении задач атмосферной коррекции спутниковой информации // Исслед. Земли из космоса. 1999. № 6. С. 49-66.

68. Сушкевич Т.А. К истории первого научного эксперимента по дистанционному зондированию Земли на пилотируемом космическом корабле // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008b. Выпуск 5. Том 1. С. 315-322.

69. Сушкевич Т.А. Проблемы и перспективы дистанционного зондирования. // Труды ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Будущее прикладной математики: Лекции для молодых исследователей. Поиски и открытия. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. С. 31-58.

70. Сушкевич Т.А. Математические модели переноса излучения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. 661 с.

71. 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.

72. Ленобль Ж. Перенос радиации в рассеивающих и поглощающих атмосферах. Стандартные методы расчета: Пер. с англ. Шифрина К.С. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 263 с.

73. Сушкевич Т.А., Максакова С.В. Обзор методов учета земной поверхности и задачах дистанционного зондирования в расчетах радиационного поля Земли – 2 // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 1999. № 52. 32 с.

74. Сушкевич Т.А., Максакова С.В. Обзор методов учета земной поверхности и задачах дистанционного зондирования в расчетах радиационного поля Земли – 3 // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 1999. № 53. 32 с.

75. Сушкевич Т.А., Максакова С.В. Обзор методов учета земной поверхности и задачах дистанционного зондирования в расчетах радиационного поля Земли – 4 // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 1999. № 54. 32 с.

76. Сушкевич Т.А. О моделировании переноса солнечного излучения в сферической атмосфере Земли и облаках // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12, № 3. С. 251-257. (Sushkevich T.A. Simulating solar radiation transfer in the Earth's spherical atmosphere and clouds // J. Atmosphere and ocean optics. 1999. Vol. 12, № 3. P. 251-257. Translated from russian publ.)

77. 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. 2008. Vol. 29. P. 2585-2597.

78. Sushkevich T.A. Pioneering Remote Sensing in the USSR. 2. Global spherical models of radiation transfer // International Journal of Remote Sensing. 2008. Vol. 29. P. 2599-2613.

79. Чандрасекар С. Перенос лучистой энергии / Пер. с англ. издания

Oxford, 1950, под ред. Е.С. Кузнецова. М.: Изд-во иностранной литературы, 1953. 432 с.

80. 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.

81. Сушкевич Т.А., Максакова С.В. Осесимметричная задача распространения излучения в сферическом слое. - I. Характеристики уравнения переноса // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 1997. № 65. 32 с.

82. Сушкевич Т.А., Максакова С.В. Осесимметричная задача распространения излучения в сферическом слое. - II. Алгоритм вычисления криволинейных координат на траекториях характеристик // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 1998. № 1. 32 с.

83. Сушкевич Т.А., Владимирова Е.В. Осесимметричная задача распространения излучения в сферическом слое. - III. Алгоритм расчета оптической толщины и функции пропускания отрезка траектории светового луча в неоднородной земной атмосфере // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 1997. № 74. 24 с.

84. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Владимирова Е.В., Игнатъева Е.И., Куликов А.К., Максакова С.В. Сферическая модель переноса излучения в атмосфере Земли. - I. Обзор // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 1997. № 84. 32 с.

85. Сушкевич Т.А., Владимирова Е.В. Сферическая модель переноса излучения в атмосфере Земли. - II. Криволинейная система координат. Характеристики уравнения переноса // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 1997. № 73. 28 с.

86. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Владимирова Е.В., Игнатъева Е.И., Куликов А.К., Максакова С.В. Сферическая модель переноса излучения в атмосфере Земли. - III. Постановка задачи. Метод решения // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 1997. № 85. 32 с.

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

88. Сушкевич Т.А., Владимирова Е.В. Об оптическом передаточном операторе сферической системы атмосфера-Земля // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2000. № 47. 30 с.

89. Сушкевич Т.А., Владимирова Е.В. О базовых моделях функций влияния краевой задачи теории переноса излучения для сферического слоя // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2002. № 55. 24 с.

90. Сушкевич Т.А., Владимирова Е.В. Оптический передаточный оператор сферической системы атмосфера-Земля // Оптика атмосферы и океана. 2003. Т. 16. № 4. С. 305-310

91. Сушкевич Т.А., Владимирова Е.В. О модели учета отражающей границы в задачах переноса излучения в сферической оболочке // Сиб. журн. вычисл. математики. 2003. Т 6. № 1. С. 73-88.

92. Сушкевич Т.А. Космические проекты: информационно-математический аспект и супервычисления (история и перспективы) // Вестник Южно-Уральского государственного университета (серия Математическое моделирование и программирование). 2011. Вып. 8. № 17 (234). С. 4-19.

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

94. Fessenkoff V. Détermination de l'albedo de la Terre // Сообщения Харьковского математического общества. Вторая серия. 1915. Т. 14, выпуск 5. С. 229-238. (Фесенков В.Г. Определение альbedo земли) <http://mi.mathnet.ru/rus/khmo/v14/i5/p229>

95. Барабашов Н.П. Определение альbedo земного шара // Русский Астрономический журнал. 1924. Т. 1. Вып. 3-4. С. 58-67.

96. Солнечная система: Пер. с англ. под ред. В.И.Мороза / Коллективная монография под ред. Дж. Койпера. Т. 3. Планеты и спутники / Под ред. Дж.П.Койпера, Б.М.Миддльхерст. М.: Изд-во Иностранной литературы, 1963. 520 с. (Kuiper and Middlehurst, Chicago, 1961.

97. Danjon A. The Earth as a Planet / ed. Kuiper G.P. Chicago, The University of Chicago Press. 1954. Chap. 15, Sec. 3. 751 p. (Серия The Solar System. V. 3)

Приложение

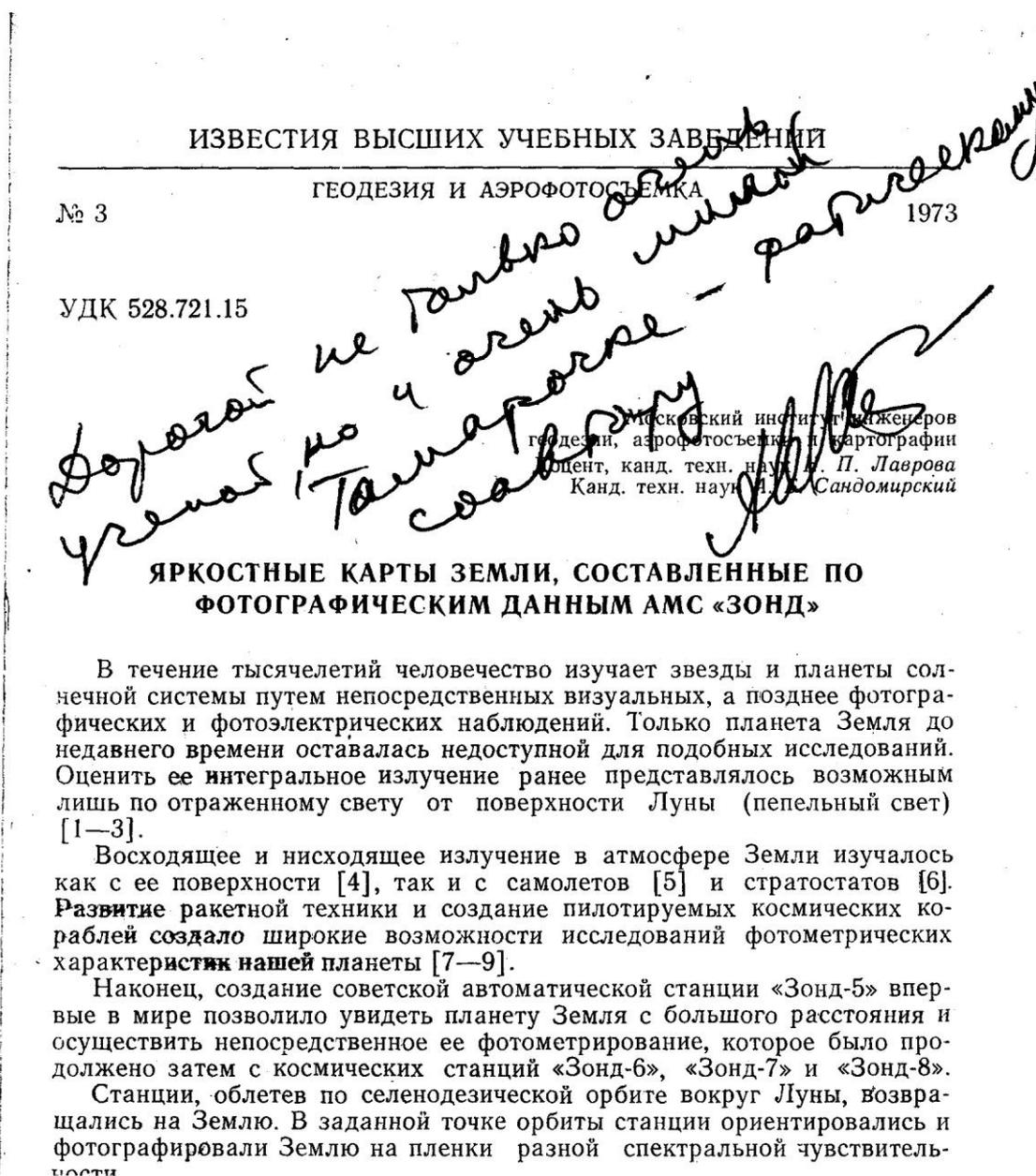
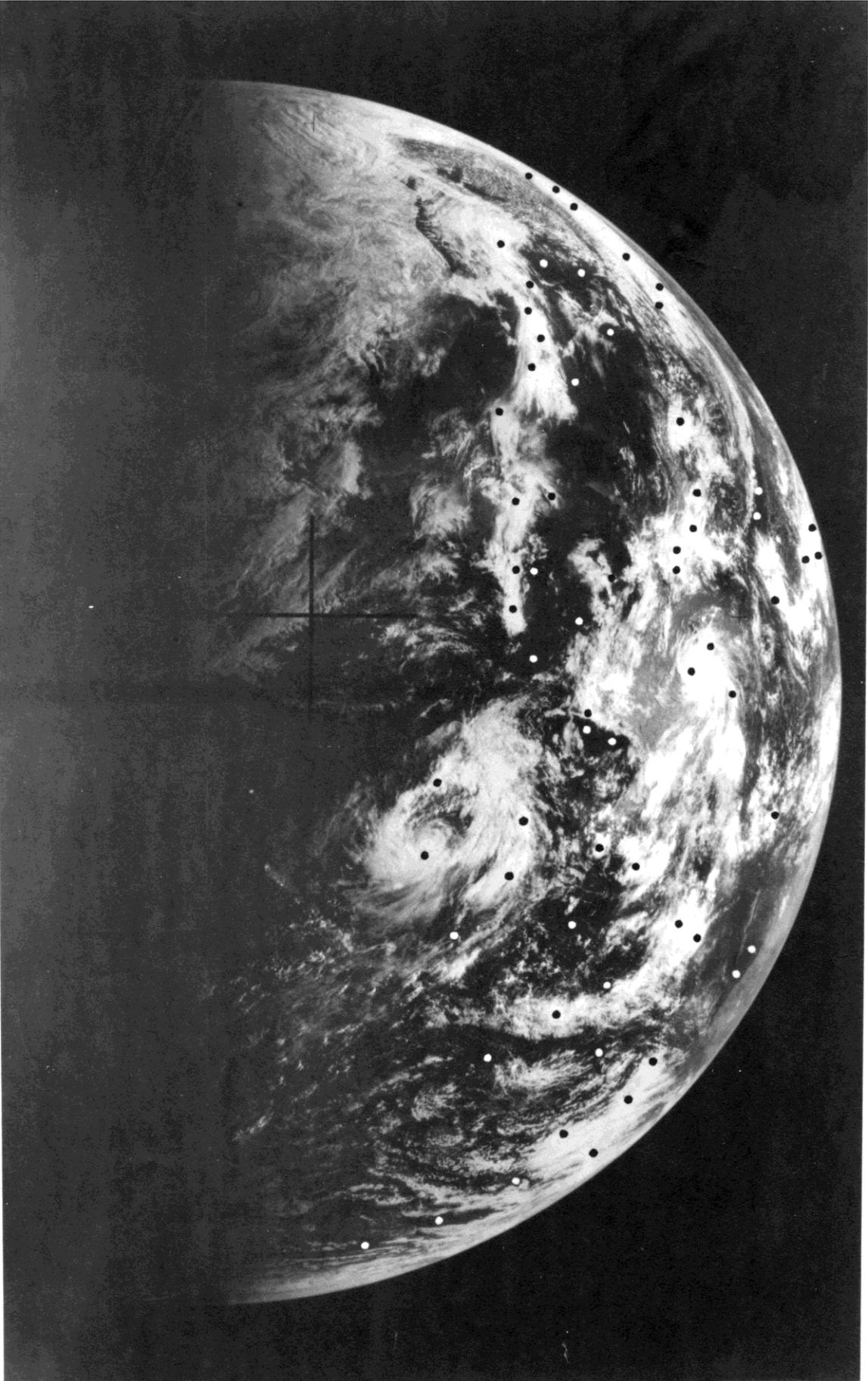


Рис. 1. Скан статьи с автографом А.Б.Сандомирского.

Рис. 2. Яркостной снимок Земли с АМС «Зонд-8» в направлении терминатора, т.е. перпендикулярно солнечному потоку, когда видна половина Земли и наблюдается переход от освещенной стороны к сумеречным и ночным условиям. Точками помечены регионы, где проводилось сравнение измеренных и расчетных значений яркости: «белые» точки над океаном, «черные» точки над облаками. Аналогичные снимки были получены с АМС «Зонд-5» и «Зонд-6».



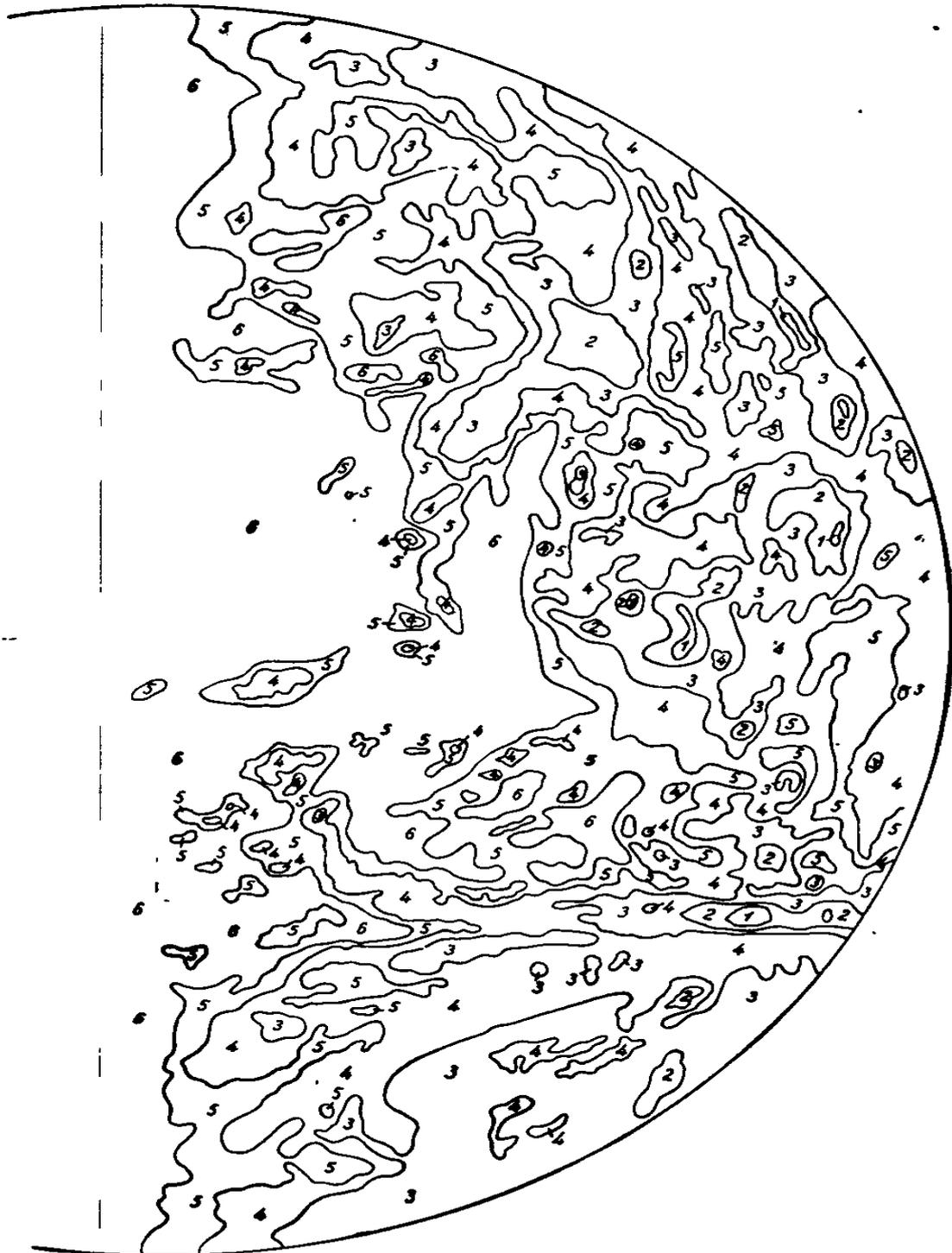


Рис. 3. По фотометрическим яркостным разрезам построены изофоты – геометрическое место одинаковой яркости. На рис. приведен пример изофот для снимка с АМС «Зонд-6». Для передачи яркостных градаций выбрано 6 фотометрических зон. Выбор объясняется глобальностью съемки, осреднением яркостных характеристик мелких объектов, а также точностью метода.

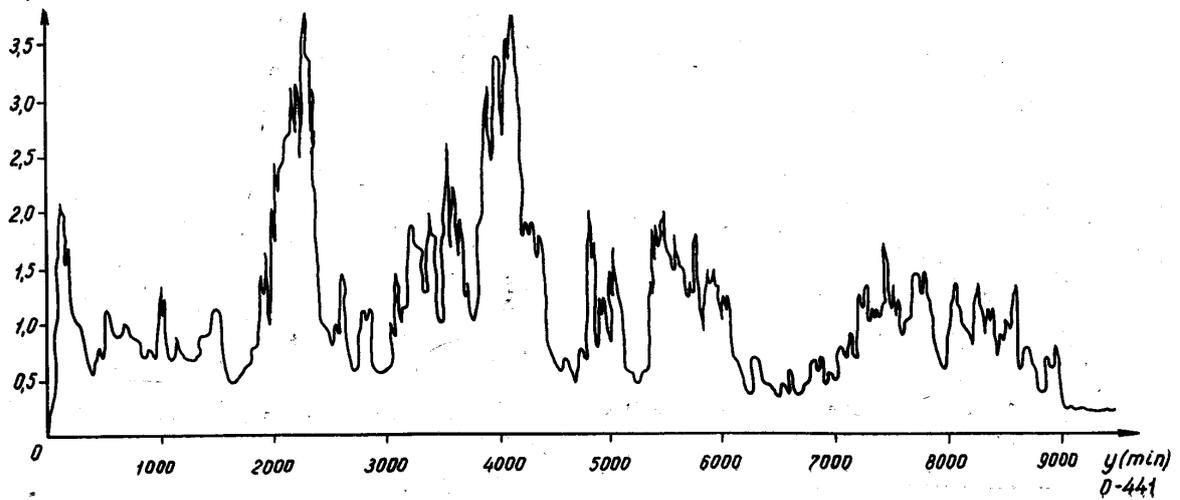


Рис. 4. Типичный яркостной разрез в районе экватора для снимка с «Зонд-5».

Интегрирование по видимому диску планеты полученных в результате фотометрического анализа снимков Земли значений яркостей позволило рассчитать её силу света, звездную величину и разность звездных величин Земли и Солнца [22-23]. Для сопоставления представлены данные, полученные Данжоном путем измерений «пепельного света Луны» [97]. Результаты фотометрии со станций «Зонд» хорошо согласуются с данными Данжона.

Т.А.Сушкевич совместно с соавторами [22-23] была выполнена серия расчетов $E - S$ как функции фазы Земли путем численного решения уравнения переноса солнечного излучения в рассеивающей сферической атмосфере Земли. В расчете использованы модели атмосферы, полученные путем осреднения ряда экспериментальных натуральных данных о высотной зависимости коэффициента рассеяния атмосферного воздуха и аэрозольно-молекулярных индикатрисах рассеяния [35]. Расчет проводился для двух крайних состояний подстилающей поверхности: на уровне океана с нулевым альбедо (водная поверхность, безоблачно) и на высоте 10 км с альбедо 0,8 (сплошная облачность).

Полученные расчетные значения $E - S$ согласуются с экспериментальными данными, очерчивая пределы естественных вариаций звездной величины Земли. Расчеты подтвердили также наличие изгиба расчетных значений $E - S$ в районе фазы Земли 110-150, который проявляется также по данным Данжона. Нарушение плавного спада фазовой функции связано с наличием сильной анизотропии атмосферной индикатрисы рассеяния, так как при больших фазах в образование яркости планеты вносит рассеяние солнечного излучения в атмосфере и стратосферных аэрозольных слоях, а не отражение от

подстилающей поверхности. Эта гипотеза подтверждается сравнением расчетных значений $E - S$ при фазах 150 и 160, когда разность $E - S$ оказалась больше при нулевом альбедо, а не при наличии сплошной облачности. При больших фазах яркость облачности невелика из-за косой засветки Солнцем, в то время как облачность экранирует нижележащую атмосферу. Фактически уточнена аналитическая формула Данжона.

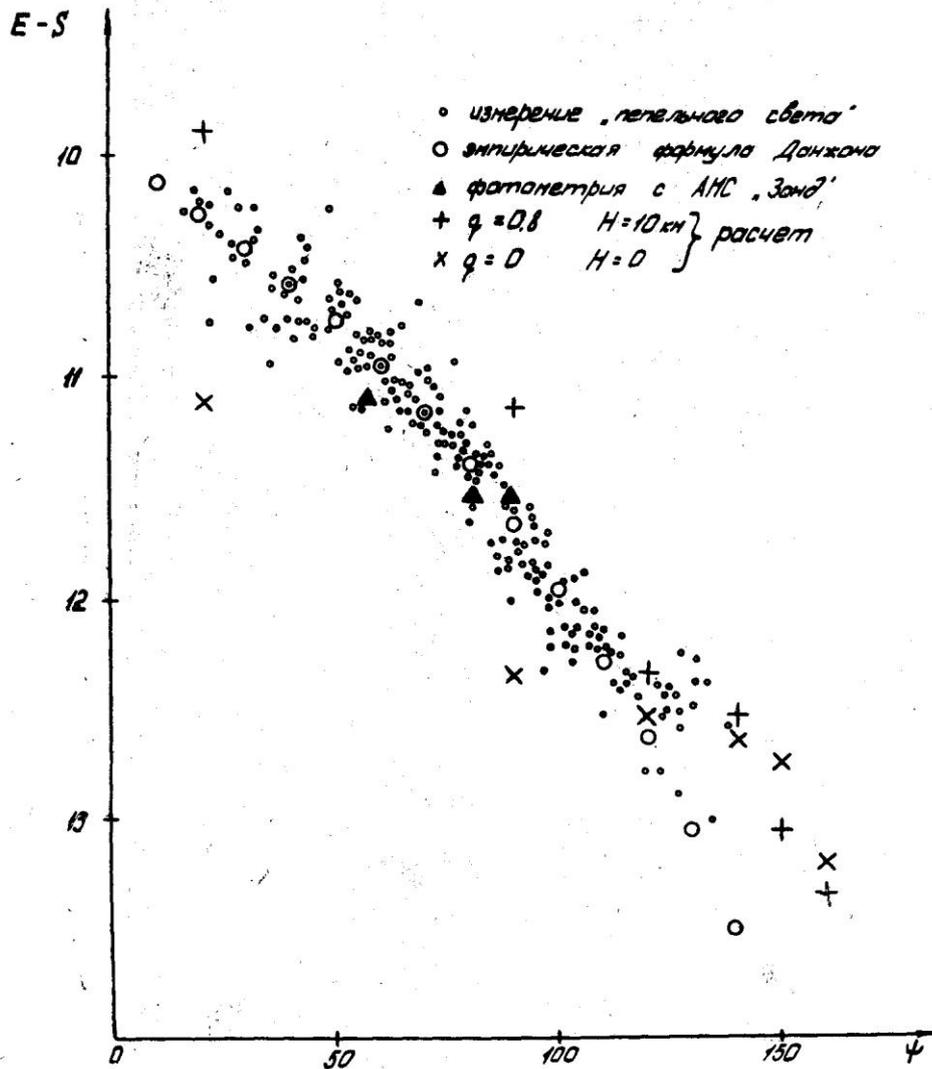


Рис. 5. Представлена зависимость разности звездных величин Земли и Солнца $E - S$ как функция фазы Земли («фазовая кривая»).