

# О ДОСТИЖЕНИЯХ ТЕОРИИ

## ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ

### *Моделирование переноса излучения в природных средах*

***К 60-летию запуска в СССР ПЕРВОГО СПУТНИКА***

Т.А.Сушкевич, М.А.Марченко, С.А.Стрелков, С.В.Максакова,  
В.В.Белов, В.В.Козодеров, С.М.Пригарин, Б.А.Фомин,  
В.А.Фалалеева, М.В.Тарасенков, Г.Э.Колокутин, А.С.Кузьмичев,  
А.А.Николенко, П.В.Страхов, Б.М.Шурыгин, Л.Д.Краснокутская

***ФГУ "ФИЦ Институт прикладной математики  
им. М.В. Келдыша РАН"***

***Пятнадцатая Всероссийская открытая конференция  
"Современные проблемы дистанционного зондирования  
Земли из космоса", 13 – 17 ноября 2017 года,  
Институт космических исследований РАН, г. Москва,***

***СЕКЦИЯ D: Дистанционные методы исследования  
атмосферных и климатических процессов***

**Работа поддержана РФФИ (проекты 15-01-00783, 17-01-00202,  
15-01-08988, 16-35-00585 мол-а) и проектом 3.5 ОМН ПФНИ РАН**

Home Page

Title Page

Contents



Page 1 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 2.

# ЖЕЛАЮЩИЕ МОГУТ скопировать презентацию!

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 2 of 155

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 3.

***О репрезентативных и быстрых  
детерминированных и стохастических  
методах моделирования радиационных полей  
в природных средах в диапазоне от УФ до  
ММВ.***

Сушкевич Т.А. (1), Стрелков С.А. (1), Максакова С.В. (1),  
Марченко М.А. (2), Пригарин С.М. (2), Белов В.В. (3,4),  
Тарасенков М.В. (3,4), Козодеров В.В. (5), Краснокутская Л.Д. (6),  
Фалалеева В.А. (6), Фомин Б.А. (7),

- (1) Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва
- (2) Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Ново-сибирск
- (3) Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск
- (4) Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск
- (5) МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва
- (6) Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва
- (7) Центральная Аэрологическая Обсерватория, Долгопрудный

Home Page

Title Page

Contents



Page 3 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

# *Детерминированные и стохастические методы моделирования переноса поляризованного излучения в природных средах*

Сушкевич Т.А. (1), Стрелков С.А. (1), Максакова С.В. (1),  
Колокутин Г.Э. (2), Фомин Б.А. (2), Фалалеева В.А. (3),  
Белов В.В. (4,5), Тарасенков М.В. (4,5), Козодеров В.В. (6),  
Пригарин С.М. (7), Кузьмичев А.С. (8), Николенко А.А. (8),  
Страхов П. В. (8), Шурыгин Б. М. (8)

- (1) Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва
- (2) Центральная Аэрологическая Обсерватория, Долгопрудный
- (3) Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва
- (4) Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск
- (5) Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск (6)  
МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва
- (7) Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Ново-  
сибирск
- (8) Московский физико-технический институт (государственный университет), Долго-  
прудный

Home Page

Title Page

Contents



Page 4 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

Home Page

Title Page

Contents



Page 5 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 5.

# *О полуаналитических методах разделения вкладов атмосферы и океана в радиационное поле Земли*

**Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В.  
Институт прикладной математики им. М.В.  
Келдыша РАН, Москва**

This is Slide No. 6.

*В современных геополитических условиях правильная стратегия — это развитие и наращивание отечественного информационно-математического обеспечения, которое является неотъемлемой компонентой любого космического проекта, модели климата или прогноза погоды.*

*В настоящей работе все разработки отечественные! Работа в целом носит оригинальный характер, нет аналогов ни в России ни за рубежом, объективно отражает отечественный научный потенциал державы, покорившей космос.*

Home Page

Title Page

Contents



Page 6 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 7.

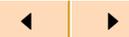
*Предлагается идея рассмотрения сложнейших проблем эволюции, климата, экологии и дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) как сопряженные, а радиационное поле Земли — это общая субстанция и объединяющий фактор: электромагнитное излучение — единое физическое поле.*

*Например, трансграничный перенос загрязнений, который влияет на экологию и состояние окружающей среды, может быть обнаружен методами ДЗЗ, а далее через перенос лучистой энергии, зависящей от загрязнителей сред, может влиять на климат и в конечном итоге на тренд эволюции Земли как планеты.*

Home Page

Title Page

Contents



Page 7 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 8.

*Непреодолимая сложность проблемы состоит в том, что для исследований планеты не допустимы натуральные эксперименты и возможны только мониторинг и наблюдения разными средствами, с одной стороны, а с другой стороны на момент измерений радиации невозможно восстановить весь набор оптико-геофизических и оптико-метеорологических параметров системы "атмосфера-суша-океан", от которых зависит радиация, и не возможно повторить условия наблюдений, так как среда непрерывно изменяется и никогда не повторяется.*

Home Page

Title Page

Contents



Page 8 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 9.

*И только математическое моделирование позволяет провести теоретико-расчетные исследования столь сложных проблем и получить качественные и количественные оценки для анализа и прогнозов.*

Home Page

Title Page

Contents



Page 9 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 10.

*Интерес к проблеме переноса излучения в природных средах в последнее время заметно возрос в связи с разработками космических систем глобального мониторинга Земли и многосторонним анализом физических, химических, метеорологических, биофизических процессов, ответственных за формирование радиационного поля и радиационный баланс Земли.*

Home Page

Title Page

Contents



Page 10 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

*В связи с ростом риска естественно-природных и техногенных аварий, проведения военных операций и возможных крупномасштабных террористических актов экологическая и технологическая безопасность переходят в разряд стратегических и важнейших социально-экономических факторов, а математические модели становятся эффективным инструментом повышения качества и оперативности экологического прогнозирования и выявления, в упреждающем режиме, предпосылок экологических катастроф на основе компьютерного моделирования "сценариев" и дают значительный социально-экономический эффект за счет предупреждения и своевременного принятия мер по снижению их отрицательных последствий.*

Home Page

Title Page

Contents



Page 11 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

*Особую значимость приобретает проблема адекватной оценки роли и веса моделируемых подсистем в долгосрочной эволюции всей "Глобальной системы" (определение введено академиком Н.Н.Моисеевым), в том числе связанных с радиационным полем Земли. Построение радиационной модели Земли как планеты и среды обитания человечества оказывается чрезвычайно важным для решения ряда сложных прикладных и технических проблем, связанных, в частности, с развитием методов и средств космического землеведения, космических систем землеобзора, ориентации, стабилизации, навигации, дополнительного энергообеспечения космических аппаратов на околоземных орбитах за счет использования второй стороны солнечных батарей, ориентированных на прием солнечного излучения, отраженного от Земли, а также с проблемой возврата на Землю космических кораблей с экипажем из межпланетных полетов и т.д.*

Home Page

Title Page

Contents



Page 12 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 13.

Позвольте напомнить:  
*22 июня ежегодно отмечается*  
**"ДЕНЬ ПАМЯТИ ПОКОЛЕНИЙ и СКОРБИ"** ,  
*а 22 июня 1941 года началась Великая*  
*Отечественная война.*

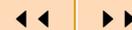
До сих пор специалисты и военные историки и политики уточняют, сколько же вооружений и военных было на границе со стороны напавших.

Это самый длинный световой день и, когда в четыре часа утра началось нашествие, уже было светло.

Home Page

Title Page

Contents



Page 13 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 14.

*В наш жестокий 21-й век подобное уже невозможно: в результате научно-технической революции, свершившейся в 20-м веке, созданы и обеспечивают БЕЗОПАСНОСТЬ страны "ракетно-ядерный щит" и "космическая разведка".*

*Я об этом не случайно вспомнила, поскольку имеет непосредственную связь с темой доклада.*

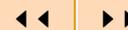
*Ныне сработала бы система космической группировки видовой разведки и система упреждения старта ракет из космоса — из космоса видно все!*

*Окончание "холодной войны" стало возможно, когда был достигнут паритет СССР-США в космосе.*

Home Page

Title Page

Contents



Page 14 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 15.

*Настоящая презентация — это дань памяти и признание заслуг первопроходцев в освоении космического пространства и космических технологий дистанционного зондирования Земли и создании масштабного научного наследия в развитии теории и практики применения переноса заряженных частиц, нейтронов, лучистой энергии и фотонов света, которое может "поработать" в интересах "Проекта Арктики" и других важных приложений!*

Home Page

Title Page

Contents



Page 15 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 16.

Двадцатый век в истории земной цивилизации — это век научно-технической революции, связанной с тремя великими открытиями:

— проникновение в тайны и овладение ядерной энергией,

— покорение космического пространства и выход человека в космос,

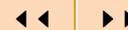
— изобретение электронно-вычислительных машин (ЭВМ) и создание информационных технологий.

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

Home Page

Title Page

Contents



Page 16 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

## 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 называли *"математическое моделирование"* или *"computer science"*.

Разработка информационно-математических аспектов этих проектов привела к расцвету **кинетической теории переноса нейтронов, заряженных частиц, излучения разной природы.**

Home Page

Title Page

Contents



Page 17 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 18.

## ***Посвящается памяти***

***выпускников механико-математического факультета  
Ленинградского университета, которые внесли важный  
вклад в теорию переноса излучения***

- академика Гурия Ивановича Марчука, последнего Президента АН СССР, Героя Социалистического Труда — 90-летие со дня рождения (08.06.1925-24.03.2013);***
- академика Виктора Викторовича Соболева, директора Обсерватории Ленинградского университета — 100-летие со дня рождения (02.09.1915-07.01.1999);***
- академика Кирилла Яковлевича Кондратьева, ректора Ленинградского университета — 95-летие со дня рождения (14.06.1920-01.05.2006);***
- академика Василия Сергеевича Владимиров, директора Математического Института им. В.А.Стеклова, Героя Социалистического Труда (09.01.1923 - 03.11.2012),***

Home Page

Title Page

Contents



Page 18 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

*а также выпускников Московского университета, которые заложили основы вычислительной математики и методов решения задач электромагнетизма и создали выдающуюся научную школу в Институте Келдыша и МГУ:*

- *академика Мстислава Всеволодовича Келдыша, Президента АН СССР, единственного математика трижды Героя Социалистического труда, Главного Теоретика космонавтики, основателю и директору Института прикладной математики АН СССР (10.02.1911-24.06.1978)*
- *академика Тихонова Андрея Николаевича, дважды Героя Социалистического труда (30.10.1906-08.10.1993);*
- *академика Самарского Александра Андреевича, Героя Социалистического труда (19.02.1919-11.02.2008),*

*и моего учителя профессора Евграфа Сергеевича Кузнецова (13.03.1901 - 17.02.1966), который в 1955 году создал уникальный и единственный в мировой науке отдел "Кинетические уравнения" в Институте Келдыша.*

С этими великими учеными я встретилаь, когда мне было всего 20 лет, и они оказали колоссальное влияние на формирование моего пути в науке и работе.

Home Page

Title Page

Contents



Page 19 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

***Посвящается  
"Международному Году света и  
световых технологий  
(IYL 2015)",***

***который был провозглашен на 71-м  
пленарном заседании 68-й сессии Генеральной  
ассамблеи ООН.***

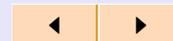
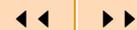
***"Свет — это символ единения, символ  
мудрости", — подчеркнул глава ООН 19  
января на церемонии в штаб-квартире  
ЮНЕСКО в Париже.***

***Свет — это одна из фундаментальных форм  
электромагнитного поля, которая обладает  
свойством корпускулярно-волнового  
дуализма (электромагнитная волна и фотон)  
и описывается и волновой и корпускулярной  
квантовой теориями, в том числе  
кинетической теорией переноса излучения.***

Home Page

Title Page

Contents



Page 20 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

*Международный Год света  
напоминает о роли света в  
жизни не только ученых, но и  
человечества в целом, и важно  
повысить всеобщий уровень  
исследований о том,  
как световые технологии  
могут содействовать решению  
глобальных проблем и призваны  
привнести преобразования в  
XXI век, подобные тем, которые  
привнесла электроника в XX  
век.*

Home Page

Title Page

Contents



Page 21 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 22.

Планета Земля — естественный пример динамической системы с нелинейными процессами, находящейся в непрерывных изменениях. Древние астрономы использовали свет для наблюдений за другими планетами и звездами.

И не случайно наблюдения и исследования планеты Земля проводятся с помощью "световых технологий", поскольку скорость света такова, что исследуемый объект можно считать "стационарным" и в теории переноса излучения практически решаются стационарные кинетические уравнения без временной зависимости.

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 22 of 155

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 23.

С 2004 года более 40 стран участвуют в международном проекте GEOSS — Глобальная Система Наблюдений Земли (ГСНЗ).

**В повестке дня современной цивилизации ведущее место занимает освоение и покорение региона Арктики.**

*Этот фундаментальный международный проект почти такого же масштаба, как проект освоения и покорения космоса, и для его реализации чрезвычайно важно использовать приобретенный опыт и в теории и в практике при создании комплексных систем ПРО и ПВО, включая системы оперативного наблюдения и глобального мониторинга, принятия решения и управления с использованием суперкомпьютеров, информационных технологий и технологий Интернет, ГРИД, "облачных", ГЛОНАСС и т.п.*

Home Page

Title Page

Contents



Page 23 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

## Немало аналогий:

этот объект исследования виден, но труднодоступен, комплексный и междисциплинарный, высокотехнологичный и фундаментальный, международный и цивилизационный, до сих пор пока только удел энтузиастов и увлеченных, *осталось ещё много загадок и уже остро стоят несколько ключевых для планеты Земля вопросов, хотя история изучения Арктики насчитывает сотни лет.* Почему смещается северный полюс? Почему изменяются океанические течения? Почему тает лед? Какова угроза "всемирного" потопа и "ледникового периода"? Как могут измениться климат и биосфера за полярным кругом под влиянием естественно-природного и антропогенно-техногенного воздействия на окружающую среду? Какие угрозы связаны с увлечением добычей углеводородов на шельфе океана и последствиями расширения сферы нефте-газовой отрасли? Как обеспечить круглогодичный Северный морской путь для судов?

Home Page

Title Page

Contents



Page 24 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 25.

Ответы на подобные вопросы можно получить, только если всем миром вплотную заняться "Программой Арктика". В последние годы такой повышенный интерес наметился.

Арктика — сложнейший динамический объект  
исследования



[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 25 of 155

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 26.

*Уже 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.*

Home Page

Title Page

Contents



Page 26 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 27.

**Проект "Арктика" нужно было бы придумать, чтобы вновь возобновить систематические комплексные фундаментальные научные теоретические и методические исследования оптических и радиационных процессов в природных средах и инициировать создание новой космической группировки.**

***16 марта 1962 года запуск первого искусственного спутника Земли (ИСЗ) серии "Космос" положил начало осуществлению КОМПЛЕКСНОЙ НАУЧНОЙ ПРОГРАММЫ оптических исследований околоземного космического пространства и Земли.***

Во времена СССР был накоплен опыт исследований радиационных полей на полюсах Земли.

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 27 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

При поддержке РФФИ в 2005 году вышла монография, в которой около  
400 литературных ссылок  
(у Т.А.Сушкевич более 500 публикаций!):

**Сушкевич Т.А. Математические модели переноса излучения.  
М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. 661 с. (2-е изд. в 2006 г.)**



Есть сайты, где бесплатно можно скачать книгу, в частности:

<http://ru.bookzz.org/book/1311837/3899b1>

Home Page

Title Page

Contents



Page 28 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 29.

*Открытие света и его свойств и приложений связано с именами великих ученых, таких как*

- *Аристотель, Галилео Галилей, Иоганн Кеплер,*
- *Исаак Ньютон (теория света, цвета, рефракции),*
- *Христиан Гюйгенс ("Трактат о свете"; теория отражения, преломления и двойного лучепреломления),*
- *Огюст Френель (понятие "световая волна", теория дифракции),*
- *М.В.Ломоносов (корпускулярно-кинетическая теория),*
- *Уильям Гершель (открыл инфракрасное излучение),*
- *Иоганн Вильгельм Риттер (открыл ультрафиолетовое излучение),*
- *Майкл Фарадей (предсказал существование электромагнитных волн),*

Home Page

Title Page

Contents



Page 29 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

- Джеймс Максвелл (теория электромагнитного поля в классической физике, теория электромагнитных взаимодействий, обоснование существования электромагнитных волн, кинетическая теория),
- Герман Гельмгольц (зрение и теория цветоощущения),
- А.Г.Столетов (фотоэффект, закон Столетова),
- П.Н.Лебедев (световое давление),
- Орест Хвольсон (диффузия света, актинометрия, **интегральное уравнение переноса**),
- Нобелевский лауреат Макс Планк (теория теплового излучения, излучение абсолютно черного тела, открытие квантовой энергии, начало квантовой физики, понятие "фотон" ),
- Нобелевский лауреат Альберт Эйнштейн (корпускулярная теория света; интенсивность света как мера плотности световых квантов; теория рассеяния света на термодинамических флуктуациях в среде, понятие "фотон" ),

Home Page

Title Page

Contents



Page 30 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 31.

- *Нобелевский лауреат Макс Борн (квантовая теория, оптическая активность кристаллов, жидкости, газа, рассеяние света и частиц),*
- *Людвиг Больцман (основатель молекулярно-кинетической теории, кинетическое уравнение переноса излучения и частиц),*
- *Нобелевский лауреат Субрахманьян Чандрасекар (перенос лучистой энергии, "черные дыры"),*
- *Нобелевский лауреат Чарльз Као (передача света и информации через волоконно-оптический кабель),*
- *Нобелевские лауреаты Арно Пензиас и Роберт Вильсон (открытие реликтового космического электромагнитного микроволнового излучения) и др.*

This is Slide No. 32.

Восприятие света в различных культурах эволюционировало сквозь века. Можно вспомнить вклад арабского ученого XI века Ибн аль-Хайсама в искусство эпохи Возрождения, который в 1015 г. основал теорию влияния естественного света и цветных лучей на зрение.

Альтернативная энергия, медицина, сельское хозяйство, искусство, кинематограф, исследование космоса, астрофизика, нанодиагностика, нанотехнологии, фотоника, лазеры... Области применения световых технологий можно перечислять долго.

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 32 of 155

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 33.

Гигантский научно-технический прогресс и беспрецедентный рост влияния человека на природу в XX веке ещё в 70-е — 90-е годы привели ученых всего мира, занимающихся анализом нарастающих антропогенных и естественно-природных воздействий на окружающую среду, к выводу: *всемирная система мониторинга и иерархия моделей - главные инструменты изучения и предсказуемости изменений природных процессов и разделения естественных и антропогенных воздействий на сложнейшую динамическую систему, какой является планета Земля.*

В теоретических и прикладных исследованиях внедрился термин "*Глобальная система*": необходимы анализ и синтез знаний о развитии планетарной цивилизации.

Особую значимость приобретает *проблема адекватной оценки роли и веса моделируемых подсистем в долгосрочной эволюции всей "Глобальной системы", в том числе связанных с радиационным полем Земли.*

Home Page

Title Page

Contents



Page 33 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 34.

В течение тысячелетий человечество изучает звезды и планеты солнечной системы путем визуальных, а позднее фотографических и фотоэлектрических наблюдений.

Только планета Земля до середины 20-го века оставалась недоступной. Лишь по отраженному свету от поверхности Луны (пепельный свет) представлялось возможным оценить интегральное излучение Земли.

**Широкие возможности исследований радиационных характеристик Земли появились в результате создания ракетной и космической техники.**

Home Page

Title Page

Contents



Page 34 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 35.

Советские ученые и инженеры-конструкторы стояли у истоков космической эры и советские космические корабли и космонавты были первыми в космосе, а ныне уже более 40 стран присутствуют в космосе и нынешняя цивилизация не мыслит своего существования без космических технологий.

**Опыт покорения космоса безусловно полезен для освоения региона Арктики — много общего:** на каждом шагу подстерегает опасность, непредсказуемые перспективы последствий антропогенного вмешательства и каждый шаг "освоения" и "покорения" требуется тщательно анализировать, прогнозировать и просчитывать, привлекая интеллект не только нации, но и всего мирового научного сообщества, — важно "не навредить" человеку и планете в целом!

Home Page

Title Page

Contents



Page 35 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 36.

*Никита Николаевич Моисеев — признанный математик–философ и главный преемник наследия Владимира Ивановича Вернадского (12.03.1863 – 06.01.1945).*

*Однако, Моисеев не замечен в исследованиях радиационного поля Земли (особый случай "ядерная зима" ).*

*А Вернадский сформулировал ключевые проблемы и связи солнечного излучения со всем, что протекает на Земле (Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера. М.: Наука, 1989. 261 с.)*

This is Slide No. 37.

## ***В.И.Вернадский, 1926:***

***Своеобразным, единственным в своем роде, отличным и неповторяемым в других небесных телах представляется нам лик Земли — ее изображение в космосе, вырисовывающееся извне, со стороны, из дали бесконечных небесных пространств. В лике Земли выявляется поверхность нашей планеты, ее биосфера, ее наружная область, ограничивающая ее от космической среды. Лик Земли становится видным благодаря проникающим в него световым излучениям небесных светил, главным образом Солнца.***

Home Page

Title Page

Contents



Page 37 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

Home Page

Title Page

Contents



Page 38 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 38.

***В.И.Вернадский, 1926:***

*Мы едва начинаем сознавать их разнообразие, понимать отрывочность и неполноту наших представлений об окружающем и проникающем нас в биосфере **мире излучений**, об их основном, с трудом постижимом уму, привыкшему к иным картинам мироздания, **значении в окружающих нас процессах ...***

This is Slide No. 39.

*Солнечное излучение в диапазоне спектра длин волн 0.2–4 мкм — один из неотъемлемых факторов **жизнеобеспечения** человека, животного и растительного мира на Земле, а также одна из определяющих компонент земной **экосистемы и биосферы**, для поведения которых характерно взаимодействие отдельных компонент с проявлением синергизма (обратных связей, которые иногда приводят к взаимоусилению различных процессов).*

Home Page

Title Page

Contents



Page 39 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 40.

*Поле солнечного излучения влияет на механизмы изменчивости (динамические процессы: циркуляция, конвекция, турбулентный перенос; радиационные и фотохимические процессы) геофизического, метеорологического, климатического состояния Земли, которые обладают сложными нелинейными связями, затрудняющими предсказание возможных эффектов, оценку их величины и значимости.*

This is Slide No. 41.

***В.И.Вернадский, 1926:***

***Солнцем в корне переработан и изменен лик Земли... уже ясно огромное значение в биосфере коротких ультрафиолетовых волн солнечной радиации, длинных красных тепловых и промежуточных лучей видимого светового спектра. В строении биосферы... можем выделить ее части, играющие роль трансформаторов для этих трех различных систем солнечных колебаний***

***При дистанционном зондировании природных объектов носителем информации о состоянии окружающей среды является электромагнитное излучение Земли, которое регистрируется разными средствами.***

Home Page

Title Page

Contents



Page 41 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

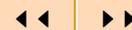
This is Slide No. 42.

*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 **активных системах** в качестве источника инсоляции могут использоваться лазерный или прожекторный луч.*

Home Page

Title Page

Contents



Page 42 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 43.

**Возрастает роль "космического землеведе-  
ния"** как той дисциплины, которая долж-  
на объединить усилия различных специали-  
стов и позволить им всем вместе "загово-  
рить" на общем языке спутниковых иссле-  
дований. Важным становится рассмотрение  
информационно-математических основ кос-  
мического землеведения, объединяющего меж-  
дисциплинарные исследования, связанные с  
оценкой информационного содержания дан-  
ных дистанционных и контактных измерений,  
с разработкой методов анализа и интерпре-  
тации аэрокосмических изображений, с оцен-  
кой состояния и пониманием проблем предска-  
зуемости глобальных и региональных измене-  
ний природных сред на базе временных рядов  
регулярных спутниковых наблюдений, иссле-  
дованиями по оптимизации и эффективности  
систем наблюдений в интересах различных об-  
ластей приложений.

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 43 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 44.

**Сложность задачи для оптических исследований региона Арктики обусловлена**

**— необходимостью использования многомерной сферической (для климата) или плоскопараллельной (ДЗЗ) геометрии (Сушкевич 1966, 2005),**

**— гетерогенностью и особым составом, состоянием и распределением всех компонент атмосферы,**

**— специфическим взаимодействием излучения с веществом как в атмосфере, так и на земной поверхности,**

**— условиями инсоляции,**

**— метеорологическими и климатическими условиями.**

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 44 of 155

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 45.

**Особенность региона такова, что из-за труднодоступности отдельных районов и отсутствия сети постоянных метеорологических наблюдений в Арктике, математическое моделирование радиационных полей в большей степени является "сценарным", в том числе из-за неполноты данных оптико-геофизических параметров гетерогенной среды, необходимых для корректного учета и рассеяния и поглощения в атмосфере.**

**Несомненно, математическое моделирование на суперкомпьютерах с параллельными алгоритмами является основой прогноза климата в Арктике под влиянием радиационного форсинга.**

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 45 of 155

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

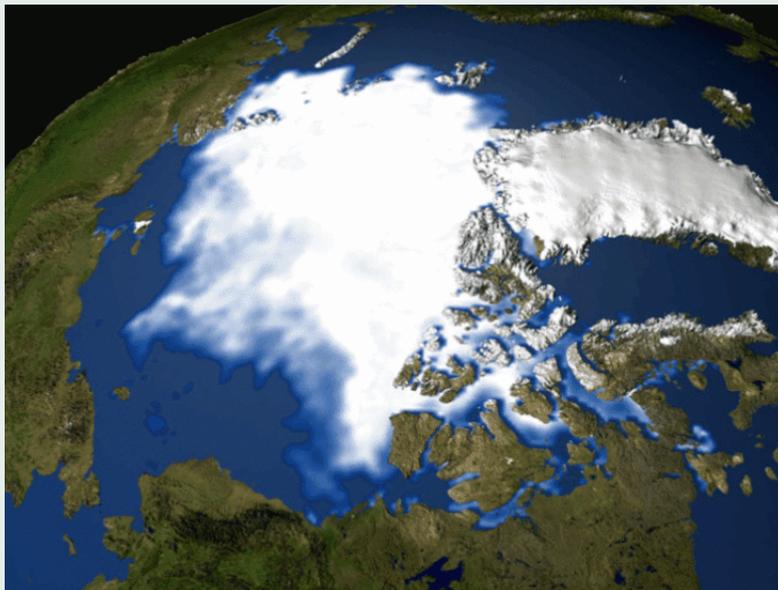
[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 46.

**Посмотрите, как реально выглядит регион Арктики из космоса. Снимок доступен в "облаках" — это уже признак международной кооперации.**

**Арктика — сложнейший гетерогенный пространственный объект исследования**



[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 46 of 155

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 47.

***Сложность становления космических исследований и реализации новых космических проектов*** обусловлена тем, что приходится иметь дело с "замкнутым кругом":

- чтобы измерить характеристики радиационного поля Земли, нужны предварительные оценочные расчеты этих характеристик на основе моделей теории переноса излучения с учетом многократного рассеяния и поглощения солнечного и собственного излучения,

- чтобы смоделировать перенос излучения в системе "атмосфера - земная поверхность", нужны данные о пространственных и спектральных распределениях оптико-геофизических параметров атмосферы, описывающих взаимодействие излучения с компонентами земной атмосферы и земной поверхностью.

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 47 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 48.

*Можно утверждать, что в России создан научный потенциал для решения многомерных кинетических уравнений переноса излучения.*

Наиболее сложная ситуация связана с оптико-метеорологической моделью системы "атмосфера-земная поверхность" и микрофизическими характеристиками взаимодействия излучения с компонентами атмосферы и земной поверхности в условиях Арктики в зависимости от регионов, сезонов, времени суток и "оптической погоды".

*Следует надеяться на новые прорывные результаты в молекулярной спектроскопии и в теории рассеяния излучения в анизотропных средах. Современные суперкомпьютеры позволяют решать **БОЛЬШИЕ СЛОЖНЫЕ ЗАДАЧИ**, а методы и алгоритмы их решения уже разработаны.*

Home Page

Title Page

Contents



Page 48 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 49.

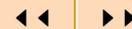
## Позвольте напомнить!

- В 1965–1966 гг. Т.А.Сушкевич разработала глобальную сферическую модель радиационного поля Земли, которая применялась в расчетах по большинству стратегических и прикладных проектов (до 1994 года, пока работали БЭСМ-6, АС-6 и ЭВМ ЕС-ряда).
- В 1972 году при полном зале в Институте физики атмосферы АН СССР была защищена *кандидатская диссертация*, оппонентами по которой были Г.А.Михайлов и К.С.Шифрин, а ведущей организацией был ГОИ им. С.И.Вавилова:  
*Сушкевич Т.А. Поле яркости сферической атмосферы. Дисс.канд. физ.-мат. наук. Москва, 1972.*
- Верификация методического и программного обеспечения проводилась на космических данных, получаемых с космических аппаратов "Зонд", и на данных полигонных исследований. С первых шагов было ясно, что структура радиационного поля Земли сложная!

Home Page

Title Page

Contents



Page 49 of 155

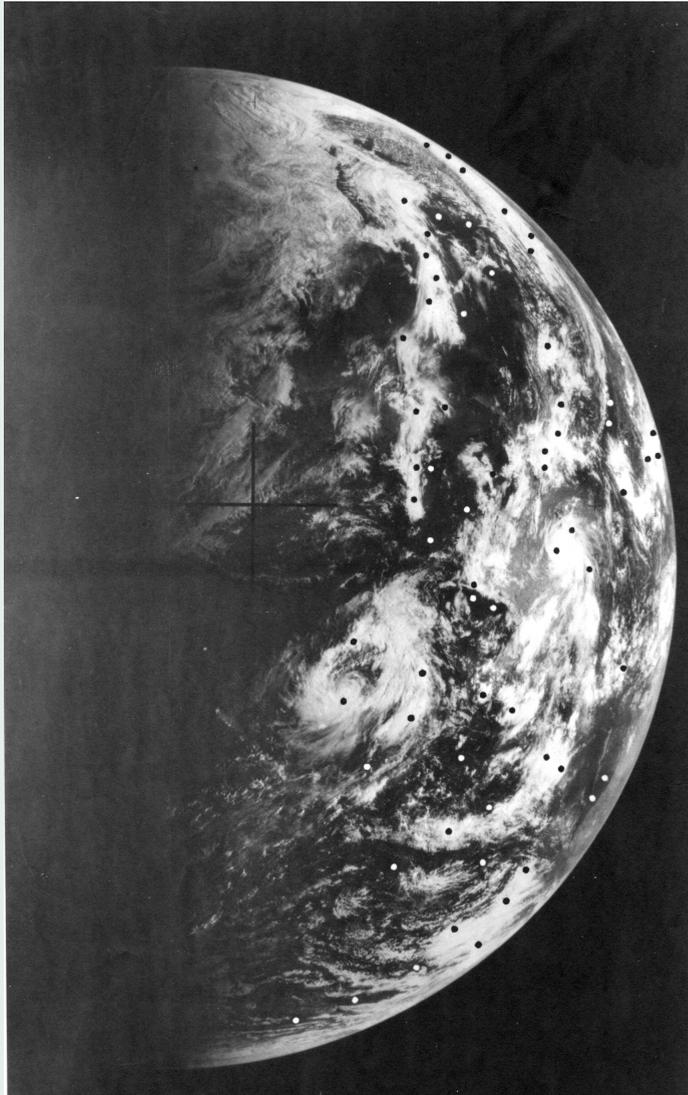
Go Back

Full Screen

Close

Quit

# Снимок Земли в терминаторе, точками отмечены сравнения теории и космических данных



[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 50 of 155

[Go Back](#)

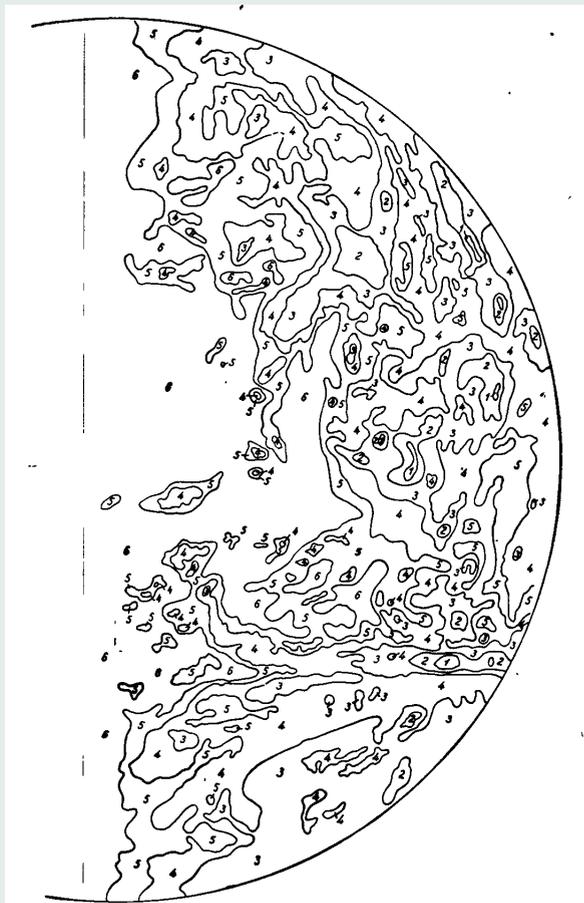
[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 51.

## Изолинии яркости Земли в терминаторе



Home Page

Title Page

Contents



Page 51 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

Home Page

Title Page

Contents



Page 52 of 155

Go Back

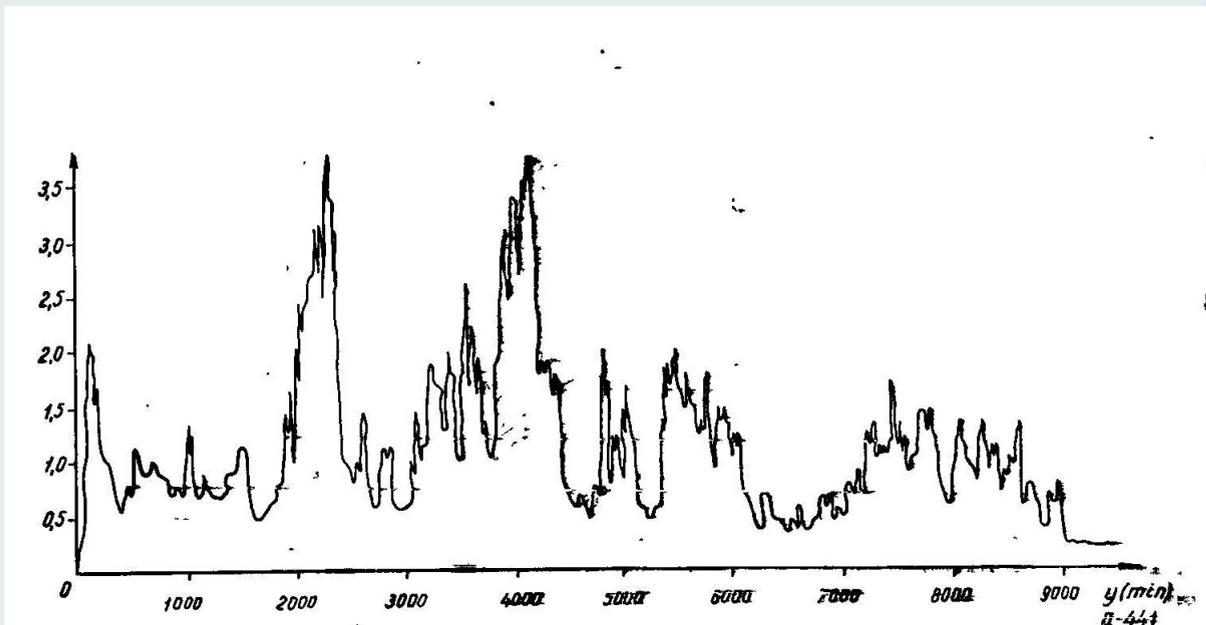
Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 52.

## Профиль яркости Земли в терминаторе



This is Slide No. 53.

Космические исследования это такая область междисциплинарных 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.

Home Page

Title Page

Contents



Page 53 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 54.

*В зависимости от длины волны, или частоты колебаний, и особенностей взаимодействия с веществом весь спектр электромагнитных волн делится на следующие основные диапазоны:*

- *радиоволны,*
- *микроволновое излучение,*
- *инфракрасное излучение,*
- *видимый свет,*
- *ультрафиолетовое излучение,*
- *рентгеновское излучение*
- *жесткое гамма-излучение.*

Home Page

Title Page

Contents



Page 54 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 55.

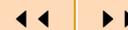
**В конце XIX века практически одновременно и независимо русским и немецким учеными было сформулировано скалярное уравнение переноса.**

*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.*

Home Page

Title Page

Contents



Page 55 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 56.

*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.*

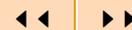
О. Хвольсон не ограничивает кратность рассеяния и даже рассматривает асимптотический режим, т.е. диффузионное приближение в глубине слоя. Опередил работы Е.А. Milna (1921, 1930).

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...

Home Page

Title Page

Contents



Page 56 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 57.

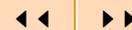
*В 1914 г. вышла статья астрофизика Карла Шварцшильда, которому принадлежит также двухпотокое приближение (Шварцшильда-Шустера). Шварцшильд указал на способ вывода интегрального уравнения, исходя из дифференциальной формы, а также на численное решение путем перехода к системе линейных алгебраических 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! Кстати, Хопф — соавтор метода Винера-Хопфа.*

Home Page

Title Page

Contents



Page 57 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 58.

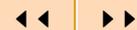
*Очередное существенное продвижение в теории переноса произошло в 40-ые годы, когда вышли публикации Е.С. Кузнецова, В.А. Амбарцумяна, С. Чандрасекара, В.В. Соболева и др.*

*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 Евграфа Сергеевича Кузнецова, Гурия Ивановича Марчука и Василия Сергеевича Владимирова.*

Home Page

Title Page

Contents



Page 58 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 59.

*Следует отметить три наиболее значимых результата сороковых годов:*

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

This is Slide No. 60.

*В 1989 году ученые отметили 100-летие уравнения переноса, которое было сформулировано русским профессором О.Д. Хвольсоном.*

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.

Home Page

Title Page

Contents



Page 60 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 61.

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.**

*Следует отметить особый вклад В.Я.Гольдина и Б.Н.Четверушкина. Борис Николаевич один из создателей научного направления "Динамика излучающего газа".*

Home Page

Title Page

Contents



Page 61 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 62.

Следует признать, что первыми "вычислителями" - практиками в теории переноса были ***Е.С. Кузнецов в СССР (с 1925 года!) и С. Чандрасекар в США.*** Достаточно посмотреть Труды (подготовила Т.А.Сушкевич — последняя ученица Е.С.Кузнецова), изданные по случаю 100-летия со дня рождения, в которые вошли публикации с 1925 по 1966 гг.:

***Кузнецов Е.С. Избранные научные труды / Отв. ред. и составитель Т.А. Сушкевич. М.: Физматлит, 2003. 784 с.***

и монографию :

***Чандрасекар С. Перенос лучистой энергии / Пер. с англ. издания Oxford, 1950, под ред. Е.С. Кузнецова. М.: Изд-во иностранной литературы, 1953. 432 с.***

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 62 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

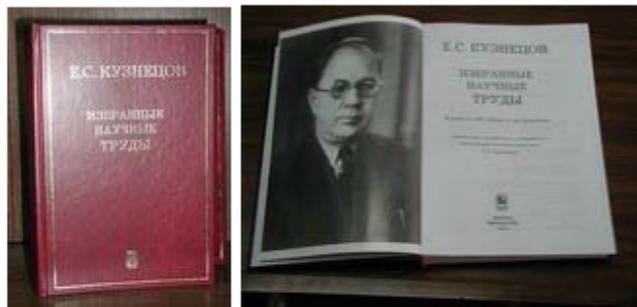
This is Slide No. 63.

В связи со 100-летием Евграфа Сергеевича Кузнецова при поддержке РФФИ в 2003 году издана книга

***Кузнецов Е.С. Избранные научные труды***  
**М.: Физматлит, 2003. 784 с.,**

в которые вошли публикации с 1925 по 1966 гг.

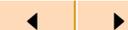
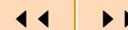
**Ответственный редактор и составитель Т.А.Сушкевич — последняя  
ученица Е.С.Кузнецова .**



[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



[Page 63 of 155](#)

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 64.

Среди зарубежных ученых следует отметить **Нобелевского лауреата Субрахманьяна Чандрасекара (Subrahmanyan Chandrasekhar (19.10.1910 - 21.08.1995))**. Повышенный интерес к научным результатам и к личности С.Чандрасекара возник в связи с его монографией "Перенос лучистой энергии", изданную в 1953 году на русском языке под редакцией Е.С.Кузнецова, одного из первых советских специалистов по теории переноса излучения, нейтронов, заряженных частиц и численному решению кинетических уравнений.

С. Чандрасекар был пионером, который внес выдающийся вклад в области переноса излучения в звездных и планетных атмосферах, включая, конечно, атмосферу Земли.

***Одаренность личности и свобода творчества — вот залог его успеха в науке.***

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 64 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 65.

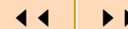
Заметную роль в становлении и организации радиационных исследований сыграла председатель Международной радиационной Комиссии, много лет проработавшая в НАСА (мой конкурент!) француженка **Жаклин Ленобль** (*J. Lenoble*).

Из зарубежных ученых необходимо отметить также **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. Whitney, Y.J. Kaufman, Y. Merler, D. Tanre, P.Y. Deschamps, R. Bellman, R. Kalaba, S. Ueno, W.J. Wiscombe, K.N. Liou et al.**

Home Page

Title Page

Contents



Page 65 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 66.

*Электромагнитное излучение способно распространяться практически во всех средах и в соответствии с приложениями может описываться разными математическими моделями*

- *уравнения Максвелла,*
- *уравнение Гельмгольца,*
- *уравнение Ландау,*
- *уравнение Власова,*
- *уравнение Лиувилля,*
- *уравнение Шредингера,*
- *уравнение Фоккера-Планка,*
- *уравнение Чепмена-Колмогорова-Смолуховского,*
- *уравнение диффузии и квазидиффузии,*
- *уравнения Боголюбова,*
- *интегральное уравнение переноса,*
- *кинетическое уравнение Больцмана и их приближения.*

Home Page

Title Page

Contents



Page 66 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

*В 1955 году в Институте Келдыша профессор Е.С. Кузнецов создал единственный в мире отдел "Кинетические уравнения", в котором проводились исследования всех типов уравнений и классов моделей кинетической теории в разных приложениях, в том числе в атомных, реакторных и термоядерных проектах, высоко- и низкотемпературной плазме, атмосферной оптике, оптике океана, космических проектах, астрофизике и т.д. Сотрудники отдела получили несколько государственных премий.*

## **ОЧЕНЬ РЕКОМЕНДУЮ:**

— книгу — перевод на русский, подготовленную сотрудниками отдела и изданную при поддержке РФФИ:

**Максвелл Дж.К.** Труды по кинетической теории / Пер. с англ. под ред. В.В. Веденяпина и Ю.Н. Орлова. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. 406 с.

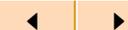
— **Больцман Л.Э.** Избранные труды (в трех частях). М.: Наука, 1984. - Серия "Классики науки"

— **Федоров Ф.И.** Оптика анизотропных сред. - Минск: Изд. во АН БССР, 1958. 380 с. : 2 с. ил. М.: УРСС, 2004.

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 67 of 155

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 68.

В настоящее время в России *сохранились две научные школы, сформированные при выполнении стратегических атомных и космических проектов по созданию "ракетно-ядерного щита", освоения космоса и разработки ПРО*: в ВЦ СО РАН (н. ИВ-МиМГ) Г.И. Марчук и Г.А. Михайлов основали школу по методам статистического моделирования и Монте-Карло, а в ИПМ им. М.В.Келдыша РАН специализируются по детерминированным аналитическим и численным методам решения задач теории переноса, в том числе с параллельными алгоритмами на многопроцессорных вычислительных системах и суперкомпьютерах.

*Эти коллективы занимают лидирующие позиции в мировой науке, а подходы, методы и алгоритмы взаимно дополняют и вместе создают всеобъемлющий научный потенциал, достаточный для решения стоящих задач.*

Home Page

Title Page

Contents



Page 68 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 69.

*Сложность задачи заключается в непрерывной динамической изменчивости и многопараметричности модели среды, большом разнообразии процессов трансформации энергии Солнца, вариантов визуирования и способов измерений.*

Приходится иметь дело с краевыми задачами для интегродифференциального кинетического уравнения, описывающего перенос излучения в рассеивающих, поглощающих, излучающих, преломляющих, поляризующих средах с одномерной, двумерной или трехмерной плоской или сферической геометрией.

Теория переноса позволяет изучать влияние различных факторов на прохождение излучения в САП и получать связи конкретных параметров среды с характеристиками радиационного поля.

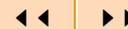
Таким образом можно определить чувствительность спектральной яркости, угловой и пространственной структуры поля радиации, пространственного распределения плотности и потоков излучения при заданных условиях освещения и наблюдения к вариациям этих параметров.

Учитывая масштабность, многопараметричность, многовариантность земных условий, несомненно требуется широкое использование информационных технологий и суперкомпьютеров.

Home Page

Title Page

Contents



Page 69 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

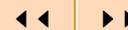
This is Slide No. 70.

Впервые поставлена задача объединить научный потенциал российских исследователей, обладающих уникальными разработками, обобщить достигнутое и задать вектор развития информационно-математического обеспечения с целью обеспечения теоретико-расчетных исследований радиационных процессов в условиях Арктики на основе аналитических и численных методов решения сложнейших задач теории переноса излучения в природных средах с учетом структуры оптико-геофизических параметров среды, процессов взаимодействия электромагнитного излучения с веществом и условий инсоляции.

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 70 of 155

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

**В России создан масштабный научный потенциал методов решения скалярных и векторных краевых задач для кинетических уравнений в приближении Больцмана с бинарными взаимодействиями фотонов с веществом среды:**

- *аналитических (быстрых методов типа диффузии, квази-диффузии, двухпотокое приближение, метод Соболева, метод средних потоков и т.п.)*
- *численных методов , в том числе*
  - *сеточные конечно-разностные методы,*
  - *метод сферических гармоник,*
  - *метод сложения и удвоения слоев,*
  - *метод характеристик с итерациями по кратности рассеяния и их модификации с ускоряющими процедурами,*
  - *метод функций влияния,*
  - *метод пространственно-частотных характеристик,*
  - *передаточные операторы для линейных и нелинейных систем,*
  - *матричные и тензорные методы,*
  - *методы декомпозиции и факторизации,*
  - *гибридные методы,*
- *алгоритмов метода Монте-Карло и статистического моделирования на основе скалярных и векторных интегральных уравнений.*

Home Page

Title Page

Contents



Page 71 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 72.

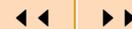
Весь мир знал про пионерские работы по дистанционному зондированию Земли:

- *Альтовская Н.П., Розенберг Г.В., Сандомирский А.Б., Сушкевич Т.А.* Поле яркости зари, наблюдаемой с космических кораблей // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1971. Т. 7. № 3. С. 279–290.
- *Альтовская Н.П., Розенберг Г.В., Сандомирский А.Б., Сушкевич Т.А.* 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.
- *Лаврова Н.П., Сандомирский А.Б.* Фотометрия планеты Земля с космических станций "Зонд" // Изв. вузов. Геодезия и аэрофото-съемка. 1972. Вып. 4. С. 109–114.
- *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.

Home Page

Title Page

Contents



Page 72 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 73.

По всему миру разошлись публикации статей:

- проведено сравнение расчетов методом Т.А.Сушкевич и методом Монте-Карло: *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.
- проведено сравнение расчетов по плоской и сферической моделям: *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.
- впервые представлены уникальные результаты для сферической модели: *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. Физика атмосферы и океана. 1969. Т. 5. № 12. С. 1266–1277.

This is Slide No. 74.

Даже в США на Международный радиационный симпозиум пригласили с пленарным обзорным докладом:

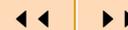
***Sushkevich T.A. Solar and Terrestrial Radiation Research in Newly Independent States: a Review // Proc. International Radiation Symposium IRS'96: Current Problems in Atmospheric Radiation. A. DEEPAK Publishing, Hampton, Virginia, USA, 1997. P. 1021–1024.***

В издательстве "Наука" была опубликована монография:  
***Сушкевич Т.А., Стрелков .А., Иолтуховский А.А. Метод характеристик в задачах атмосферной оптики. М.: Наука, 1990. 296 с.***

Home Page

Title Page

Contents



Page 74 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 75.

## Опубликованы ЗАКАЗНЫЕ ОБЗОРЫ:

- *Сушкевич Т.А.* О решении задач атмосферной коррекции спутниковой информации // Исслед. Земли из космоса. 1999, № 6. С.49-66.
- *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. V.29. P.2585-2597.
- *Sushkevich T.A.* Pioneering Remote Sensing in the USSR. 2. Global spherical models of radiation transfer // International Journal of Remote Sensing. 2008. V.29. P.2599-2613.
- *Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В.* 60 лет от первого совещания по ИСЗ до современных систем дистанционного зондирования и мониторинга Земли из космоса: информационно-математический аспект (история и перспективы) // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т.27, № 7. С.573-580.

Home Page

Title Page

Contents



Page 75 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 76.

Издано много публикаций, где описан математический аппарат:

- Численное решение задач атмосферной оптики // Сборник научных трудов. Под ред. М.В. Масленникова и Т.А. Сушкевич. М.: ИПМ АН СССР, 1984. 234 с.
- *Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Владимирова Е.В., Игнатьева Е.И., Куликов А.К., Максакова С.В.* Сферическая модель переноса излучения в атмосфере Земли. - I. Обзор / Препринт № 84. М.: ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, 1997. 32 с.
- *Сушкевич Т.А., Максакова С.В.* Осесимметричная задача распространения излучения в сферическом слое. — II. Алгоритм вычисления криволинейных координат на траекториях характеристик / Препринт № 1. М.: ИПМ РАН, 1998. 32 с.
- *Сушкевич Т.А., Владимирова Е.В.* Сферическая модель переноса излучения в атмосфере Земли. - II. Криволинейная система координат. Характеристики уравнения переноса / Препринт № 73. М.: ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, 1997. 28 с.

Home Page

Title Page

Contents



Page 76 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

Для космических проектов и космических наблюдений с первых шагов освоения космического пространства необходимо было разрабатывать методологию решения *двух основных классов многомерных задач теории переноса излучения:*

- *прежде всего для сферической оболочки (сферическая Земля с атмосферой),*
- *а позже для 3D плоского слоя (атмосфера над земной поверхностью),*

с двумя типами источников:

- *внешним параллельным потоком солнечного (коротковолнового) излучения,*
- *собственным (длинноволновым, инфракрасным) излучением.*

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 77 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 78.

# Сферическая модель

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 78 of 155

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 79.

*Рассматривается задача переноса излучения в системе "атмосфера-земная поверхность (суша, океан)" в приближении сферической оболочки, на которую падает параллельный солнечный поток.*

Нас интересует проблема расчета радиационного поля Земли в масштабах всей планеты (при всех условиях освещения, горизонт, сумерки, область сумерек и тени, полярные регионы и т.д.).

Полное решение  $\Phi_\lambda(\mathbf{r}, \mathbf{s})$  в точке  $A(\mathbf{r})$  с радиус-вектором  $\mathbf{r}$  в направлении  $\mathbf{s}$  находится как **решение общей краевой задачи (ОКЗ) теории переноса — линеаризованного приближения уравнения Больцмана при бинарных столкновениях:**

$$K\Phi = F^{in}, \quad \Phi|_t = F^t, \quad \Phi|_b = \varepsilon R\Phi + F^b; \quad K \equiv D - S \quad (1)$$

Home Page

Title Page

Contents



Page 79 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 80.

## Оператор переноса

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

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

This is Slide No. 81.

## интеграл столкновений — функция источника

$$B(\mathbf{r}, \mathbf{s}) \equiv S\Phi =$$

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

оператор отражения — интеграл

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

This is Slide No. 82.

# *Плоская модель*

*Home Page*

*Title Page*

*Contents*



Page *82* of *155*

*Go Back*

*Full Screen*

*Close*

*Quit*

This is Slide No. 83.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается задача переноса излучения в рассеивающем, поглощающем и излучающем горизонтально-однородном плоском слое, неограниченном в горизонтальном направлении ( $-\infty < x, y < \infty$ ,  $r_{\perp} = (x, y)$ ) и конечном по высоте ( $0 \leq z \leq h$ ), трехмерного евклидова пространства: радиус-вектор  $r = (x, y, z)$ .

Для удобства записи граничных условий вводим множества

$$t = \{z, r_{\perp}, s : z = 0, s \in \Omega^+\}, \quad b = \{z, r_{\perp}, s : z = h, s \in \Omega^-\}.$$

This is Slide No. 84.

Интенсивность (энергетическая яркость) излучения  $\Phi(r, s)$  в САП находится как решение общей краевой задачи (ОКЗ при  $\hat{R} \neq 0$ ) теории переноса

$$\begin{aligned} & \cos \vartheta \frac{\partial \Phi}{\partial z} + \sin \vartheta \cos \varphi \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \sin \vartheta \sin \varphi \frac{\partial \Phi}{\partial y} + \sigma(z) \Phi(x, y, z, \vartheta, \varphi) = \\ & = \sigma_s(z) \int_0^{2\pi} d\varphi' \int_0^{\pi} \gamma(z, \vartheta, \varphi; \vartheta', \varphi') \Phi(x, y, z, \vartheta', \varphi') \sin \vartheta' d\vartheta' + F^{in}(x, y, z, \vartheta, \varphi), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi(x, y, z = 0, \vartheta, \varphi) |_t &= F^0(x, y, \vartheta, \varphi), \\ \Phi(x, y, z = h, \vartheta, \varphi) |_b &= F^h(x, y, \vartheta, \varphi) + \end{aligned}$$

$$+ \varepsilon \int_0^{2\pi} d\varphi^+ \int_0^{\pi/2} q(x, y, \vartheta, \varphi; \vartheta^+, \varphi^+) \Phi(x, y, h, \vartheta^+, \varphi^+) \sin \vartheta^+ d\vartheta^+.$$

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 84 of 159

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 85.

Эту **общую краевую задачу** запишем в компактной форме

$$\hat{K}\Phi = F^{in}, \quad \Phi|_t = F^0, \quad \Phi|_b = \varepsilon\hat{R}\Phi + F^h \quad (2)$$

с **линейными операторами: оператор переноса**

$$\hat{D} \equiv (s, grad) + \sigma(z) = \hat{D}_z + (s_{\perp}, \frac{\partial}{\partial r_{\perp}}), \quad \hat{D}_z \equiv \mu \frac{\partial}{\partial z} + \sigma(z);$$

**интеграл столкновений**, описываемый оператором

$$\hat{S}\Phi \equiv \sigma_s(z) \int_{\Omega} \gamma(z, s, s') \Phi(z, r_{\perp}, s') ds', \quad ds' = d\mu' d\varphi', \quad \hat{S}(1) \leq 1;$$

This is Slide No. 86.

оператор отражения

$$[\hat{R}\Phi](h, r_{\perp}, s) \equiv \int_{\Omega^+} q(r_{\perp}, s, s^+) \Phi(h, r_{\perp}, s^+) ds^+ \quad (3)$$

является равномерно ограниченным оператором:

$\hat{R}(1) = q^*(r_{\perp}, s) \leq 1$ ; интегродифференциальный оператор  $\hat{K} \equiv \hat{D} - \hat{S}$ ; одномерный оператор  $\hat{K}_z \equiv \hat{D}_z - \hat{S}$ .

This is Slide No. 87.

# Векторное уравнение переноса поляризованного излучения

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 87 of 155

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

Поляризация — это свойство векторных электромагнитных волн. Световые волны имеют электромагнитную природу.

*Поляризация света полностью определяется изменением во времени  $t$  вектора напряженности электрического поля  $\vec{E}(\vec{r}, t)$ , наблюдаемого в фиксированной точке пространства  $\vec{r}$ .*

Поведение трех других векторов поля — плотности электрического смещения  $\vec{D}$ , напряженности магнитного поля  $\vec{H}$ , плотности магнитного потока  $\vec{B}$  — может быть установлено с помощью полевых уравнений Максвелла и материальных уравнений, которые связывают векторы  $\vec{E}$ ,  $\vec{D}$ ,  $\vec{H}$ ,  $\vec{B}$ .

This is Slide No. 89.

Рассматриваем плоские монохроматические волны — это световые волны, частотный спектр которых состоит из единственной дискретной частоты с нулевой спектральной шириной ("нулевой дисперсией").

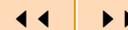
Это достаточно адекватная модель реального рабочего светового пучка, с которым имеют дело оптики-экспериментаторы, исследующие изменение состояния поляризации светового пучка при его взаимодействии с веществом. ***Под световым пучком будем понимать луч света в смысле геометрической (лучевой) оптики.***

Такая же модель используется в эллипсометрии и задачах с лазерными пучками.

Home Page

Title Page

Contents



Page 89 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 90.

В монохроматической волне изменение электрического вектора  $\vec{E}(\vec{r}, t)$  во времени является гармоническим.

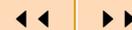
Конец вектора, проведенного из фиксированной точки наблюдения  $C(\vec{r})$  и представляющего мгновенное значение напряженности электрического поля  $\vec{E}(\vec{r}, t)$ , периодически описывает в пространстве эллипс в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны.

Эллиптическая поляризация является наиболее общим состоянием поляризации строго монохроматической световой волны.

Home Page

Title Page

Contents



Page 90 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 91.

Рассматриваем перенос поляризованного света в рамках кинетического уравнения и теории переноса излучения.

Если уравнения Максвелла были получены в 1873 году, то векторное интегро-дифференциальное уравнение переноса поляризованного излучения было написано только в 40-ые годы XX века.

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 91 of 155

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

## Векторная задача для плоского слоя с отражающей границей

В предположении стационарного состояния среды и постоянства внешнего потока поле квазимонохроматического поляризованного излучения полностью описывается четырехкомпонентным вектором  $\vec{\Phi}(\vec{r}, \vec{s})$ , компонентами которого являются параметры Стокса, имеющие размерность интенсивности излучения.

Если среда макроскопически оптически изотропна и плоскостратифицирована, то **полный вектор Стокса  $\vec{\Phi}$  находится как решение векторной краевой задачи теории переноса поляризованного излучения - это математическая модель, которая адекватно описывает физический процесс.**

Home Page

Title Page

Contents



Page 92 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

Вектор параметров Стокса  $\Phi = \{I, Q, U, V\}$  находим как решение общей векторной краевой задачи теории переноса ( $\hat{R} \neq 0$ )

$$\hat{K}\Phi = \mathbf{F}, \quad \Phi|_t = \mathbf{F}^0, \quad \Phi|_b = \varepsilon\hat{R}\Phi + \mathbf{F}^H \quad (4)$$

с линейными операторами: оператор переноса

$$\hat{D} \equiv (s, grad) + \sigma(z) = \hat{D}_z + \left( s_\perp, \frac{\partial}{\partial r_\perp} \right), \quad \hat{D}_z \equiv \mu \frac{\partial}{\partial z} + \sigma(z);$$

интеграл столкновений

$$\hat{S}\Phi \equiv \sigma_s(z) \int_{\Omega} \hat{P}(z, s, s') \Phi(z, r_\perp, s') ds', \quad ds' = d\mu' d\varphi';$$

равномерно ограниченный оператор отражения

$$[\hat{R}\Phi](H, r_\perp, s) \equiv \int_{\Omega^+} \hat{q}(r_\perp, s, s^+) \Phi(H, r_\perp, s^+) ds^+; \quad (5)$$

This is Slide No. 94.

интегро-дифференциальный оператор  $\hat{K} \equiv \hat{D} - \hat{S}$ ;

одномерный оператор  $\hat{K}_z \equiv \hat{D}_z - \hat{S}$ ;

$\hat{P}(z, s, s')$  — фазовая матрица рассеяния;

$\sigma(z)$  и  $\sigma_s(z)$  — вертикальные профили коэффициентов ослабления (экстинкции) и рассеяния;

$\hat{q}(r_\perp, s, s^+)$  — фазовая матрица отражения; параметр  $0 \leq \varepsilon \leq 1$  фиксирует акт взаимодействия излучения с подложкой;

$\mathbf{F}(z, s)$ ,  $\mathbf{F}^0(r_\perp, s)$ ,  $\mathbf{F}^H(r_\perp, s)$  — источники инсоляции.

Если хотя бы одна из функций  $\mathbf{F}^0$ ,  $\mathbf{F}^H$ ,  $\hat{q}$  зависит от  $r_\perp$ , то решение задачи (4)–(5) находится в 5D фазовом объеме  $(x, y, z, \vartheta, \varphi)$ , а если нет зависимости от  $r_\perp$ , то в 3D фазовом объеме  $(z, \vartheta, \varphi)$ .

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 94 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 95.

Для решения векторных краевых задач с учетом поляризации излучения могут быть использованы методы, применяемые для решения скалярного уравнения без учета поляризации. Наиболее разработанным как в аналитическом, так и в вычислительном плане является круг задач теории молекулярного (рэлеевского) рассеяния.

Расчет поляризованного излучения в средах с нерэлеевским рассеянием связан с большими вычислительными трудностями, вызванными сложным поведением элементов матрицы рассеяния, знакопеременностью компонент решения векторного уравнения переноса и их сложной угловой зависимостью, что вообще характерно для атмосферно-оптических задач.

Home Page

Title Page

Contents



Page 95 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 96.

Остановимся подробнее на решении самой простой векторной краевой задачи

$$\hat{D}_z \Psi = \hat{S} \Psi + \mathbf{F}, \quad \Psi|_{\Gamma_0} = \Psi_0(\mathbf{s}), \quad \Psi|_{\Gamma_H} = \Psi_H(\mathbf{s}), \quad (6)$$

где вектор-функция источника

$$\hat{S} \Psi \equiv \sigma_s(z) \int_{\Omega} \hat{P}(z, \mu, \mu', \varphi' - \varphi) \Psi(z, \mu', \varphi') d\mu' d\varphi'. \quad (7)$$

Ядром интегрального оператора (7) является фазовая матрица

$$\hat{P}(z, \mathbf{s}, \mathbf{s}') = \hat{P}(z, \mu, \varphi, \mu', \varphi') = \hat{L}(\alpha) \hat{\Gamma}(\vartheta_s) \hat{L}(\alpha'). \quad (8)$$

Конкретный вид матрицы поворота  $\hat{L}(\alpha)$  и значения угла поворота  $\alpha$  зависят от взаимного расположения векторов  $\mathbf{s}$  и  $\mathbf{s}'$  и системы координат.

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 96 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 97.

Граничные условия записываются в общем виде:

$$\Psi|_{\Gamma_0} = \pi \mathbf{F}_0 \delta(\mu - \mu_0) \delta(\varphi - \varphi_0) + \mathbf{f}_0,$$

где  $\pi \mathbf{F}_0$  — внешний мононаправленный поток излучения на верхней границе слоя  $z = 0$  в направлении  $\mu_0$  и  $\mathbf{f}_0$  — диффузный источник;

$$\Psi|_{\Gamma_H} = \hat{R}_H \Psi + \mathbf{f}_H,$$

где оператор  $\hat{R}_H$  описывает отражение излучения от подстилающей поверхности,  $\mathbf{f}_H$  — вектор-источник диффузного излучения на дне.

This is Slide No. 98.

## Основные даты

- 1678 - Гюйгенс открыл поляризацию света;
- 1808 - Малюс обнаружил поляризацию солнечного света;
- 1852 - сформулирован вектор параметров Стокса;
- 1871 - сформулирован закон Рэлея;
- 1944-1946 - сформулировано векторное уравнение переноса (В.В.Соболев, С.Чандрасекар, Г.В.Розенберг).

Home Page

Title Page

Contents



Page 98 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 99.

Теория переноса поляризованного излучения до сих пор не входит ни в один учебник по уравнениям математической физики и вычислительной математики и не представлена ни в одной монографии.

*Искусством математического моделирования переноса поляризованного излучения овладели лишь единицы и только благодаря личным контактам и эксклюзивному обмену опытом.*

В России сложились и традиционно развиваются три научные школы: в Москве, Ленинграде и Академгородке (Новосибирск). Исследования проводятся в Киеве, Минске, Томске, Тарту...

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 99 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

Основоположники этой теории С.Чандрасекар (1946, 1950), В.В.Соболев (1943-1944, 1949) и их ученики и последователи не вышли за пределы рассмотрения рэлеевских законов.

Г.В.Розенберг (1942, 1946) тоже начинал с рэлеевского закона, но в 70-ые годы началось наше сотрудничество и впервые в мировой науке была создана "Автоматизированная программная система расчета переноса поляризованного излучения с учетом неоднородности плоского слоя и любых законов рассеяния" (С.А.Стрелков).

Г.А.Михайлов со своим учеником М.А.Назаралиевым в контактах с Г.В.Розенбергом сделали успешную попытку смоделировать оценку степени поляризации излучения в приближении сферической атмосферы.

*Со свойственной советским ученым традицией первые задачи были самые сложные и по-существу определяли направления дальнейших исследований на многие годы вперед.*

Home Page

Title Page

Contents



Page 100 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

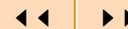
This is Slide No. 101.

# Истории открытия поляризации

Home Page

Title Page

Contents



Page 101 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 102.

Первые размышления о природе света (прямолинейное распространение лучей, отражение, "зажигательные стекла") принадлежат греческим философам и математикам Емпедоклу (490-430 гг. до н.э.) и Евклиду (300 г. до н.э.)

Рене Декарт (1596-1650 гг.) сформулировал основы метафизического представления о природе света - это сжатие, распространяющееся в идеально упругой среде (эфире), а цвет объясняется вращательными движениями частиц этой среды с различными скоростями.

**Исаак Ньютон (1642-1727 гг.)** развил корпускулярную теорию: свет распространяется от излучающего тела в виде мельчайших частиц и опубликовал теорию цвета.

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 102 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

**Христиан Гюйгенс (1629-1695 г.) существенно улучшил и расширил волновую теорию света (начало положил Гук) и открыл (1678 г.) явление поляризации (Х.Гюйгенс. Трактат о свете, ОНТИ, 1935).**

**В 1675 г. Олафом Рёмером (1644-1710 гг.) была обнаружена конечность скорости света при наблюдении затмения спутников Юпитера.**

**Ньютон объяснил поляризацию: лучи имеют "стороны" и свет имеет "поперечность". Поскольку в волновой теории были известны только продольные волны, Ньютон отрицал волновую теорию света. Это мнение (1746 г.) разделял Леонард Эйлер (1707-1783 гг.).**

**Мнение таких авторитетов привело к забвению волновой теории света почти на сто лет.**

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 103 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 104.

В 1801 г. Томас Юнг (1773-1829) на основе волновой теории объяснил явление интерференции.

Этьен Луи Малюс (1775-1812 гг.) в 1808 г. *обнаружил поляризацию солнечного света*: при вращении кристалла исландского шпата изменяется интенсивность изображения отраженного Солнца, но теория не позволяла это объяснить.

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 104 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 105.

**В 1818 г. на премию Парижской академии наук рассматривались две работы, в которых исследовалось явление дифракции.**

**Пьер Симон Лаплас (1749-1827 гг.) и Жан-Батист Био (1774-1862 гг.) объяснили явление дифракции на основе развития корпускулярной теории света.**

**Августин Жак Френель (1788-1827 гг.) в 1816 г. показал, что волновая теория света, объединяющая принципы Гюйгенса и Юнга, позволяет объяснить не только "прямолинейность" распространения света, но и небольшие отклонения, т.е. явление дифракции.**

**Премию получил Френель и, как тогда считали, была развенчана "корпускулярная теория света".**

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 105 of 155

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

В 1818 г. Френель изучал важную проблему: есть ли различие между светом от звезд и от земных источников? Вместе с Доменик Франсуа Араго (1786-1853 гг.) Френель исследовал интерференцию поляризованных лучей света и обнаружил (1816 г.), что лучи, поляризованные во взаимно перпендикулярных плоскостях, никогда не интерферируют. Юнг нашел разгадку этого явления: световые колебания поперечны!

Динамические модели механизма колебаний эфира привели Френеля к законам, которые описывают интенсивность и поляризацию световых лучей после преломления и отражения (1832 г.). Для объяснения дисперсии Френель предложил учитывать молекулярную структуру вещества (1821 г.).

Работы Френеля привели к торжеству волновой теории света. Но в основе продолжала лежать теория упругого эфира, которая объясняла оптические явления в рамках механики!

Home Page

Title Page

Contents



Page 106 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 107.

**Независимо от оптических исследований выполнялись исследования по электричеству и магнетизму.**

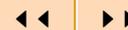
**В 1873 году опубликована работа Джеймса Кларка Максвелла (1831-1879 гг.), в которой сформулирована известная система уравнений. Максвелл сделал заключение: свет представляет собой электромагнитные волны. В 1888 г. это подтвердил экспериментально Генрих Герц (1857-1894 гг.).**

**Ещё долго продолжались попытки объяснения электромагнитных колебаний с помощью механических моделей. Но они не могли объяснить процессы излучения и поглощения при взаимодействии оптического поля с веществом.**

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 107 of 155

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 108.

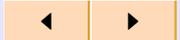
Следующий этап связан с открытием в 1814-1817 гг. Джозефом Фраунгофером (1787-1826 гг.) темных линий в солнечном спектре и их интерпретация как линий поглощения (1861 г.). Спектроскопия стала самостоятельным разделом оптики, базирующимся на атомной и молекулярной физике.

Начиная с работы 1900 г. Макса Планка (1858-1947 г.), классическая механика была заменена квантовой теорией. В 1913 г. Нильс Бор объяснил закономерности в линейчатых спектрах газов.

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 108 of 155

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 109.

В 1905 г. Альберт Эйнштейн (1879-1955 гг.) на основании теории Планка возродил в новой форме корпускулярную теорию света, предположив, что *планковские кванты энергии*  $\varepsilon = h\nu$  существуют в виде реальных частиц света, которые называют *световыми квантами*, или *фотонами*.

Уже многие годы привыкли свободно обращаться как с волновыми, так и корпускулярными теориями света. Дуализм "волна-частица" естественно вошел в практику математического моделирования переноса излучения-фотонов.

This is Slide No. 110.

# Характеристики состояния поляризации

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 110 of 155

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 111.

В 1852 г. Джордж Габриэль Стокс (1819-1903 гг.) при исследовании частично поляризованного света для удобства использования в практических целях предложил набор из 4-х параметров, обладающих одинаковой физической размерностью, имеющих размерность интенсивности излучения и позволяющих описать разную природу компонент:

- интенсивность (поток энергии);
- степень поляризации (отношение);
- плоскость поляризации (угол);
- степень эллиптичности (число).

Home Page

Title Page

Contents



Page 111 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit



This is Slide No. 112.

Параметрами Стокса общего вида являются следующие четыре величины:

$$s_0 = \langle a_1^2 \rangle + \langle a_2^2 \rangle, \quad s_1 = \langle a_1^2 \rangle - \langle a_2^2 \rangle,$$

$$s_2 = 2 \langle a_1 a_2 \cos \delta \rangle, \quad s_3 = 2 \langle a_1 a_2 \sin \delta \rangle,$$

где  $a_1$  и  $a_2$  — мгновенные амплитуды двух взаимно перпендикулярных компонент электрического вектора, а  $\delta = \varphi_1 - \varphi_2$  — разность их фаз.

This is Slide No. 113.

В 1858 г. Араго опубликовал об открытии поляризации солнечного света и результаты своих наблюдений. Араго, Давид Брюстер (1867) и Р.Рубенсон (1864) установили положение точки максимума поляризации. Затем Араго, Бабине и Брюстер обнаружили, что в вертикале Солнца имеются три так называемые "нейтральные точки" (носят их имена), в которых степень поляризации обращается в нуль.

Наличие таких закономерностей подтверждалось законом Рэлея, который открыл также зависимость характеристик поляризации света от длины волны.

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)

[◀◀](#) [▶▶](#)

[◀](#) [▶](#)

Page 113 of 155

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 114.

**В 1871 г. Лорд Рэлей установил закон рассеяния света на молекулах воздуха, размеры которых малы по сравнению с длиной волны, и на его основе дал объяснение**

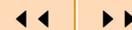
- **уровню освещенности дневного неба;**
- **синего цвета дневного неба;**
- **линейной поляризации света;**
- **степени поляризации в однократном рассеянии.**

**Однако, в зависимости от состояния атмосферы и земной поверхности положение этих характерных точек изменялось. Наблюдалось изменение характера поляризации.**

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 114 of 155

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 115.

Только в 1908 г. появилась теория Густава Ми, который провел исчерпывающее теоретическое исследование дифракции на сфере с конечной диэлектрической проницаемостью и конечной проводимостью.

На основе электромагнитной теории, т.е. системы уравнений Максвелла, построено решение для задачи дифракции плоской линейно-поляризованной монохроматической волны на однородной сфере произвольного диаметра и состава, находящейся в однородной среде, при условии, что расстояние между сферами больше длины волны.

Эта теория описывает ситуации, когда размер частиц сопоставимы или превышают длину волны.

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 115 of 155

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 116.

**В дальнейшем внесли заметный вклад в основы этой теории**

- **У.С. Van de Hulst (1946 - статья, 1957 - книга, 1961 - перевод);**
- **К.С.Шифрин (1951 - книга);**
- **Д.Дейрмеджан (1971 - перевод книги);**
- **К.Борен, Д.Хафмен (1986 - перевод книги).**

**С 70-ых годов сформировалось несколько групп, которые развивали теорию Ми и прешли к решению более сложных задач рефракции на телах несферической формы. В настоящее время задачи дифракции стали разделом математической физики и в Санкт-Петербурге филиал Математического института имени В.А.Стеклова проводит ежегодные конференции.**

Home Page

Title Page

Contents



Page 116 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 117.

Параметры Стокса в координатном пространстве ни вектора, ни тензора не образуют.

В 1892 году в книге Пуанкаре было опубликовано простое геометрическое представление различных состояний поляризации, в котором три параметра Стокса рассматриваются как декартовы координаты точки на сфере, которую называют "сфера Пуанкаре". Удобное представление для исследования особенностей решения.

Распространение поляризованного излучения описывается векторными полями. Интенсивность излучения определяется через среднее значение вектора Пойнтинга.

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 117 of 155

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

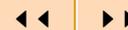
This is Slide No. 118.

# Скалярное и векторное уравнение переноса

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 118 of 155

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 119.

**В конце XIX века практически одновременно и независимо русским и немецким учеными было сформулировано скалярное уравнение переноса.**

**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.**

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 119 of 155

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 120.

В 1887 и 1889 гг. вышли статьи E.Lommel (немецкий физик) Опредил работы E.A.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. Опредил работы E.A.Milna (1921, 1930).

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...

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)

[◀◀](#) [▶▶](#)

[◀](#) [▶](#)

Page 120 of 155

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 121.

В 1914 г. вышла статья астрофизика Карла Шварцшильда, которому принадлежит также двухпотокое 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! Кстати, Хопф - соавтор метода Винера-Хопфа.

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 121 of 155

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 122.

**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.**

**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 именем Гурия Ивановича Марчука.***

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 122 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 123.

Следует отметить три наиболее значимых результата сороковых годов:

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

This is Slide No. 124.

Как и по другим разделам исследований света, до сих пор не закрыт вопрос - кто же первый написал уравнение переноса поляризованного излучения:

- В.В.Соболев (1943 - работа в Елабуге, 1944 - доклад на юбилейной научной сессии Ленинградского университета, 1949 - статья, 1956 - книга);
- С.Чандрасекар (1946 - статьи, 1950 - книга);
- Г.В.Розенберг (1946 - канд.диссертация, 1954 - докт. диссертация).

This is Slide No. 125.

**В 1943 г. В.В.Шаронов и В.В.Соболев во время войны занимались проблемой видимости огней в атмосферной дымке. В.В.Шаронов обратил внимание, что свет поляризован, и если смотреть через очки, которые пропускают только одну компоненту света, то видимость можно улучшить.**

**Позже это явление назовут "поляризационный контраст". Но тогда В.В.Соболев занялся разработкой теории переноса поляризованного излучения.**

**В.В.Соболева всегда привлекала теория переноса за "красоту" аналитических решений. В.В.Соболев со свойственной ему изящностью сформулировал систему из трех дифференциально-интегральных уравнений переноса излучения при законе рассеяния Рэлея и дал решение в форме линейных интегральных уравнений.**

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 125 of 155

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

**В.В.Соболев не пользовался параметрами Стокса и ввел свои три параметра для описания линейно-поляризованного излучения. Решение представлено в такой замкнутой форме, что не подлежит преобразованиям и обобщениям.**

**В.В.Соболев тогда же обратил внимание, что при более строгом рассмотрении необходимо учитывать:**

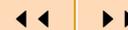
- **отражение от земной поверхности (постановка граничных условий);**
- **наличие крупных частиц, рассеивающих свет не по закону Рэлея (про теорию Ми он не упоминает, хотя в гл. 1 ссылка на книгу Ми есть);**
- **оптическую анизотропию молекул и частиц, что может привести к деполяризации рассеянного света).**

**Развитием этих результатов В.В.Соболева занимались его ученики Х.Домке и В.М.Лоскутов, но при этом не вышли за пределы рэлеевского рассеяния.**

Home Page

Title Page

Contents



Page 126 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

С.Чандрасекар очень подробно расписал вывод векторного уравнения переноса для четырех параметров Стокса, которые могут описывать эллиптически поляризованный луч.

Особое внимание обратил на аддитивность параметров Стокса независимых потоков и на линейное преобразование параметров Стокса при вращении осей. Построил угловую матрицу для рэлеевского рассеяния с учетом двух поворотов.

По аналогии со скалярной задачей формально написал векторное уравнение переноса в интегро-дифференциальной форме, рассмотрев приращение функции источника с учетом поляризационных характеристик при рэлеевском рассеянии пучка лучей. В случае анизотропных молекул используется формула Кабанна, аналогичная формуле Релея, но с поправкой на эллиптичность молекулы.

Home Page

Title Page

Contents



Page 127 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

С.Чандрасекар для рэлеевского рассеяния развил аппарат решения интегральных уравнений через  $X$  – и  $Y$  – функции и в явном виде представил решения азимутально-симметричной задачи, т.е. проиллюстрировал "законы диффузного пропускания и отражения" плоско-параллельной атмосферы при рэлеевском рассеянии. В скалярной задаче используются  $H$  – функции.

Этот подход использовали К.Л.Скулсон, J.V.Dave, Z.Sekera при расчете хорошо известных "Таблиц" (1960), на сравнениях с которыми отлаживались программы или другие подходы.

Этот же подход использовала Т.А.Гермогенова при оценке влияния поляризации на распределение интенсивности рассеянного излучения в рэлеевском слое (1962).

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 128 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 129.

**Г.В.Розенберг начал заниматься поляризацией в 1939 г. в связи с анализом зависимости поляризации сумеречного неба от состояния ионосферы (статьи в ДАН в 1942 г.).**

**В 1946 г. была готова кандидатская диссертация "Особенности поляризации света, рассеянного атмосферой в условиях сумеречного освещения".**

**В 1949 г. провел качественный расчет.**

**В 1955 г. вышел прекрасный обзор**

**"ВЕКТОР-ПАРАМЕТР СТОКСА (Матричные методы учета поляризации излучения в приближении лучевой оптики), УФН, 1955, май, Т. LVI, вып. 1, с. 77-110".**

*Многие использовали этот обзор за основу в своих работах, в том числе московские специалисты (Ю.А.Кравцов и др.) - участники научных семинаров С.М.Рытова, которые проходили в ИФА АН СССР.*

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 129 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 130.

**В сноске на стр. 105 читаем:**

*Уравнение переноса с учетом поляризации излучения было впервые одновременно и независимо сформулировано в 1946 г. Чандрасекаром и автором только для случая изотропной среды... Формулирование приводимого здесь более общего уравнения потребовало, с одной стороны, учета зависимости экстинкции и дисперсии от характера поляризации и, с другой стороны, обобщения вектор-параметра Стокса на произвольное представление эллипса поляризации и его положения, что в 1946 г. осталось ещё невыполнимым.*

Home Page

Title Page

Contents



Page 130 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 131.

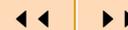
Нужно отметить работы

- Kucher I., Ribaric M. Matrix formalism in the theory of diffusion light (1959);
- Marathay A.S. Operator formalism in the theory of partial polarization, (1965);
- Шерклифф У. Поляризованный свет (перевод 1965);
- Ньютон Р. Теория рассеяния волн и частиц (перевод 1969);
- Борн М., Вольф Э. Основы оптики (перевод 1973);
- Федоров Ф.И. Теория гиротропии (1976);
- Azzam R.M.A., Bashara N.M. Ellipsometry and polarized light (1977, перевод 1980).

Home Page

Title Page

Contents



Page 131 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

*В 70-ые годы активно начали проводить качественные исследования векторного уравнения переноса как математического объекта:*

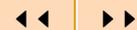
- отдел "кинетические уравнения" ИПМ АН СССР - М.Г.Кузьмина и М.В.Масленников, Т.А.Гермогенова и Н.В.Коновалов, Т.А.Сушкевич и С.А.Стрелков;
- ВЦ СО АН СССР (ИВМиМГ СО РАН) - Г.А.Михайлов, Ш.А.Назаралиев и С.А.Ухинов;
- ЛГУ - Х.Домке;
- ИФ Минск - Э.П.Зеге и Л.И.Чайковская;
- ИФА АН СССР - Л.М.Романова и Е.И.Устинов.

*Замечание: особым путем проводят качественные исследования в ИМ СО РАН (Д.С.Аниконов) и ученики (И.В.Прохоров и др.)*

Home Page

Title Page

Contents



Page 132 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 133.

### *Замечания:*

- качественный анализ решения векторного уравнения переноса проводился для рэлеевского рассеяния и в редких случаях разложения по сферическим функциям;
- немногие разрабатывали алгоритмы численного решения, ориентированные на частные задачи;
- большинство использовало чужие разработки и программы;
- многие разрабатывали методики измерения поляризации излучения.

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 133 of 155

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 134.

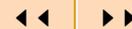
Для моделирования переноса поляризованного излучения не использовались диффузионные приближения, а развивались те же подходы, что и в скалярной теории:

- *итерационный метод характеристик* (Т.А.Сушкевич, С.А.Стрелков; Т.А.Гермогенова, Л.П.Басс, Н.В.Коновалов);
- *метод Монте-Карло* (Г.А.Михайлов, Ш.А.Назаралиев, С.А.Ухинов и др.; G.W.Kattawar and E.S.Fry; D.G.Collins, W.G.Blattner, M.B.Wells, H.G.Horak et al. );
- *метод сферических гармоник* (США, Франция, Е.И.Устинов) и малоугловое приближение (Э.П.Зеге и Л.И.Чайковская; В.П.Будак);

Home Page

Title Page

Contents



Page 134 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 135.

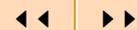
- *метод сложения слов* (The Netherland — J.W.Hovenier, J.E.Hansen, van de Hulst H.C., van der Mee C.V.M.; в США S.Ueno, A.L.Fymat, C.E.Siewert et al.);
- *метод интегральных уравнений и X-Y-функций* (В.В.Соболев, В.М.Лоскутов, С.Чандрасекар, K.L.Coulson, Z.Sekera, J.V.Dave);
- *асимптотические методы* (С.Чандрасекар, В.В.Соболев и др.);
- *особые алгоритмы* (О.И.Смокий и др.).

*Замечание: большинство методов предполагает разложение решения в ряд Фурье по азимуту.*

Home Page

Title Page

Contents



Page 135 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

Т.А.Гермогенова, Н.В.Коновалов, Л.П.Басс сделали заявку на решение векторного уравнения переноса для двумерной осесимметричной задачи и реализацию на БЭСМ-6 программы "Радуга-4" для цилиндрической геометрии методом итераций по столкновениям с интегрированием по характеристикам.

### *Фактические результаты:*

- Для рэлеевского закона в однородном слое тестовый расчет свидетельствует о низкой точности расчета 2-ой и 3-ей компонент (Доклад, Кацивели, 1983; Фотометрические и поляриметрические исследования небесных тел, Киев, Наукова Думка, 1985);
- Для однородного слоя с нерэлеевским рассеянием расчет только однократного приближения (Доклад на IRS-2000, С.-Петербург).

*Замечание: "цилиндр" и "шайба" — неэффективные модели для атмосферы Земли и других планет.*

Home Page

Title Page

Contents



Page 136 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 137.

В 70-ые — 80-ые годы космические исследования принимают массовый характер. Творчеству не было предела и поляризационные задачи оказались востребованными.

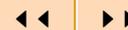
Не скромно, *но следует отметить, что в эти годы*

- математическое моделирование и численное решение задач переноса оптического излучения с учетом его поляризации и деполяризации для различных приложений обеспечивалось в ИПМ АН СССР группой Т.А.Сушкевич и С.А.Стрелкова;
- расчеты по теории Ми проводились В.П.Шари (ИПМ АН СССР);
- в лаборатории Г.В.Розенберга в ИФА АН СССР (Г.И.Горчаков, А.С.Емиленко и др.) проводили натурные измерения матриц рассеяния.

Home Page

Title Page

Contents



Page 137 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 138.

С самого начала разработки *универсальной автоматизированной системы математического моделирования решения векторной задачи переноса излучения* в результате анализа всех доступных публикаций стало очевидно, что *сначала нужно сформулировать базовое представление и установить приемы перехода от любого представления к базовому.*

*Замечание:*

- универсальный подход возможен только в академическом Институте;
- такие разработки более трудоемкие, но позволяют решать много разных задач.

Home Page

Title Page

Contents



Page 138 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

Так появилась наша работа "**Описание поляризованного света: представления, базисы, системы координат**". Этого раньше не делали, а потому все методики и подходы носили и носят частный характер (под конкретную задачу).

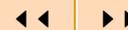
Согласование представлений вектора Стокса, базисов и систем координат было продиктовано необходимостью "стыковки" оптических параметров атмосферы (в частности, матриц рассеяния), вектора Стокса поляризованного излучения атмосферы и поляризационных характеристик измерительных приборов с целью получения репрезентативных и физически корректных результатов численного моделирования.

В 1984 году на ту же тему вышел **отчет зарубежных специалистов J.W.Hovenier and van der Mee C.V.M.** Fundamental relations revelant to the transfer of polarized light in a scattering atmosphere (Free University, Amsterdam).

Home Page

Title Page

Contents



Page 139 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 140.

Для анализа расчетных и экспериментальных данных, а также сравнения с другими литературными источниками С.А.Стрелков разработал "Шаблон содержащий 12 разделов с общей численностью 76 позиций (вопросов)!"

Практически ответить на все пункты "Шаблона" при анализе доступных источников информации весьма затруднительно.

А это означает, что сравнения результатов могут быть не вполне корректные (а, может, и сами расчеты не вполне корректны!).

Особенно это касается согласования исходных (расчетных или экспериментальных) матриц рассеяния с заложенными в алгоритмах представлениями, системами координат и их преобразованиями.

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 140 of 155

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 141.

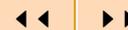
Подготовлены Таблицы соответствия "Шаблона" наиболее распространенным представлениям:

- "Стандарт" С.А.Стрелкова;
- Борн и Вольф;
- Аззам и Башара;
- Ньютон;
- Джерард;
- Дейрмеджан;
- Розенберг;
- Ховенир и ван дер МИ;
- Таблицы Коулсона, Даве, Секера;
- Л.И.Чайковская;
- Шерклиф;
- Кизель.

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 141 of 155

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

**В 1988 и 1993 гг. вышла книга патриарха поляри-  
ризационных исследований К.L.Coulson "Polarization  
and intensity of light in the atmosphere A.Deepak  
Publishing, Hampton, Virginia, 533 p.**

**Уровень современных зарубежных достижений пред-  
ставлен в книгах**

**J.W.Hovenier, C. van der Mee, H. Domke  
Transfer of polarized light  
in planetary atmosphere —  
basic concepts and practical methods.  
Springer, Berlin, 2004**

**V.I.Mishchenko, L.D.Travis, A.A.Lacis  
Multiple Scattering of light by Particles:  
Radiative Transfer and Coherent Backscattering.  
Cambridge University Press, 2004**

*Примечание. Мы много лет знакомы с авторами,  
но за рубежом очень стараются не упоминать про  
работы российских ученых!*

Home Page

Title Page

Contents



Page 142 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

**В последние годы поляризация привлекает научные интересы ученых в разных странах, особенно после запуска космических аппаратов с поляризационной аппаратурой POLDER.**

**На симпозиуме IRS-1996 (США) было 10 докладов, IRS-2000 (Санкт-Петербург) было 16 докладов, в Трудях IRS-2004 (Южная Корея) опубликовано 3 статьи, из них одна наша.**

*Но нужно знать, что*

- разработчики поляризационных методик всё те же (Россия, США, Нидерланды, Франция, Германия, Беларусь);*
- за рубежом, особенно в США, поддерживается широкое распространение готовых (устаревших) компьютерных кодов (чтобы всё держать под контролем и не позволить проводить самостоятельные разработки);*
- к сожалению, нигде не читаются лекции по теории переноса, тем более с учетом поляризации.*

Home Page

Title Page

Contents



Page 143 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 144.

**В последние годы активность наблюдается в разработках, ориентированных на многомерные среды, на стохастические облака и анизотропные среды (Красноярск, Обнинск). Расширяется сфера приложений, в том числе в область ММВ (ИРЭ РАН).**

*Естественно, что на вооружении суперкомпьютеры, параллельные алгоритмы, метод Монте-Карло, а значит, в этих работах участвуют ученики Г.А.Михайлова.*

Home Page

Title Page

Contents



Page 144 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

Home Page

Title Page

Contents



Page 145 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 145.

*Нам же удалось построить векторно-матричный передаточный оператор и найти базовый набор тензоров функций влияния и пространственно-частотных характеристик для задач дистанционного зондирования и моделирования переноса поляризованного излучения в гетерогенных системах с разными приближениями теории переноса в подобластях для плоских слоев и сферических оболочек (1D, 2D, 3D – геометрии).*

This is Slide No. 146.

Представленный метод реализуется с помощью алгоритмов *параллельных вычислений* угловых и пространственных распределений излучения внутри системы и на ее границах на многопроцессорных компьютерах. Предложены средства автоматизации расчетов и обработки результатов на языке управления сценариями.

*Новизна подхода* состоит в формулировке новых моделей и новых методов решения многомерных задач теории переноса излучения.

*Значимость подхода* состоит в формулировке новых моделей и новых методов атмосферной коррекции космических данных, что крайне важно для гиперспектральных технологий!

Home Page

Title Page

Contents



Page 146 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 147.

**Используются следующие приемы распараллеливания вычислений:**

**1) распределенные вычисления по физическим моделям:**

- многоспектральные (по длине волны);
- по оптико-геофизической погоде (по коэффициентам общей краевой задачи);
- по источникам излучения;

Home Page

Title Page

Contents



Page 147 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 148.

2) распределенные вычисления на основе методического распараллеливания — декомпозиции краевых задач:

- по моделям переноса излучения, т.е. по приближениям теории переноса излучения;
- по подобластям;
- по параметрам вектора функций влияния;
- по параметрам вектора пространственно-частотных характеристик;
- по компонентам векторных функционалов;

Home Page

Title Page

Contents



Page 148 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 149.

### 3) алгоритмическое распараллеливание для многомерных моделей:

- однократное рассеяние по характеристикам;
- многократное рассеяние по интегралам столкновений;
- по квадрантам угловых разностных сеток;
- по подобластям с разными сеточно-характеристическими схемами.

Home Page

Title Page

Contents



Page 149 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

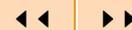
This is Slide No. 150.

- **Что касается гиперспектрального моделирования переноса излучения, то в настоящее время уже нет проблем с численным решением краевых задач для кинетического уравнения переноса излучения.**
- **Слабое место в современных гиперспектральных моделях — это оптические характеристики взаимодействия излучения с веществом, которые определяют коэффициенты, источники и граничные условия уравнений переноса излучения.**
- **При наличие развитого математического аппарата и суперкомпьютеров эту проблему можно решить!**
- **И как это было на заре освоения космоса, нужна консолидация математиков-вычислителей, физиков, химиков и др., поскольку стоящие задачи междисциплинарные, комплексные и "БОЛЬШИЕ", в одиночку не справиться!**

Home Page

Title Page

Contents



Page 150 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 151.

## *Гиперспектральное аэрокосмическое дистанционное зондирование — это*

- *перспективное направление развития СВЕ-  
ТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ!*
- *перспективное направление развития тео-  
рии электромагнетизма!*
- *перспективное направление развитие тео-  
рии переноса излучения!*
- *перспективное направление развитие су-  
первычислений!*
- *перспективное направление развитие раз-  
ных приложений!*

Home Page

Title Page

Contents



Page 151 of 155

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 152.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**В России огромное научное наследие и от  
ВЕЛИКОЙ АКАДЕМИИ НАУК СССР!!**

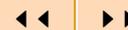
**Как и сотни лет назад ученые изучали СВЕТ, так и  
будущее невозможно без СВЕТА, а потому  
необходимо обеспечить преемственность и  
развитие изучения этого удивительного  
фундаментального компонента мироздания!**

**Пожалуй, следует больше внимания уделить  
проблеме "СВЕТ и ЦВЕТ" .**

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 152 of 155

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 153.

Как сказал Валентин Распутин,  
"Выстояли" в лихие и смутные  
последние годы.  
Пора восстанавливать и развивать  
страну и науку!

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 153 of 155

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

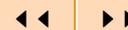
This is Slide No. 154.

**МОЛОДЫЕ! ТВОРИТЕ!**  
**Развивайте свои "МОЗГИ" !**  
**Покоряйте вершины науки!**  
**Осваивайте и покоряйте АРКТИКУ!**  
**ЭТО ТАК ИНТЕРЕСНО!**

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 154 of 155

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 155.

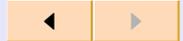
**БЛАГОДАРЮ  
ЗА ВНИМАНИЕ**

**THANK YOU  
FOR ATTENTION**

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 155 of 155

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)