

**"Будущее Земли" : гипотеза
Р.И.Нигматулина "Океан —
диктатор климата"
Десятилетие ООН наук об
океане 2021-2030**

© 2006 г. Т.А.Сушкевич, С.А.Стрелков, С.В.Максакова

tamaras@keldysh.ru

Федеральное государственное учреждение "Федеральный
исследовательский центр Институт прикладной математики
им. М.В. Келдыша Российской академии наук"

(в названии нет ни "научное" ни "бюджетное")

**Восемнадцатая Всероссийская открытая конференция
"Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из
космоса", 16 – 20 ноября 2020 года,
Институт космических исследований РАН, г. Москва,
СЕКЦИЯ D: Дистанционные методы исследования атмосферных и
климатических процессов**

**Работа выполняется по теме № 0017-2019-0002 при частичной
поддержке РФФИ (проекты 18-01-00609, 17-01-00220)**

Home Page

Title Page

Contents



Page 1 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

*Посвящается 200-летию
великого географического
открытия шестого материка в
январе 1820 года, который
получил своё название
"Антарктида" как производное
от слова "Антарктика". В
переводе с греческого
Антарктика на Южном полюсе
Земли — "противоположная
Арктике" на Северном полюсе.
Россия заявила о себе как о
мировой морской державе.*

Home Page

Title Page

Contents



Page 2 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

Антарктида — огромный плацдарм для ученых.

Теоретически континент и сегодня не принадлежит ни одному государству. В 1959 году была подписана "Конвенция об Антарктике", согласно которой на ее территории разрешена только научная деятельность и запрещено любое размещение военных объектов.

Антарктида окружена водами Атлантического, Индийского и Тихого океанов. Антарктиду можно назвать научной лабораторией, особенно для климатологов.

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 3 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 4.

Организация Объединенных Наций провозгласила Десятилетие наук об океане в интересах устойчивого развития (2021-2030 годы), чтобы поддержать усилия, направленные на то, чтобы обратить вспять цикл ухудшения состояния здоровья океана и собрать заинтересованные стороны океана во всем мире на основе общих рамок, которые позволят науке об океане в полной мере поддержать страны в создании улучшении условий для устойчивого развития океана.

Морское царство является крупнейшим компонентом земной системы, которая стабилизирует климат и поддерживает жизнь на Земле и благосостояние людей.

Home Page

Title Page

Contents



Page 4 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

По данным ООН

Океан покрывает 70 процентов поверхности Земли — это самая большая биосфера нашей планеты, — и в нем обитают 80 процентов всех живых организмов в мире.

Он обеспечивает

- 50 процентов наших потребностей в кислороде;
- поглощает 25 процентов всех выбросов углекислого газа;
- улавливает 90 процентов дополнительной тепловой энергии, генерируемой в результате этих выбросов.

Это не только "легкие планеты", но и крупнейший поглотитель углерода — жизненно важный буфер в борьбе с последствиями изменения климата.

Home Page

Title Page

Contents



Page 5 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 6.

Цель ООН

Десятилетие обеспечит общий фундамент для содействия тому, чтобы наука об океане могла в полной мере оказывать поддержку деятельности стран по устойчивому управлению океаном и, в частности, по достижению Повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 года посредством создания опирающейся на взаимодействие науки и практики новой основы для совершенствования управления океанами и прибрежными районами на благо человечества.

Home Page

Title Page

Contents



Page 6 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

Подготовка к Десятилетию ООН наук об океане в интересах устойчивого развития вступила в завершающую фазу

Организация Объединенных Наций объявила Десятилетие наук об океане в интересах устойчивого развития (2021-2030 годы).

Мероприятия, которые пройдут в рамках Десятилетия, призваны объединить научное сообщество, политических деятелей, бизнес и граждан для выполнения программы совместных исследований и технологических инноваций.

"Главный лозунг Десятилетия (в вольном переводе с английского) — "от Океана, который есть сейчас, к Океану, о котором мы мечтаем", - рассказывает Пётр Завьялов, заместитель директора по научно-организационной работе Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Home Page

Title Page

Contents



Page 7 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

Подготовка к Десятилетию ООН наук об океане в интересах устойчивого развития вступила в завершающую фазу

План реализации Десятилетия определяет целую иерархию научных и прикладных целей и задач.

Они касаются обеспечения экологического здоровья Мирового океана, оптимизации использования его биологических и минеральных ресурсов, минимизации ущерба от опасных океанических явлений и стихийных бедствий.

В настоящее время объявлен так называемый "Первый призыв к действиям в рамках Десятилетия" (Call for Decade Actions). Принимаются конкурсные заявки на проведение исследовательских программ и проектов, которые получают одобрение мирового научного сообщества в статусе официальных мероприятий Десятилетия".

Home Page

Title Page

Contents



Page 8 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

"Детальное содержание предложений по действиям российских океанологов в рамках Десятилетия сейчас обсуждается, но, безусловно, они будут включать долгосрочные программы работ нашего научного флота во всех океанах, а также участие нашей страны в целом ряде крупных международных исследовательских консорциумов.

В качестве отдельных примеров деятельности уже существующих консорциумов можно привести согласованный план океанских и полярных исследований в рамках сотрудничества стран БРИКС, программу совместных исследований Международной рабочей группы по устойчивому развитию Каспийского моря и другие.

Можно надеяться, что многие из этих инициатив приобретут статус действий в рамках Десятилетия наук об океане", — добавил Пётр Завьялов.

Home Page

Title Page

Contents



Page 9 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 10.

Подготовка к Десятилетию ООН наук об океане в интересах устойчивого развития вступила в завершающую фазу

"Среди разных целей и задач Десятилетия хотелось бы отметить две: во-первых, повышение знаний об океане, его состоянии и проблемах у всех людей на планете — от первоклассников до руководителей государств.

Люди должны осознавать зависимость их благосостояния от тех благ и ресурсов, которые они получают от океана, и помогать в решении проблем океанов и морей. Другая задача - повышение востребованности морской науки в обществе, которая в последние годы и даже десятилетия заметно снизилась.

Home Page

Title Page

Contents



Page 10 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 11.

Подготовка к Десятилетию ООН наук об океане в интересах устойчивого развития вступила в завершающую фазу

Только изучая океан, понимая, какие в нем происходят изменения, к каким потерям они могут привести для всех и каждого, можно принимать меры для их предотвращения или ослабления", — рассказывает Сергей Шаповалов, член международной исполнительской планирующей группы по подготовке программы Десятилетия ООН Межправительственной океанографической комиссии ЮНЕСКО, руководитель рабочей группы Межведомственной национальной океанографической комиссии Российской Федерации (МНОК).

Home Page

Title Page

Contents



Page 11 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 12.

Физическую картину климата системы "океан-суша-атмосфера" представил академик Андрей Сергеевич Монин в обзоре: Монин А.С., Шишков Ю.А. Климат как проблема физики // УФН. 2000. Т. 170, № 4. С. 419-445.

Академик Роберт Искандрович Нигматулин назвал свою экспертную статью "Океан — диктатор климата" // Эксперт. 2018. № 34. С. 46-51.

В докладе обсуждается концепция Р.И. Нигматулина о роли CO_2 , H_2O и океана — конкурирующих факторов радиационного форсинга на глобальный климат и эволюцию планеты.

Гипотеза Р.И.Нигматуллина: Океан — ДИКТАТОР КЛИМАТА!

Мировой океан занимает более 70% поверхности планеты.

Солнечное излучение — источник энергии на Земле.

Оно поглощается и накапливается океаном, потом переизлучается в длинноволновый спектр.

Это излучение поглощается уже парниковыми газами — углекислым газом и водяным паром — и греет атмосферу.

А водяного пара в атмосфере на два порядка больше, чем углекислого газа.

Однако природой предусмотрен компенсационный механизм...

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 13 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 14.

*Гипотеза Р.И.Нигматуллина:
Океан — ДИКТАТОР КЛИМАТА!*

Пока это гипотеза:

по мере увеличения в воздухе паросодержания должна увеличиться облачность, а значит, возрастает отражение солнечного излучения облаками.

Возникает отрицательная обратная связь...

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 14 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 15.

Гипотеза Р.И.Нигматуллина: Океан — ДИКТАТОР КЛИМАТА!

Это самый сложный естественный радиационный процесс глобального масштаба, от которого зависит будущее планеты.

Для исследований радиационного фактора влияния Мирового океана на эволюцию Земли необходимо международное сотрудничество с привлечением комплексных систем наблюдений радиационных процессов под водой, на воде и из космоса при поддержке суперкомпьютерного моделирования и big data.

Home Page

Title Page

Contents



Page 15 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 16.

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. 17.

В.И. Вернадский :

*"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"***

This is Slide No. 18.

В.И. Вернадский :

"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"

Home Page

Title Page

Contents



Page 18 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 19.

В.И. Вернадский :

"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. 20.

Радиационное поле — это солнечное и собственное излучение, которое численно можно смоделировать как решение многомерных скалярных и векторных краевых задач для кинетических уравнений переноса излучения в рассеивающих, поглощающих, поляризующих, преломляющих гетерогенных средах (атмосфера, облака, океан, земная поверхность, природные и технические объекты) в масштабах планеты.,

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 20 of 173

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 21.

*С одной стороны, 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 21 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 22.

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. 23.

С другой стороны, 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 23 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 24.

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 24 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 25.

*Следует напомнить, 2015 год на 71–м
пленарном заседании 68–й сессии Генеральной
ассамблеи ООН был провозглашен
"Международным Годом света и световых
технологий (IYL 2015)".*

"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 25 of 173

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 26 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 27.

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 27 of 173

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 28.

что такое РАДИАЦИОННЫЙ ФОРСИНГ на климат и эволюцию Земли?

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 28 of 173

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 29.

Ведущими специалистами из Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова написана книга

**Кароль И.Л., Катцов В.М., Киселев А.А., Кобышева Н.В.
О климате по существу и всерьез. Санкт-Петербург:
Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, 2008. 55 с.**

Книжка доступна в Интернет:

<http://global-climate-change.ru/down/CLIMATE-publication-GGO.pdf>

Home Page

Title Page

Contents



Page 29 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 30.

Изменения климата, капризы погоды воспринимались человечеством как данность, вынуждающая жителей планеты к этому приспособляться.

И только сравнительно недавно, во многом благодаря прорывам в космических системах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и "computer sciences" появились возможности всесторонне изучать процессы формирования погоды и климата, причины их изменений и перспективы влияния на них антропогенной деятельности и естественно-природных факторов.

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 30 of 173

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 31.

Климатическая система Земли — это природная среда, включающая атмосферу, гидросферу (океаны, моря, озера, реки), криосферу (поверхность суши, снег, морской и горный лед и т.д.), биосферу, объединяющую всё живое.

Для количественных оценок значимости разных климатообразующих факторов, зависящих от солнечного и собственного излучения, ввели специальную характеристику КСЗ — радиационное воздействие (форсинг).

По экспертным оценкам последнего времени от 40% до 60% приходится на радиационный форсинг на эволюцию климата.

This is Slide No. 32.

Радиационный форсинг — это изменение притока радиации (солнечной коротковолновой и длинноволновой) в глобальной системе "атмосфера-земная поверхность-океан" под влиянием радиационно-активных факторов:

- альbedo земной поверхности
- облачность
- океаны и моря
- снежный и ледовый покров
- газовый состав атмосферы
- аэрозольный состав атмосферы

Home Page

Title Page

Contents



Page 32 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 33.

- **солнечная постоянная**
- **спектральные характеристики рассеяния и поглощения**
- **изотропная и анизотропная (при осадках и низких температурах) среда**
- **оптико-метеорологическая "погода" (температура, давление, влажность)**
- **биофизические, биогеофизические и биогеохимические процессы, круговорот веществ в биосфере и экосистеме**
- **нефтегазовый комплекс и его влияние на окружающую среду.**

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 33 of 173

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 34.

*Дистанционное зондирование радиационно-активных компонент и метеорологических параметров атмосферы, поверхности и океана — актуальная перспективная сложнейшая задача будущего, без решения которой **все модели климата будут недостоверными.***

*Объективно оценивать и контролировать выбросы газов и загрязнения окружающей среды сложно, поскольку **КСЗ — это нелинейная динамическая система** и локальные выбросы тут же распространяются в воздушной и водной средах в зависимости от метеорологической ситуации и взаимодействуют с биосферой.*

This is Slide No. 35.

*Главные проблемы:
детальный учет по-
глощения, образо-
вание облаков, на-
копление тепла в
океанах и обмен из-
лучения между ат-
мосферой и океа-
НОМ.*

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 35 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

Основные газы в атмосфере Земли

Таблица.

Количество линий для каждого газа в базе
NITRAN–2016*

N	Молекула	Сумма линий по всем изотопам
1.	H ₂ O	313 787
2.	CO ₂	559 874
3.	O ₃	449 570
4.	N ₂ O	160 287
5.	CO	5 381
6.	CH ₄	450 332
7.	O ₂	14 085
	Всего	1 953 316

*Фомин Б.А., Колокутин Г.Э. Новая спектроскопическая база NITRAN–2016 в полинейных моделях, применяемых в дистанционном зондировании Земли методами инфракрасной спектроскопии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 17–24.

[Home Page](#)
[Title Page](#)
[Contents](#)


Page 36 of 173

[Go Back](#)
[Full Screen](#)
[Close](#)
[Quit](#)

This is Slide No. 37.

На текущий момент наземные измерения оптических характеристик атмосферы ведутся по всему миру и объединены сетью AERONET.

К наиболее известным инструментам пассивного зондирования облаков из космоса можно отнести MODIS, ATSR, AVHRR и POLDER.

Вместе с тем пассивные методы зондирования не позволяют получить вертикальный профиль параметров, требуемый для численных моделей радиационного баланса Земли. Именно для восстановления вертикальных профилей атмосферы разработаны и широко применяются такие инструменты активного зондирования, как лидары. Наземные поляризационные лидары широко используются в мире во многих научных центрах и объединены в многочисленные лидарные сети.

Home Page

Title Page

Contents



Page 37 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 38.

Наиболее многочисленной (30 станций) является европейская лидарная сеть EARLINET. Большинство лидаров в этой сети — поляризационные и находятся в узлах сети AERONET. Также достаточно крупной (20 станций) является сеть AD-Net, действующая в Азиатском регионе. Восемь лидаров данной сети являются многоволновыми поляризационными лидарами. Стоит также отметить лидарную сеть Латинской Америки LALINET/ALINET, включающую в себя 10 станций. Кроме того, существует сеть расположенных по всему миру автономных непрерывно действующих лидарных станций с единым центром сбора данных и калибровки — MPLNet.

Home Page

Title Page

Contents



Page 38 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 39.

Для глобального мониторинга газового состава атмосферы создана лидарная сеть NDACC, включающая в себя 70 станций.

Важно отметить, что все указанные лидарные сети объединены единой сетью GALION, также включающей в себя еще две лидарные сети: CIS-LINet и CREST.

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 39 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

Китай и Россия начнут развивать сотрудничество в сфере оптики атмосферы.

Совместный научно-исследовательский российско-китайский центр по изучению оптики атмосферы будет создан на территории восточно-китайской провинции Аньхой. Об этом сообщает агентство Синьхуа.

Соглашение по созданию проекта было подписано между Институтом оптики атмосферы имени Зуева Сибирского отделения РАН и Аньхойским институтом точной механики и оптики Академии наук Китая в мае текущего года.

Данное соглашение предусматривает создание определенной научной инфраструктуры, в том числе станции мониторинга на территории Сибири и восточной части междуречья Хуанхэ и Янцзы на территории Китая.

Ни в одной стране мира нет такого научного наследия и такой плеяды **ВЕЛИКИХ УЧЕНЫХ**, заложивших фундаментальные основы для **ПРОГРАММЫ "Будущее Земли"** :

— это академики:

- Владимир Иванович Вернадский (12.03.1863 – 06.01.1945),
- Отто Юльевич Шмидт (30.01.1891 – 07.09.1956),
- Андрей Николаевич Тихонов (30.10.1906 – 08.10.1993),
- Гурий Иванович Марчук (08.06.1925 – 24.03.2013),
- Виктор Амазаспович Амбарцумян (18.09.1908 – 12.08.1996),
- Виктор Викторович Соболев (02.09.1915 – 07.01.1999),
- Кирилл Яковлевич Кондратьев (14.06.1920 – 01.05.2006),
- Александр Михайлович Обухов (05.05.1918 – 03.12.1989),
- Никита Николаевич Моисеев (23.08.1917 – 29.02.2000),
- Михаил Иванович Будыко (20.01.1920 – 10.12.2001),
- Владимир Евсеевич Зуев (29.01.1925 – 06.06.2003),
- Андрей Сергеевич Монин (02.07.1921 – 22.09.2007),
- Николай Павлович Лаверов (12.01.1930 – 27.11.2016),
- Юрий Антониевич Израэль (15.05.1930 – 23.01.2014) — в 2007 г. Нобелевский лауреат премии мира вместе с Альбертом Гором и др.,

Home Page

Title Page

Contents



Page 41 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

а также

- член-корреспондент **Илья Афанасьевич Кибель (19.10.1904 – 05.09.1970),**
- член-корреспондент **Геннадий Павлович Курбаткин (23.07.1930 – 09.09.2011),**

профессора

- **Александр Александрович Фридман (16.06.1988 – 16.09.1925),**
- **Кусиэль Соломонович Шифрин (26.07.1918 – 02.06.2011),**
- **Михаил Арамаисович Петросянц (04.12.1919 – 18.07.2005),**
- **Ева Михайловна Фейгельсон (07.09.1915 – 17.01.2010)**

и профессора

- **Георгий Владимирович Розенберг (29.04.1914 – 09.12.1982),**
- **Матвей Семенович Малкевич (02.03.1924 – 15.06.1994),**
- **Неон Александрович Арманд (01.01.1932 – 09.10.2009)**
— **ПИОНЕРЫ** покорения космического пространства и создания основ космических исследований, которые стояли у истоков создания современной космической оптики для аэрокосмического ДЗЗ.

Значимый вклад в теорию климата внесли академики Г. С. Голицын, И. И. Мохов, В. П. Дымников, а также профессора А. Н. Филатов, И. Л. Кароль, В. М. Катцов, В. П. Мелешко, А. В. Фролов и другие.

Home Page

Title Page

Contents



Page 42 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

К проектам покорения космоса были привлечены лучшие советские специалисты в разных областях. Настоящий доклад — это признание заслуг первопроходцев в освоении космического пространства и космических технологий ДЗЗ, кто своими трудами развивал фундаментальные основы ПРОГРАММЫ:

— это космонавты-исследователи на **ПЕРВЫХ** пилотируемых космических кораблях и долгосрочных орбитальных станциях — Ю. А. Гагарин, Г. С. Титов, А. Г. Николаев, П. Р. Попович, В. В. Терешкова, В. Ф. Быковский, А. В. Филипченко, Н. Н. Рукавишников, А. А. Леонов, В. Н. Кубасов, В. А. Шаталов, А. С. Елисеев, В. И. Севастьянов, В. Г. Лазарев, О. Г. Макаров, П. И. Климук, Б. В. Волынов, Е. Б. Хрунов, В. Н. Волков, В. С. Комаров, В. В. Горбатко, В. В. Аксенов, В. В. Ковалёнок, В. В. Рюмин, Г. Т. Береговой...,

— это космонавты-исследователи, которые защитили докторские диссертации по материалам ДЗЗ из космоса — Г. М. Гречко, член-корреспонденты РАН В. П. Савиных и В. В. Лебедев;

Home Page

Title Page

Contents



Page 43 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 44.

— это советские ученые, внесшие значимый вклад в становление космических исследований и ДЗЗ: Г. А. Михайлов, О. И. Смоктий, В. В. Козодеров, А. И. Лазарев, М. М. Мирошников, Е. О. Федорова, В. П. Козлов, А. С. Селиванов, В. Н. Сергеевич, И. И. Кокшаров, Л. И. Чапурский, Т. А. Гермогенова, М. В. Масленников, М. С. Малкевич, Г. В. Розенберг, А. Б. Сандомирский, Г. И. Горчаков, А. Х. Шукуров, И. Н. Минин, А. А. Бузников, А. П. Гальцев, О. Б. Васильев, Ю. М. Тимофеев, О. М. Покровский, Л. С. Ивлев, Б. С. Непорент, М. С. Киселева, Э. Г. Яновицкий, В. М. Орлов, В. Г. Бондур, Н. И. Аржененко, А. П. Тищенко, Ч. Й. Виллман, О. А. Авасте, В. Н. Досов, В. В. Филюшкин, М. А. Назаралиев, М. В. Кабанов, С. Д. Творогов, Г. Г. Матвиенко, Ю. С. Макушкин, Г. М. Креков, В. М. Фомин, Ю. Н. Пономарев, В. П. Лукин, В. В. Белов, В. А. Крутиков, И. В. Самохвалов, М. В. Панченко, А. Г. Боровой, А. М. Волков, Л. А. Пахомов, А. А. Феоктистов, Д. А. Усиков, В. Г. Золотухин, А. К. Городецкий, В. В. Бадаев, Я. Л. Зиман, Г. А. Аванесов, У. М. Султангазин, Г. Ш. Лившиц, В. Е. Павлов, В. Л. Филиппов, Н. И. Москаленко, В. Н. Арефьев, А. М. Броунштейн и др.

Home Page

Title Page

Contents



Page 44 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 45.

В 1965 г. был организован Институт космических исследований АН СССР, в который перешли подразделения из Института Келдыша и других организаций. Организатором и первым директором (1965-1973) ИКИ АН СССР по рекомендации Президента АН СССР М. В. Келдыша являлся его соратник академик Георгий Иванович Петров (31.05.1912 – 13.05.1987).

Особо следует отметить ученых из Белоруссии: основатель Института физики Борис Иванович Степанов (28.04.1913 – 07.12.1987), экс-ректор Минского госуниверситета Леонид Иванович Киселевский (12.04.1927 – 08.10.1991), Ф. И. Федоров, А. П. Иванов, К. С. Адзерихо, В. Е. Плюта, К. Г. Предко, Э. П. Зеге, И. Л. Кацев, А. П. Пришивалко, П. Я. Ганич, Л. И. Чайковская, А. Б. Гаврилович, П. Я. Бойко, С. А. Макаревич, Б. И. Беляев, С. Б. Костюкевич, А. А. Ковалев, С. И. Кононович, Е. К. Науменко, А. Н. Валентюк, Ю. А. Лебединский и др.

Home Page

Title Page

Contents



Page 45 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

Home Page

Title Page

Contents



Page 46 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 46.

Современное состояние теории оптического передаточного оператора и методов дистанционного зондирования

Радиационное поле Земли формируется под влиянием двух компонент системы переноса излучения: атмосферы и земной поверхности (САП).

Связи между радиационными характеристиками и параметрами атмосферы и земной поверхности описываются решениями краевой задачи теории переноса излучения в САП, когда важно использовать теорию многократного рассеяния.

Сложность задачи заключается в многопараметричности модели среды, большом разнообразии процессов трансформации энергии Солнца, вариантов визирования 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.

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 47 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 48.

МЕТОД ФУНКЦИЙ ВЛИЯНИЯ И ЛИНЕЙНО-СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД

Для иллюстрации рассмотрим задачу дистанционного зондирования поверхности через атмосферу планеты. Развит эффективный подход атмосферной коррекции спутниковой информации.

Модель передаточных свойств атмосферы представлена в форме линейного функционала — *интеграла суперпозиции*, лежащего в основе классического линейно-системного подхода.

Оптический передаточный оператор построен математически строго и физически корректно **методом функций влияния и пространственно-частотных характеристик**.

Home Page

Title Page

Contents



Page 48 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 49.

Функции влияния и пространственно-частотные характеристики системы "атмосфера – поверхность планеты" являются **ядрами функционалов и объективными характеристиками, инвариантными** относительно конкретных структур зондируемых объектов, условий освещенности и наблюдения.

Пространственно-частотные характеристики вводятся как фурье-образы функции влияния по горизонтальным координатам.

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 49 of 173

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

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

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

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

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

Home Page

Title Page

Contents



Page 50 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 51.

Как показал анализ состояния проблемы учета и дистанционного зондирования земной поверхности все **многообразие подходов** сводится к трем основным.

- **Первым** появился неявный способ учета отражающей поверхности.
- **Второй** — это явный способ методом ФВ и ПЧХ.
- **Третий** — это функционалы и сопряженные уравнения.

КОНЦЕПЦИЯ ЛИНЕЙНО-СИСТЕМНОГО ПОДХОДА

В любой активной или пассивной системе дистанционного зондирования земной поверхности всегда присутствуют **четыре** главные компоненты:

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

В трех компонентах проявляется влияние атмосферы: атмосферно-оптические механизмы воздействуют на формирование "сценария на перенос его изображения через среду и учитываются в радиационной коррекции при анализе "сцен".

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 52 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

Вследствие бесконечного многообразия возможных объектов наблюдения целесообразно использовать **универсальный подход**, который позволяет описывать весь канал наблюдения через **объективные характеристики, инвариантные** относительно конкретных структур зондируемых объектов, условий освещенности и визирования.

Такой подход широко применяется в классической оптике, в теориях видения, электрических цепей, оптико-электронных систем, фотографии, обработки изображений и **известен как линейно-системный подход**.

Под системой следует понимать все то, что осуществляет преобразование ряда входных функций или воздействий в ряд выходных функций или реакций (откликов).

Реакции систем на входные воздействия вследствие их аналогии можно описать некоторыми **обобщенными характеристиками**, определение которых не зависит от конкретного вида системы (электрической, оптической, радиофизической и т.д.).

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 53 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

Общность состоит в том, что **функциональное соотношение**, связывающее входной $E(x, y)$ и выходной $\Phi(x, y)$ двумерные сигналы системы:

$$\Phi(x, y) = (\Theta, E) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Theta(x, y; x', y') E(x', y') dx' dy' \quad (1)$$

имеет **фундаментальный характер** и известно как *интеграл суперпозиции*, означающий, что линейная система полностью характеризуется суммой ее откликов на входные воздействия; x, y — горизонтальные координаты.

Если выполняется условие *пространственной инвариантности* (изопланарности), то *функция рассеяния* (ФР) системы, или *функция рассеяния точки* (ФРТ), $\Theta(x, y; x', y')$ зависит от разности аргументов и **функционал (1) принимает вид свертки**

$$\Phi(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Theta(x - x'; y - y') E(x', y') dx' dy'. \quad (2)$$

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 54 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

С помощью теоремы о фурье-спектре свертки **двумерный спектр выходного сигнала системы** $B(p_x, p_y) = \mathcal{F}[\Phi(x, y)]$ получается в виде произведения

$$B(p_x, p_y) = \Psi(p_x, p_y)V(p_x, p_y), \quad (3)$$

где спектральная плотность входного сигнала (распределения яркости объекта) $V(p_x, p_y) = \mathcal{F}[E(x, y)]$.

Спектральная плотность функции рассеяния $\Psi(p_x, p_y) = \mathcal{F}[\Theta(x, y)]$ называется *передаточной функцией* системы (*оптической передаточной функцией* (ОПФ)).

С помощью обратного преобразования Фурье из (3) можно найти значение **выходного сигнала системы** (распределение яркости на выходе оптической системы):

$$\Phi(x, y) = \mathcal{F}^{-1}[B(p_x, p_y)] = \mathcal{F}^{-1}[\Psi(p_x, p_y)V(p_x, p_y)]. \quad (4)$$

This is Slide No. 56.

Следовательно, (оптическая) система осуществляет двумерное преобразование Фурье над произведением спектров ее функции рассеяния и входного сигнала.

Согласно (3) ОПФ $\Psi(p_x, p_y)$ позволяет установить соответствие между двумерными спектрами распределений яркости в плоскости объекта и освещенности в плоскости изображения.

Линейная (оптическая) система представляет собой линейный фильтр пространственных частот с коэффициентом передачи $\Psi(p_x, p_y)$.

Пространственно-частотная характеристика $\Psi(p_x, p_y)$ в общем случае является комплексной функцией:

$$\Psi(p_x, p_y) = A(p_x, p_y) \exp[i\beta(p_x, p_y)].$$

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 56 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 57.

Модуль $A(p_x, p_y)$ нормированной ОПФ называют *частотно-контрастной характеристикой (ЧКХ), амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), функцией передачи модуляции (ФПМ)*, а зависимость фазы $\beta(p_x, p_y)$ от пространственной частоты — *фазо-частотной характеристикой (ФЧХ)*.

Для систем с цилиндрической симметрией используется преобразование Фурье-Бесселя, или преобразование Ганкеля нулевого порядка:

$$\Phi(\nu) = 2\pi \int_0^{\infty} \Phi(\rho) J_0(2\pi\nu\rho) \rho d\rho.$$

This is Slide No. 58.

Концепция (оптической) пространственной фильтрации, т.е. манипулирование пространственными частотами с целью изменения или передачи свойств изображения, известна уже более 100 лет как результат работ Эрнста Аббе в 1873–1886 гг. (*Abbe E. // Arch. Microsc. 1873. V.9. P.413.*)

Эти работы оказали глубокое влияние на научную дисциплину, которая позже была названа **фурье-оптикой** (Применение методов фурье-оптики, 1982). Эта наука возникла на стыке классической оптики и теории информации.

Результаты Аббе непосредственно привели к описанию изображающих оптических приборов как **фильтров пространственных частот** поля объекта.

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 58 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

Ключевым поворотным моментом в развитии оптических методов обработки изображений оказалось появление в 30-х годах работ Н. Ньюберга и в 40-х годах работ Р.М. Дюфье.

Ньюберг предложил для анализа проблемы света и прибора использовать разложение функций по системе ортонормированных функций как наилучшее линейное приближение.

Ньюберг вводит общий принцип построения спектральных приборов с использованием идеи о разложении аналитической функции в ряд по любой полной системе ортогональных функций.

Эти работы оказали весомое влияние на развитие метода фурье-спектрометрии.

Ньюберг Н. О возможности приближенного спектрофотометрирования без разложения в спектр // Докл. АН СССР. 1934. Т. 4. № 5/6. С. 278–285.

Ньюберг Н. О спектрах, сходных по цвету излучений // Докл. АН СССР. 1945. Т. 50. С. 143–146.

Home Page

Title Page

Contents



Page 59 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 60.

В монографии Duffieux P.M. *L'Integrale de Fourier et ses Applications a l'Optique. Rennes. 1946,*

рассматривая обобщенную изображающую систему как линейный фильтр, Дюфье

установил, что распределение энергии в плоскости объекта или изображения и в плоскости зрачка оптической системы связаны преобразованием Фурье,

описал распределение интенсивности света в плоскости изображения как результат распределения интенсивности света в плоскости объекта и *аппаратной функции рассеяния точки*, т.е. *импульсного отклика*.

Фактически, Дюфье первым обосновал соотношения (1)–(4).

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 60 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

Идеи Дюфье дали колоссальные плоды: уже в 50-е-60-е годы благодаря общему математическому аппарату:

— **сформулированы** основные положения теории систем (линейных и нелинейных, инвариантных и пространственно-неинвариантных, систем с обратной связью и т.д.);

— **установлены** аналогии между оптикой и наукой о передаче информации, между оптическими и электрическими фильтрами, между оптикой и радиоэлектроникой, между повышением четкости изображения и выравниванием передаточной функцией;

— **развиты** основы синтеза оптических систем, когерентно-оптических и голографических методов обработки информации (бурный расцвет с появлением лазеров);

— **сделаны** попытки управлять фазовым пропусканием пространственных фильтров с помощью поляризационных методов, а также амплитудным и фазовым пропусканием с помощью голографического метода;

Home Page

Title Page

Contents



Page 61 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

– **обратились к важной проблеме** обнаружения оптическими средствами сигнала на фоне шума с использованием некогерентного, частично когерентного и когерентного света;

– **бурное развитие получили** адаптивная оптика (В.П. Лукин, 1986), оптико-электронные системы (М.М. Мирошников, 1977), теория обработки изображений (Ю.П. Пытьев, 1979, 1983, 1989; Г.И. Василенко, 1985, 1986), теория информации и т.д.

В течение десятилетия было опубликовано огромное число работ, посвященных фурье-анализу оптических изображающих систем.

Таким образом **были заложены основы (математического) аппарата теории линейных систем** (А. Марешаль, М. Франсон, 1964; Э. О'Нейл, 1966; А.П. Иванов, 1969; Дж. Гудмен, 1970; А. Папулис, 1971; М.М. Мирошников, 1977; В.Е. Зуев, 1977 и др.).

Home Page

Title Page

Contents



Page 62 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 63.

В соотношениях (1)–(4) заключены базовые основы аппарата теории линейных систем.

Пространственная фильтрация оценивается с помощью пространственных и пространственно-частотных характеристик.

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

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 63 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 64.

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ПЕРЕДАТОЧНОГО ОПЕРАТОРА

Будем рассматривать *атмосферный канал* как элемент *оптической системы переноса излучения* и **сформулируем теорию (оптического) передаточного оператора**, используя **математический аппарат линейно-системного подхода**.

Продемонстрируем методический подход и математический аппарат на примере плоской задачи. Этот подход обобщен на сферические задачи.

This is Slide No. 65.

Объективные характеристики:

- функция размытия точки (ФРТ),
- оптическая передаточная функция (ОПФ),
- частотно-контрастная характеристика (ЧКХ),
- функция передачи модуляции (ФПМ),
- импульсно-переходная функция (ИПФ),
- функция рассеяния системы (ФР),
- пространственно-частотная характеристика (ПЧХ) и другие характеристики качества изображения, воспроизводящих и передающих оптических, оптико-электронных, фотографических, кинематографических, телевизионных, радиотехнических, управляющих и прочих систем естественным путем **переносятся на область теории переноса излучения в оптически-активных средах.**

Home Page

Title Page

Contents



Page 65 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 66.

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. 67.

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

$$\begin{aligned} & \cos \vartheta \frac{\partial \Phi}{\partial z} + \sin \vartheta \cos \varphi \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \sin \vartheta \sin \varphi \frac{\partial \Phi}{\partial y} + \sigma(z) \Phi(x, y, z, \vartheta, \varphi) = \\ & = \sigma_s(z) \int_0^{2\pi} d\varphi' \int_0^\pi \gamma(z, \vartheta, \varphi; \vartheta', \varphi') \Phi(x, y, z, \vartheta', \varphi') \sin \vartheta' d\vartheta' + F^{in}(z, \vartheta, \varphi), \\ & \quad \Phi(x, y, z = 0, \vartheta, \varphi) |_t = F^0(x, y, \vartheta, \varphi), \\ & \quad \Phi(x, y, z = h, \vartheta, \varphi) |_b = F^h(x, y, \vartheta, \varphi) + \\ & + \varepsilon \int_0^{2\pi} d\varphi^+ \int_0^{\pi/2} q(x, y, \vartheta, \varphi; \vartheta^+, \varphi^+) \Phi(x, y, h, \vartheta^+, \varphi^+) \sin \vartheta^+ d\vartheta^+ . \end{aligned}$$

This is Slide No. 68.

Эту общую краевую задачу запишем в компактной форме

$$\hat{K}\Phi = F^{in}, \quad \Phi|_t = F^0, \quad \Phi|_b = \varepsilon\hat{R}\Phi + F^h \quad (5)$$

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

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

оператор отражения

$$[\hat{R}\Phi](h, r_{\perp}, s) \equiv \int_{\Omega^+} q(r_{\perp}, s, s^+) \Phi(h, r_{\perp}, s^+) ds^+ \quad (6)$$

является равномерно ограниченным оператором:

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

Краевая задача (5) линейная и ее решение можно искать в виде суперпозиции

$$\Phi = \Phi_a + \Phi_q.$$

Фоновое излучение атмосферы Φ_a определяется как решение первой краевой задачи теории переноса (ПКЗ) с "вакуумными" граничными условиями

$$\hat{K}\Phi_a = F^{in}, \quad \Phi_a|_t = F^0, \quad \Phi_a|_b = F^h \quad (7)$$

для слоя с прозрачными или абсолютно черными (неотражающими) границами ($\hat{R} \equiv 0$).

[Home Page](#)
[Title Page](#)
[Contents](#)

Page 69 of 173

[Go Back](#)
[Full Screen](#)
[Close](#)
[Quit](#)

This is Slide No. 70.

Задача для подсветки Φ_q , обусловленной влиянием отражающей подстилающей поверхности, — это **общая краевая задача**

$$\hat{K}\Phi_q = 0, \quad \Phi_q|_t = 0, \quad \Phi_q|_b = \varepsilon\hat{R}\Phi_q + \varepsilon E, \quad (8)$$

где источник $E(r_\perp, s) \equiv \hat{R}\Phi_a$ — яркость (освещенность, облученность) подложки, создаваемая фоновым излучением.

Общая краевая задача (5) для плоского слоя — это математическая идеализация переноса излучения в рассеивающих, поглощающих, излучающих средах, достаточно адекватно описывающая реальные радиационные процессы в САП.

This is Slide No. 71.

Будем считать функции $E(s^h; r_\perp, s)$ и $q(r_\perp, s, s')$ финитными, либо периодическими, либо кусочно-постоянными и **будем искать обобщенные (локальные) решения задачи (8) как функционалы, не интересуясь поведением решения задачи (8) на бесконечности.**

Все многообразие подстилающих поверхностей (без учета возвышений и орографии), описываемое оператором (6), и граничных источников можно объединить в четыре основных типа:

- горизонтально-однородные изотропные;
- горизонтально-однородные анизотропные;
- горизонтально-неоднородные изотропные;
- горизонтально-неоднородные анизотропные.

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 71 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

Если хотя бы одна из функций F^0 , F^h , q зависит от r_{\perp} , то решение ОКЗ (5) определяется в пятимерном фазовом объеме $(x, y, z, \vartheta, \varphi)$, и **ОКЗ не разрешима численными методами без ограничения горизонтальных размеров слоя. Решения трехмерных ОКЗ относятся к классу обобщенных решений.**

Первыми в теории переноса аппарат функций влияния использовали

А.С. Монин (*Статистическая интерпретация рассеяния микрочастиц // Теория вероятностей и ее применение. 1956. Т. I. Вып. 3. С. 328–343.*);

Б.Б. Кадомцев (*О функции влияния в теории переноса лучистой энергии // Докл. АН СССР. 1957. Т. 113. № 3. С. 541–543.*).

Значительную роль сыграла "подсказка" в учебнике по математической физике для МФТИ академика В.С. Владимирова, где рассматривается уравнение переноса с источником в правой части.

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 72 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 73.

В отличие от других авторов в данной работе **впервые математический аппарат функций влияния был разработан и развит для решения общих краевых задач теории переноса.**

Теоретические построения и алгоритмы расчета передаточного оператора основываются на

- теории обобщенных решений,
- теории интегральных преобразований обобщенных функций,
- общей теории регулярных возмущений (асимптотический метод).

Подход, разработанный на базе строгих математических основ, *называем методом функций влияния и пространственно-частотных характеристик* (методом ФВ и ПЧХ).

Home Page

Title Page

Contents



Page 73 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 74.

В теории обобщенных решений **функция влияния** является фундаментальным решением ПКЗ и ОКЗ — универсальной характеристикой системы переноса излучения, инвариантной относительно конкретных значений и структур источников излучения и параметров отражения границы.

Этот термин включает все многообразие известных частных терминов: ФР, ФРТ, ИПФ, функция Грина и др. и методически объединяет одно-, дву- и трехмерные краевые задачи.

Термин **пространственно-частотная характеристика** вводится как **двумерный фурье-спектр функции влияния** по горизонтальным координатам.

Функция влияния и пространственно-частотная характеристика — это характеристики линейной системы переноса излучения с источником на границе.

Home Page

Title Page

Contents



Page 74 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

БАЗОВЫЕ МОДЕЛИ ФУНКЦИЙ ВЛИЯНИЯ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ ПЕРЕНОСА

Первая краевая задача

$$\hat{K}\Phi = 0, \quad \Phi|_t = 0, \quad \Phi|_b = f(s^h; r_\perp, s) \quad (9)$$

отвечает линейной системе переноса излучения и ее **обобщенное решение представляется в виде линейного функционала** — *интеграла суперпозиции*

$$\Phi(s^h; z, r_\perp, s) = \hat{P}(f) \equiv (\Theta, f) \equiv$$

$$\equiv \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega^-} ds_h^- \int_{-\infty}^{\infty} \Theta(s_h^-; z, r_\perp - r'_\perp, s) f(s^h; r'_\perp, s_h^-) dr'_\perp. \quad (10)$$

This is Slide No. 76.

Ядром функционала (10) является функция влияния $\Theta(s_h^-; z, r_\perp, s)$ — решение первой краевой задачи

$$\hat{K}\Theta = 0, \quad \Theta|_t = 0, \quad \Theta|_b = f_\delta(s_h^-; r_\perp, s) \quad (11)$$

с параметром $s_h^- \in \Omega^-$ и источником

$$f_\delta(s_h^-; r_\perp, s) = \delta(r_\perp)\delta(s - s_h^-).$$

Функция влияния Θ фактически описывает поле излучения в слое с неотражающими границами, создаваемое за счет процессов многократного рассеяния **стационарного узкого пучка с направлением s_h^- , источник которого расположен на границе $z = h$ в центре системы горизонтальных координат x, y .**

Home Page

Title Page

Contents



Page 76 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

Если источник $f(r_{\perp})$ — изотропный по углам и горизонтально-неоднородный по пространственным координатам, то решение ПКЗ (9) находится через линейный функционал — интеграл суперпозиции, который является интегралом свертки:

$$\Phi(z, r_{\perp}, s) = \hat{P}_r(f) \equiv (\Theta_r, f) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} \Theta_r(z, r_{\perp} - r'_{\perp}, s) f(r'_{\perp}) dr'_{\perp} \quad (12)$$

с ядром — функцией влияния

$$\Theta_r(z, r_{\perp}, s) = \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega^-} \Theta(s_h^-; z, r_{\perp}, s) ds_h^-, \quad (13)$$

которая совпадает с широко распространенной функцией размытия точки (ФРТ) и удовлетворяет первой краевой задаче

$$\hat{K}\Theta_r = 0, \quad \Theta_r|_t = 0, \quad \Theta_r|_b = \delta(r_{\perp}). \quad (14)$$

В случае **анизотропного по углам и горизонтально-однородного по пространству источника** $f(s^h; s)$ решение ПКЗ (9) определяется через **линейный функционал — интеграл суперпозиции** по углам

$$\Phi(s^h; z, s) = \hat{P}_z(f) \equiv (\Theta_z, f) \equiv \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega^-} \Theta_z(s_h^-; z, s) f(s^h; s_h^-) ds_h^-. \quad (15)$$

Ядро функционала — **функция влияния**

$$\Theta_z(s_h^-; z, s) = \int_{-\infty}^{\infty} \Theta(s_h^-; z, r_{\perp}, s) dr_{\perp} \quad (16)$$

является **решением одномерной ПКЗ**

$$\hat{K}_z \Theta_z = 0, \quad \Theta_z|_t = 0, \quad \Theta_z|_b = \delta(s - s_h^-) \quad (17)$$

и описывает поле излучения, сформированное в слое, на границу $z = h$ которого **извне падает параллельный широкий поток** в направлении $s_h^- \in \Omega^-$. ПКЗ (17) аналогична обычной задаче для одномерного плоского слоя, освещаемого мононаправленным потоком.

При изотропном и горизонтально-однородном источнике решение ПКЗ (9)

$$\Phi(z, s) = \hat{P}_c(f) = fW(z, s), \quad f = const, \quad (18)$$

рассчитывается через функцию влияния

$$\begin{aligned} W(z, s) &= \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega^-} ds_h^- \int_{-\infty}^{\infty} \Theta(s_h^-; z, r_{\perp}, s) dr_{\perp} = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \Theta_r(z, r_{\perp}, s) dr_{\perp} = \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega^-} \Theta_z(s_h^-; z, s) ds_h^-, \quad (19) \end{aligned}$$

которую называют также *функцией пропускания, отягощенной вкладом многократного рассеяния*, и определяют как решение одномерной ПКЗ с изотропным источником

$$\hat{K}_z W = 0, \quad W|_t = 0, \quad W|_b = 1. \quad (20)$$

This is Slide No. 80.

Функции влияния Θ , Θ_r , Θ_z , W составляют **полный набор базовых моделей фундаментальных решений** первых и общих краевых задач теории переноса излучения в плоском слое и объективных инвариантных характеристик линейной САП.

Соотношения (19) можно использовать в качестве критериев оценки точности расчетов функций влияния.

ФУРЬЕ-ПРЕОБРАЗОВАНИЕ

Для операции **фурье-преобразования функций** по координате r_{\perp} используем обозначения

$$\begin{aligned}\mathbf{B}(p) &\equiv \mathcal{F}[\Phi(r_{\perp})] = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(r_{\perp}) \exp[i(p, r_{\perp})] dr_{\perp} = \\ &= \iint_{-\infty}^{\infty} \Phi(x, y) \exp[i(p_x x + p_y y)] dx dy,\end{aligned}$$

где $(p, r_{\perp}) = (p_x x + p_y y)$ — скалярное произведение.

Обратная операция:

$$\begin{aligned}\Phi(r_{\perp}) &\equiv \mathcal{F}^{-1}[\mathbf{B}(p)] = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{B}(p) \exp[-i(p, r_{\perp})] dp = \\ &= \frac{1}{(2\pi)^2} \iint_{-\infty}^{\infty} \mathbf{B}(p_x, p_y) \exp[-i(p_x x + p_y y)] dp_x dp_y.\end{aligned}$$

This is Slide No. 82.

Для операций свертки вводим следующие записи:

$$(\check{f} * \check{g}) \equiv \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \check{f}(p-p') \check{g}(p') dp' = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \check{f}(p') \check{g}(p-p') dp',$$

$$(f * g) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} f(r_{\perp} - r'_{\perp}) g(r'_{\perp}) dr'_{\perp} = \int_{-\infty}^{\infty} f(r'_{\perp}) g(r_{\perp} - r'_{\perp}) dr'_{\perp}.$$

Пространственная частота $p = \{p_x, p_y\}$ принимает только действительные значения:

$$-\infty < p_x, p_y < \infty.$$

Home Page

Title Page

Contents



Page 82 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

Будем считать функции $q(r_{\perp})$, $F^{in}(r_{\perp})$, $F^0(r_{\perp})$, $F^H(r_{\perp})$ финитными, либо периодическими, либо кусочно-постоянными и **будем искать локальные решения задач (5), не интересуясь поведением решения на бесконечности.**

Это условие физически корректно: поведение решения уравнения переноса на бесконечности, вообще говоря, не влияет на решение в рассматриваемой конечной области.

Поскольку **решение** краевой задачи (5) **ищем в классе функций, допускающих существование интегрального преобразования Фурье** и, как следствие, **представимых в виде интегральной свертки**, то по существу при выполнении фурье-преобразования по координатам x, y уравнения переноса опускаются слагаемые со значениями на бесконечности при $r_{\perp} = \pm \infty$:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \left(s_{\perp}, \frac{\partial \Phi}{\partial r_{\perp}} \right) \exp[i(p, r_{\perp})] dr_{\perp} = -i(p, s_{\perp}) \mathcal{F}[\Phi](p).$$

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 83 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

Действительно, интегрируя по частям, имеем

$$\begin{aligned} & \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial \Phi}{\partial x} \exp[i(p_x x + p_y y)] dx dy = \\ & = \int_{-\infty}^{\infty} dy \left\{ \Phi \exp[i(p_x x + p_y y)] \Big|_{x=-\infty}^{x=\infty} - \right. \\ & \left. - ip_x \int_{-\infty}^{\infty} \Phi \exp[i(p_x x + p_y y)] dx \right\} = -ip_x \mathbf{B}(p_x, p_y). \end{aligned}$$

Обратная операция:

$$\frac{1}{(2\pi)_2} \int_{-\infty}^{\infty} [-i(p, s_{\perp})] \mathcal{F}[\Phi](p) \exp[-i(p, r_{\perp})] dp = \left(s_{\perp}, \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right).$$

This is Slide No. 85.

Преобразование Фурье по координате r_{\perp} выражения

$$\hat{K}\Phi \equiv \hat{D}\Phi - \hat{S}\Phi$$

приводит к комплексному уравнению с линейными операторами

$$\hat{L}(p)\mathbf{B} \equiv \hat{L}_z(p)\mathbf{B} - \hat{S}\mathbf{B},$$

где

$$\hat{L}_z(p) \equiv \hat{D}_z - i(p, s_{\perp});$$

$$(p, s_{\perp}) = p_x \sin \vartheta \cos \varphi + p_y \sin \vartheta \sin \varphi.$$

БАЗОВЫЕ МОДЕЛИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

С помощью **фурье-преобразования по горизонтальной координате** r_{\perp} :

$$g(p) = \mathcal{F}[f(r_{\perp})] \equiv \int_{-\infty}^{\infty} f(r_{\perp}) \exp[i(p, r_{\perp})] dr_{\perp}, \quad B \equiv \mathcal{F}[\Phi], \quad (21)$$

где **пространственная частота** $p = (p_x, p_y)$ принимает **только действительные значения** ($-\infty < p_x, p_y < \infty$), в классе обобщенных функций медленного роста ПКЗ (9) приводится к ПКЗ для **параметрического одномерного комплексного уравнения переноса (КПКЗ)**:

$$\hat{L}(p)B = 0, \quad B|_t = 0, \quad B|_b = g(s^h; p, s) \quad (22)$$

с линейным оператором

$$\hat{L}(p) \equiv \hat{D}_z - i(p, s_{\perp}) - \hat{S}.$$

Home Page

Title Page

Contents

Page 86 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 87.

или, для наглядности, подробнее

$$\hat{L}(p)B \equiv \mu \frac{\partial B}{\partial z} +$$

$$+ [\sigma(z) - i(p_x \sin \vartheta \cos \varphi + p_y \sin \vartheta \sin \varphi)] B(p_x, p_y; z, \vartheta, \varphi) -$$

$$- \sigma_s(z) \int_0^{2\pi} d\varphi' \int_0^\pi \gamma(z, \vartheta, \varphi; \vartheta', \varphi') B(p_x, p_y; z, \vartheta', \varphi') \sin \vartheta' d\vartheta'.$$

Решение комплексной первой краевой задачи (22) представляется как линейный функционал

$$B(s^h; z, p, s) = \hat{\Pi}(g) \equiv (\Psi, g) \equiv \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega^-} \Psi(s_h^-; z, p, s) g(s^h; p, s_h^-) ds_h^- \quad (23)$$

Ядром (23) является пространственно-частотная характеристика

$$\Psi(s_h^-; z, p, s) = \mathcal{F}[\Theta(s_h^-; z, r_\perp, s)]$$

с параметрами $s_h^- \in \Omega^-$ и p — решение КПКЗ

$$\hat{L}(p)\Psi = 0, \quad \Psi|_t = 0, \quad \Psi|_b = g_\delta(s_h^-; p, s), \quad (24)$$

которая получается в результате применения фурье-преобразования (21) к ПКЗ (11);

$$g_\delta(s_h^-; p, s) \equiv \mathcal{F}[f_\delta(s_h^-; r_\perp, s)] = \delta(s - s_h^-).$$

Кроме модели ПЧХ Ψ (24) для случая горизонтально-неоднородного и анизотропного источника в ПКЗ (9), **в набор базовых моделей** входит ПЧХ

$$\Psi_r(z, p, s) \equiv \mathcal{F}[\Theta_r(z, r_\perp, s)] = \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega^-} \Psi(s_h^-; z, p, s) ds_h^-,$$

которая удовлетворяет КПКЗ

$$\hat{L}(p)\Psi_r = 0, \quad \Psi_r|_t = 0, \quad \Psi_r|_b = 1, \quad (25)$$

когда **источник** в ПКЗ (9) **изотропный и горизонтально-неоднородный** и

$$g_r(p) = g(p) = \mathcal{F}[f(r_\perp)].$$

Решение задачи (22) в этом случае определяется через классическое линейное соотношение

$$B_r(z, p, s) = \mathcal{F}[\Phi(z, r_\perp, s)] = \hat{\Pi}_r(g_r) \equiv (\Psi_r, g_r) \equiv \Psi_r(z, p, s)g_r(p).$$

This is Slide No. 90.

ПЕРЕДАТОЧНЫЙ ОПЕРАТОР

На основе общей теории регулярных возмущений с помощью параметрического ряда

$$\Phi_q(s^h; z, r_\perp, s) = \sum_{k=1}^{\infty} \varepsilon^k \Phi_k$$

ОКЗ (8) сводится к системе рекуррентных ПКЗ типа (9)

$$\hat{K}\Phi_k = 0, \quad \Phi_k|_t = 0, \quad \Phi_k|_b = E_k \quad (26)$$

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

This is Slide No. 91.

Вводится операция, описывающая взаимодействие излучения с границей через функцию влияния Θ :

$$\begin{aligned} [\hat{G}f](s^h; h, r_{\perp}, s) &\equiv \hat{R}(\Theta, f) = \int_{\Omega^+} q(r_{\perp}, s, s^+) (\Theta, f) ds^+ = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega^-} ds^{-'} \int_{-\infty}^{\infty} f(s^h; r'_{\perp}, s^{-'}) dr'_{\perp} \times \\ &\times \int_{\Omega^+} q(r_{\perp}, s, s^+) \Theta(s^{-'}; h, r_{\perp} - r'_{\perp}, s^+) ds^+. \end{aligned}$$

Решения системы ПКЗ (26) находятся как линейные функционалы:

$$\Phi_1(z, r_{\perp}, s) = (\Theta, E),$$

$$\Phi_k(z, r_{\perp}, s) = (\Theta, \hat{R}\Phi_{k-1}) = (\Theta, \hat{G}^{k-1}E).$$

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 91 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 92.

Асимптотически точное решение ОКЗ (8) получается в форме линейного функционала (10) — (оптического) передаточного оператора

$$\Phi_q = (\Theta, Y), \quad (27)$$

где "сценарий" (оптического) изображения или яркость подстилающей поверхности

$$Y \equiv \sum_{k=0}^{\infty} \hat{G}^k E = \sum_{k=0}^{\infty} \hat{R}\Phi_k, \quad \hat{R}\Phi_0 = E, \quad (28)$$

есть **сумма ряда Неймана по кратности отражения излучения от подложки с учетом многократного рассеяния в среде через функцию влияния.**

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 92 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit



This is Slide No. 93.

Имеет место **мажорантная оценка**:

$$\|Y\| \leq \sum_{k=0}^{\infty} \|\hat{R}\Phi_k\| \leq \|E\| \sum_{k=0}^{\infty} (q_* c_*)^k = \frac{\|E\|}{1 - q_* c_*} \leq \frac{q_* \|\Phi_a\|}{1 - q_* c_*},$$

$$\|\Phi_k\| = \text{vrai sup}_{z, r_{\perp}, s} |\Phi_k| \leq q_*^{k-1} c_*^k \|E\|,$$

$$\|\hat{R}(1)\| \leq \text{vrai sup}_{r_{\perp}, s^-} \int_{\Omega^+} |q(r_{\perp}, s^-, s^+)| ds^+ = q_* \leq 1,$$

$$\hat{P}(1) = W(z, s), \quad \|\hat{P}(1)\| \leq \sup_{z, s} W = c_* \leq 1.$$

This is Slide No. 94.

"Сценарий" удовлетворяет уравнению Фредгольма II-рода

$$Y = \hat{R}(\Theta, Y) + E, \quad (29)$$

которое называют уравнением "приземной фотографии".

В общем случае $\hat{R}(\Theta, Y) \neq (\hat{R}\Theta, Y)$.

Суммарное излучение САП и "космическая фотография" описываются линейным функционалом

$$\Phi = \Phi_a + (\Theta, Y). \quad (30)$$

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 94 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit



This is Slide No. 95.

В терминах фурье-образов (21) компоненты ряда возмущений

$$B_q(s^h; z, p, s) \equiv \mathcal{F}[\Phi_q(s^h; z, r_\perp, s)] = \sum_{k=1}^{\infty} \varepsilon^k B_k, \quad B_k \equiv \mathcal{F}[\Phi_k], \quad (31)$$

удовлетворяют системе рекуррентных КПКЗ типа (22) ($V \equiv \mathcal{F}[E]$):

$$k = 1 : \quad \hat{L}(p)B_1 = 0, \quad B_1|_t = 0, \quad B_1|_b = V(p, s);$$

$$k \geq 2 : \quad \hat{L}(p)B_k = 0, \quad B_k|_t = 0, \quad B_k|_b = [\hat{T}B_{k-1}] (h, p, s).$$

Фурье-образ оператора отражения (6) определяется по формуле ($v \equiv \mathcal{F}[q]$)

$$[\hat{T}B](h, p, s) \equiv \mathcal{F}[\hat{R}\Phi] = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} dp' \int_{\Omega^+} v(p-p', s, s^+) B(h, p', s^+) ds^+,$$

Операция взаимодействия излучения с границей вводится через ПЧХ:

$$\begin{aligned} [\hat{Q}g](s^h; h, p, s) &\equiv \mathcal{F}[\hat{G}f] = \hat{T}(\Psi, g) = \\ &= \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} dp' \int_{\Omega^+} v(p-p', s, s^+) (\Psi, g) ds^+ = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega^-} ds^{-'} \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} g(s^h; p', s^{-'}) dp' \times \\ &\quad \times \int_{\Omega^+} v(p-p', s, s^+) \Psi(s^{-'}; h, p', s^+) ds^+. \end{aligned}$$

This is Slide No. 97.

Члены ряда (31) находятся как линейные функционалы (23):

$$B_1 = (\Psi, V), \quad B_k = (\Psi, \hat{T}B_{k-1}) = (\Psi, \hat{Q}^{k-1}V).$$

Сумма ряда (31) — **фурье-образ асимптотически точного решения** ОКЗ (8) в классе функций медленного роста есть линейный функционал (23)

$$B_q = (\Psi, Z); \quad \Phi_q = \mathcal{F}^{-1}[B_q] = \mathcal{F}^{-1}[(\Psi, Z)]. \quad (32)$$

Фурье-образ "сценария" суть сумма ряда Неймана по кратности отражения излучения от подстилающей поверхности (в терминах фурье-образов):

$$\mathcal{F}[Y] = Z \equiv \sum_{k=0}^{\infty} \hat{Q}^k V = \sum_{k=0}^{\infty} \hat{T}B_k. \quad (33)$$

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 97 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 98.

В итоге **исходная ОКЗ (8)** сведена к **линейному функционалу** и сформулирован **линейно-системный подход** к решению проблем дистанционного зондирования земной поверхности.

При этом четко определено проявление **нелинейных эффектов** из-за многократного переотражения излучения от поверхности в формировании "сценария которые описываются **через линейные передаточные характеристики** изолированного слоя атмосферы.

Функционал (30) — это математическая модель переноса излучения в САП, адекватная исходной ОКЗ (8) при разных структурах источника E и типах подстилающей поверхности не зависимо от размерности САП (одно-, дву- или трехмерной).

Home Page

Title Page

Contents



Page 98 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 99.

Разные схемы реализации передаточного оператора и структурирования суммарного поля радиации САП (30) отличаются либо **способами представления "сценария"** (28) или (33) либо **методами решения** уравнения (29).

В рамках строгой теории ОПО метод ФВ и ПЧХ **обобщен** на задачи с учетом **поляризации** и для **двухсредных систем** переноса (атмосфера-океан, атмосфера-облачность, атмосфера-гидрометеоры, атмосфера-растительный покров) с внутренней границей раздела, а также **горизонтально-неоднородной атмосферы** и **гетерогенных систем** с разными радиационными режимами в разных подобластях.

Метод функций влияния обобщен и развит для задач со сферической геометрией.

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 99 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 100.

Фундаментальные результаты в теории передаточного оператора.

- **Во-первых**, с позиции единых методических основ сформулирован ОПО для всего разнообразия угловых и пространственных структур и характеристик отражения.
- **Во-вторых**, все нелинейные приближения представлены через линейные ФВ и ПЧХ.
- **В-третьих**, определен полный набор базовых моделей ФВ и ПЧХ, необходимый и достаточный для описания передаточных характеристик системы переноса излучения.
- **В-четвертых**, ОПО построен строго математически и физически корректно в рамках линейно-системного подхода.
- **В-пятых**, изложенная теория ОПО описывает многие известные зарубежные и отечественные теоретические результаты в разных приложениях на основе единого математического аппарата.

Home Page

Title Page

Contents



Page 100 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 101.

Метод ФВ и ПЧХ — это универсальный математически строгий подход к решению задач из широкой области приложений.

Интерпретация методов, разрабатываемых разными авторами, как реализации метода ФВ и ПЧХ, позволяет получить единые базовые формулы для широкого класса прикладных задач.

Для таких задач методы, приемы, подходы, введенные в рассмотрение различными авторами, по-существу оказались либо эквивалентными и отличались только схемами реализации, либо близкими.

Поэтому нецелесообразно персонализировать эти методы, ставшие уже почти классическими, а за деталями алгоритмов отошлем читателя к оригинальным источникам, библиография которых насчитывает более 800 публикаций.

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 101 of 173

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 102.

В разных областях приложений сложилась своя частная, специальная, прикладная терминология, что затрудняет установление общности между ними и ограничивает возможности использования наиболее продвинутых результатов из смежных областей.

На современном этапе, когда теоретико-расчетные исследования вследствие вседоступности ЭВМ приняли массовый характер, необходимо при манипулировании математическими объектами пользоваться универсальными, обобщенными математическими терминами, понятиями.

В эмпирических теоретико-расчетных исследованиях с привлечением компьютеров почти каждый исследователь в одной и той же предметной области вводит свою терминологию, создавая ложное впечатление оригинальности методики.

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 102 of 173

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 103.

Термин ФВ объединяет все типы сингулярности и диффузности источника и все четыре типа поверхностей.

Термин ПЧХ — это двумерные фурье-спектры в горизонтальной плоскости, в том числе от ФВ.

Общность схематически описанной методики состоит в том, что она распространяется на разные диапазоны и условия дистанционного зондирования. Важно, чтобы "сценарий" и атмосферный канал рассматривались в рамках теории переноса излучения или "квази-оптического" приближения.

Поэтому предпочтительнее избегать частого употребления термина "оптический который сужает область применимости. Можно использовать наиболее общий термин "передаточный оператор".

Home Page

Title Page

Contents



Page 103 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

РЕШЕНИЕ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ ПЕРЕНОСА ДЛЯ СЛОЯ С ВНУТРЕННЕЙ ГРАНИЦЕЙ РАЗДЕЛА ДВУХ СРЕД

Методом функций влияния и пространственно-частотных характеристик в классе обобщенных функций медленного роста определяется асимптотически точное решение краевой задачи теории переноса:

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{K}\Phi = 0, \quad \Phi|_t = 0, \quad \Phi|_b = 0, \\ \Phi|_{d1} = \varepsilon(\hat{R}_1\Phi + \hat{T}_{21}\Phi + E_1), \\ \Phi|_{d2} = \varepsilon(\hat{R}_2\Phi + \hat{T}_{12}\Phi + E_2) \end{array} \right. \quad (34)$$

с заданной освещенностью границы раздела $\mathbf{E} = \{E_1, E_2\}$.

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 104 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 105.

Рассматривается рассеивающий и поглощающий плоский слой, неограниченный в горизонтальном направлении ($-\infty < x, y < \infty$, $r_{\perp} = (x, y)$) и конечный по высоте ($0 \leq z \leq H$). На уровне $z = h$ внутри слоя проходит горизонтально-неоднородная граница раздела двух сред, пропускающая и отражающая излучение.

Граничные условия записываем с помощью следующих множеств:

$$\begin{aligned}t &= \{(z, r_{\perp}, s) : z = 0, s \in \Omega^+\}; \\b &= \{(z, r_{\perp}, s) : z = H, s \in \Omega^-\}; \\d2 &= \{(z, r_{\perp}, s) : z = h, s \in \Omega^+\}; \\d1 &= \{(z, r_{\perp}, s) : z = h, s \in \Omega^-\}.\end{aligned}$$

Home Page

Title Page

Contents



Page 105 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit



This is Slide No. 106.

Прохождение излучения через границу раздела описывается операторами отражения \hat{R}_1 , \hat{R}_2 и пропускания \hat{T}_{12} , \hat{T}_{21} , где индекс 1 относится к слою с $z \in [0, h]$, а индекс 2 — к слою с $z \in [h, H]$:

$$\left[\hat{R}_1 \Phi \right] (h, r_{\perp}, s) = \int_{\Omega^+} \Phi(h, r_{\perp}, s^+) q_1(r_{\perp}, s, s^+) ds^+, \quad s \in \Omega^-; \quad (35)$$

$$\left[\hat{R}_2 \Phi \right] (h, r_{\perp}, s) = \int_{\Omega^-} \Phi(h, r_{\perp}, s^-) q_2(r_{\perp}, s, s^-) ds^-, \quad s \in \Omega^+; \quad (36)$$



This is Slide No. 107.

$$\left[\hat{T}_{12} \Phi \right] (h, r_{\perp}, s) = \int_{\Omega^+} \Phi(h, r_{\perp}, s^+) t_{12}(r_{\perp}, s, s^+) ds^+, \quad s \in \Omega^+; \quad (37)$$

$$\left[\hat{T}_{21} \Phi \right] (h, r_{\perp}, s) = \int_{\Omega^-} \Phi(h, r_{\perp}, s^-) t_{21}(r_{\perp}, s, s^-) ds^-, \quad s \in \Omega^-. \quad (38)$$

Операторы \hat{R}_1 , \hat{R}_2 , \hat{T}_{12} , \hat{T}_{21} считаются равномерно ограниченными.

Вектор функций влияния и матричный передаточный оператор

Для решения задачи (34) вводим параметрический ряд регулярных возмущений

$$\Phi(z, r_{\perp}, s) = \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n \Phi_n(z, r_{\perp}, s)$$

с параметром $0 < \varepsilon \leq 1$, фиксирующим акт прохождения излучения через границу раздела, и векторами

$$\Phi_n = \{\Phi_n^1, \Phi_n^2\},$$

компоненты которых удовлетворяют системе рекуррентных первых краевых задач ($n \geq 2$) для 1-ой среды с $z \in [0, h]$:

$$\hat{K}\Phi_n^1 = 0, \quad \Phi_n^1|_t = 0, \quad \Phi_n^1|_{d1} = \hat{R}_1\Phi_{n-1}^1 + \hat{T}_{21}\Phi_{n-1}^2$$

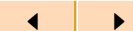
и для 2-ой среды с $z \in [h, H]$:

$$\hat{K}\Phi_n^2 = 0, \quad \Phi_n^2|_b = 0, \quad \Phi_n^2|_{d2} = \hat{R}_2\Phi_{n-1}^2 + \hat{T}_{12}\Phi_{n-1}^1.$$

Home Page

Title Page

Contents



Page 108 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

Краевые задачи для линейного приближения ($n = 1$):

$$\hat{K}\Phi_1^1 = 0, \quad \Phi_1^1|_t = 0, \quad \Phi_1^1|_{d1} = E_1; \quad (39)$$

$$\hat{K}\Phi_1^2 = 0, \quad \Phi_1^2|_b = 0, \quad \Phi_1^2|_{d2} = E_2 \quad (40)$$

разрешимы в виде линейных функционалов ($s \in \Omega$):

$$\Phi_1^1(z, r_\perp, s) = (\Theta_1, E_1) =$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega^-} ds^- \int_{-\infty}^{\infty} \Theta_1(s^-; z, r_\perp - r'_\perp, s) E_1(h, r'_\perp, s^-) dr'_\perp, \quad z \in [0, h]; \quad (41)$$

$$\Phi_1^2(z, r_\perp, s) = (\Theta_2, E_2) =$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega^+} ds^+ \int_{-\infty}^{\infty} \Theta_2(s^+; z, r_\perp - r'_\perp, s) E_2(h, r'_\perp, s^+) dr'_\perp, \quad z \in [h, H]. \quad (42)$$

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 109 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 110.

Ядрами функционалов (41), (42) являются ФВ $\Theta_1(s^-; z, r_\perp, s)$ с параметром $s^- \in \Omega^-$ — решение первой краевой задачи для 1-ой среды:

$$\hat{K}\Theta_1 = 0, \quad \Theta_1|_t = 0, \quad \Theta_1|_{d1} = f_\delta(s^-; r_\perp, s) \quad (43)$$

и ФВ $\Theta_2(s^+; z, r_\perp, s)$ с параметром $s^+ \in \Omega^+$ — решение первой краевой задачи для 2-ой среды:

$$\hat{K}\Theta_2 = 0, \quad \Theta_2|_b = 0, \quad \Theta_2|_{d2} = f_\delta(s^+; r_\perp, s) \quad (44)$$

с источниками

$$f_\delta(s^-; r_\perp, s) = \delta(r_\perp)\delta(s - s^-),$$

$$f_\delta(s^+; r_\perp, s) = \delta(r_\perp)\delta(s - s^+).$$

This is Slide No. 111.

С помощью вектора функций влияния $\Theta = \{\Theta_1, \Theta_2\}$ вводим матричную операцию, описывающую один акт взаимодействия излучения с границей раздела и учитывающую многократное рассеяние в обеих средах ($\mathbf{f} = \{f_1, f_2\}$):

$$\left[\hat{\mathcal{P}}\mathbf{f} \right] (h, r_{\perp}, s) \equiv \hat{P}(\Theta, \mathbf{f}) = \begin{bmatrix} \hat{R}_1(\Theta_1, f_1) + \hat{T}_{21}(\Theta_2, f_2) \\ \hat{T}_{12}(\Theta_1, f_1) + \hat{R}_2(\Theta_2, f_2) \end{bmatrix}, \quad (45)$$

где векторный функционал $(\Theta, \mathbf{f}) = \{(\Theta_1, f_1), (\Theta_2, f_2)\}$; матрица операторов

$$\hat{P} \equiv \begin{bmatrix} \hat{R}_1 & \hat{T}_{21} \\ \hat{T}_{12} & \hat{R}_2 \end{bmatrix}.$$

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 111 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

Можно показать, что два последовательных n -приближения связаны рекуррентным соотношением

$$\Phi_n = (\Theta, \hat{P}\Phi_{n-1})$$

и для $n \geq 1$ имеет место представление

$$\Phi_n = (\Theta, \hat{\mathcal{P}}^{n-1}\mathbf{E}).$$

В результате получаем асимптотически точное решение

$$\Phi = \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_n = (\Theta, \hat{Z}\mathbf{E}) = (\Theta, \mathbf{Y}); \quad (46)$$

$$\mathbf{Y} \equiv \hat{Z}\mathbf{E} \equiv \sum_{n=0}^{\infty} \hat{\mathcal{P}}^n \mathbf{E} \quad (47)$$

— сумма ряда Неймана по кратности прохождения излучения через границу раздела с учетом вклада многократного рассеяния в обеих средах.

Home Page

Title Page

Contents



Page 112 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 113.

Вектор пространственно-частотных характеристик

Решение краевой задачи (34) в классе обобщенных функций медленного роста с помощью фурье-преобразования по координате r_{\perp} находим в виде параметрического ряда возмущений

$$\mathbf{B}(z, p, s) = \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n \mathbf{B}_n(z, p, s), \quad (48)$$

$\mathbf{B}_n(z, p, s) = \mathcal{F}[\Phi_n(z, r_{\perp}, s)] = \{B_n^1(z, p, s), B_n^2(z, p, s)\};$

$B_n^1 = \mathcal{F}[\Phi_n^1], B_n^2 = \mathcal{F}[\Phi_n^2]$ — комплексные функции.

This is Slide No. 114.

Применяя преобразование Фурье к краевым задачам для трехмерного уравнения переноса, приходим к краевым задачам для параметрического одномерного уравнения переноса:

$$\hat{L}(p)B_1^1 = 0, \quad B_1^1|_t = 0, \quad B_1^1|_{d1} = W_1; \quad (49)$$

$$\hat{L}(p)B_1^2 = 0, \quad B_1^2|_b = 0, \quad B_1^2|_{d2} = W_2 \quad (50)$$

с интегродифференциальным оператором $\hat{L}(p)$, содержащим комплекснозначный, анизотропный коэффициент экстинкции $\sigma_{tot}(z) - i(p, s_\perp)$.

Двухкомпонентный вектор функции источника

$$\mathbf{W} = \{W_1, W_2\}, \quad \text{где } W_1 \equiv \mathcal{F}[E_1], W_2 \equiv \mathcal{F}[E_2].$$

Home Page

Title Page

Contents



Page 114 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 115.

Решения краевых задач (49), (50) получаются как линейные функционалы ($s \in \Omega$):

$$\begin{aligned} B_1^1(z, p, s) &= (\Psi_1, W_1) = \mathcal{F}[(\Theta_1, E_1)] = & (51) \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega^-} \Psi_1(s^-; z, p, s) W_1(h, p, s^-) ds^-, \quad z \in [0, h]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_1^2(z, p, s) &= (\Psi_2, W_2) = \mathcal{F}[(\Theta_2, E_2)] = & (52) \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega^+} \Psi_2(s^+; z, p, s) W_2(h, p, s^+) ds^+, \quad z \in [h, H]. \end{aligned}$$

Векторный линейный функционал содержит две компоненты:

$$(\Psi, \mathbf{W}) = \{(\Psi_1, W_1), (\Psi_2, W_2)\}, \quad \Psi = \{\Psi_1, \Psi_2\}.$$

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 115 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

Ядрами функционалов (51), (52) являются пространственно-частотные характеристики — образы Фурье функций влияния обеих сред:

$$\Psi_1(s^-; z, p, s) = \mathcal{F}[\Theta_1(s^-; z, r_\perp, s)]; \quad (53)$$

$$\Psi_2(s^+; z, p, s) = \mathcal{F}[\Theta_2(s^+; z, r_\perp, s)], \quad (54)$$

которые удовлетворяют краевым задачам:

$$\hat{L}(p)\Psi_1 = 0, \quad \Psi_1|_t = 0, \quad \Psi_1|_{d1} = g_\delta(s^-; p, s); \quad (55)$$

$$\hat{L}(p)\Psi_2 = 0, \quad \Psi_2|_b = 0, \quad \Psi_2|_{d2} = g_\delta(s^+; p, s) \quad (56)$$

с источниками

$$g_\delta(s^-; p, s) = \mathcal{F}[f_\delta(s^-; r_\perp, s)] = \delta(s - s^-),$$

$$g_\delta(s^+; p, s) = \mathcal{F}[f_\delta(s^+; r_\perp, s)] = \delta(s - s^+).$$

This is Slide No. 117.

Взаимодействие излучения с границей раздела в фурье-образом описываем векторным функционалом, ядрами которого являются компоненты вектора ПЧХ:

$$\begin{aligned} \left[\hat{Q}\mathbf{g} \right] (h, p, s) &\equiv \mathcal{F}[\hat{\mathcal{P}}\mathbf{f}] = \hat{G}(\Psi, \mathbf{g}) = \\ &= \begin{bmatrix} \hat{\mathcal{R}}_1(\Psi_1, g_1) + \hat{\mathcal{T}}_{21}(\Psi_2, g_2) \\ \hat{\mathcal{T}}_{12}(\Psi_1, g_1) + \hat{\mathcal{R}}_2(\Psi_2, g_2) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (57)$$

где $\mathbf{g} = \{g_1, g_2\}$, $g_1 = \mathcal{F}[f_1]$, $g_2 = \mathcal{F}[f_2]$; матрица операторов, описывающих прохождение излучения через границу раздела:

$$\hat{G} \equiv \begin{bmatrix} \hat{\mathcal{R}}_1 & \hat{\mathcal{T}}_{21} \\ \hat{\mathcal{T}}_{12} & \hat{\mathcal{R}}_2 \end{bmatrix}.$$

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 117 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

Между двумя последовательными n -приближениями имеет место рекуррентная связь

$$\mathbf{B}_n = (\Psi, \hat{G}\mathbf{B}_{n-1})$$

и для $n \geq 1$ справедливо представление

$$\mathbf{B}_n = (\Psi, \hat{Q}^{n-1}\mathbf{W}),$$

так что асимптотически точное решение есть функционал

$$\mathbf{B} = \sum_{n=1}^{\infty} \mathbf{B}_n = (\Psi, \hat{Y}\mathbf{W}) = (\Psi, \mathbf{U}). \quad (58)$$

Фурье-образ "сценария"

$$\mathbf{U} \equiv \hat{Y}\mathbf{W} \equiv \sum_{n=0}^{\infty} \hat{Q}^n \mathbf{W} \quad (59)$$

— сумма ряда Неймана (в фурье-образах) по кратности прохождения излучения через границу раздела с учетом многократного рассеяния в обеих средах через ПЧХ.

[Home Page](#)
[Title Page](#)
[Contents](#)

Page 118 of 173

[Go Back](#)
[Full Screen](#)
[Close](#)
[Quit](#)

This is Slide No. 119.

Представление (58) есть передаточный оператор системы переноса, устанавливающий явную связь фурье-образа регистрируемого излучения с фурье-образом "сценария" (59) на границе раздела двух сред.

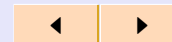
Выражение "сценария" (59) с помощью ПЧХ описывает явную связь с характеристиками отражения и пропускания, а также освещенности границы раздела.

Пространственно-частотные характеристики инвариантны относительно условий освещения и свойств границы раздела.

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 119 of 173

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 120.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕНОСА ПОЛЯРИЗОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В SP -представлении (Стокса-Пуанкаре) компоненты вектора-столбца $\Phi = (I, Q, U, V)^T$ имеют нормировку интенсивности:

$$Q = Ip \cos 2\chi \cos 2\beta, \quad U = Ip \sin 2\chi \cos 2\beta, \quad V = Ip \sin 2\beta,$$

χ — азимут плоскости поляризации, β — степень эллиптичности, $0 \leq p \leq 1$ — степень поляризации,

This is Slide No. 121.

и обладают следующими важными **свойствами**:

$$I \geq 0, \quad I^2 \geq Q^2 + U^2 + V^2, \quad |Q| + |U| + |V| \leq \sqrt{3}I;$$

в функциональном пространстве $L(x)$, $x \in X$, X — фазовое пространство,

$$\|\Phi\|_{L^{(4)}} = \sum_{m=1}^M \|\Phi_m\|_L \leq (1 + \sqrt{3})\|I\|_L,$$

$$\|I\|_L = \int_X |I(x)| dx = \int_X I(x) dx.$$

Вектор Стокса находим как решение общей векторной краевой задачи теории переноса ($\hat{R} \neq 0$)

$$\hat{K}\Phi = \mathbf{F}, \quad \Phi|_t = \mathbf{F}^0, \quad \Phi|_b = \varepsilon\hat{R}\Phi + \mathbf{F}^H \quad (60)$$

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 (функция источника)

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

равномерно ограниченный оператор отражения

$$[\hat{R}\Phi](H, r_\perp, s) \equiv \int_{\Omega^+} \hat{q}(r_\perp, s, s^+)\Phi(H, r_\perp, s^+) ds^+; \quad (61)$$

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

Краевая задача (60)–(61) линейная и ее решение можно искать в виде суперпозиции

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_R.$$

Фоновое излучение Φ_0 определяется как решение первой векторной краевой задачи теории переноса с "вакуумными" условиями для слоя с прозрачными или абсолютно черными (неотражающими) границами ($\hat{R} \equiv 0$):

$$\hat{K}\Phi_0 = \mathbf{F}, \quad \Phi_0|_t = \mathbf{F}^0, \quad \Phi_0|_b = \mathbf{F}^H. \quad (62)$$

Задача для подсветки Φ_R , обусловленной влиянием отражающей подстилающей поверхности, — **общая векторная краевая задача** ($\hat{R} \neq 0$, $\mathbf{E} \neq 0$)

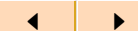
$$\hat{K}\Phi_R = 0, \quad \Phi_R|_t = 0, \quad \Phi_R|_b = \varepsilon\hat{R}\Phi_R + \varepsilon\mathbf{E}, \quad (63)$$

где **источник $\mathbf{E}(r_\perp, s) \equiv \hat{R}\Phi_0$** — яркость (освещенность, облученность) подложки, создаваемая фоновым излучением, с учетом состояния поляризации.

Home Page

Title Page

Contents



Page 123 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

Функции влияния векторной краевой задачи теории переноса

Рассмотрим первую векторную краевую задачу теории переноса

$$\hat{K}\Phi = 0, \quad \Phi|_t = 0, \quad \Phi|_b = \mathbf{f}(s^H; r_\perp, s). \quad (64)$$

Различные возможные состояния поляризации плоской поперечно-электрической волны в общем случае представляются вектором $\Phi(s^H; z, r_\perp, s)$, составленным из четырех действительных величин Φ_m , $m = 1, \dots, M$, $M = 4$, которые являются коэффициентами разложения вектора Φ по ортам \mathbf{i}_m некоторой системы координат:

$$\Phi = \mathbf{i}_1\Phi_1 + \mathbf{i}_2\Phi_2 + \mathbf{i}_3\Phi_3 + \mathbf{i}_4\Phi_4,$$

которая зависит от способа описания поляризованного излучения.

This is Slide No. 125.

В общем случае, когда вектор Стокса источника \mathbf{f} содержит несовпадающие анизотропные горизонтально-неоднородные компоненты $f_n(s^H; r_\perp, s)$, **решение** задачи (64) можно представить **в виде суммы**

$$\Phi(r, s) = \sum_{n=1}^N \Phi_n(r, s),$$

слагаемые которой являются **решением набора задач**

$$\hat{K}\Phi_n = 0, \quad \Phi_n|_t = 0, \quad \Phi_n|_b = \mathbf{t}_n f_n \quad (65)$$

с векторами

$$\mathbf{t}_n = \{\delta_{mn}\}, \quad m = 1, \dots, M, \quad n = 1, \dots, N,$$

где δ_{mn} — символ Кронекера.

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 125 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

По аналогии со скалярной задачей теории переноса, **решение задачи (65)** для фиксированного n получается **в виде векторного линейного функционала**:

$$\begin{aligned}\Phi_n &= (\Theta_n, f_n) = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega^-} ds^- \int_{-\infty}^{\infty} \Theta_n(s^-; z, r_{\perp} - r'_{\perp}, s) f_n(s^H; r'_{\perp}, s^-) dr'_{\perp}.\end{aligned}$$

Векторные функции влияния $\Theta_n = \{\Theta_{mn}\}$, $n = 1, \dots, N$, компонентами которых являются параметры Стокса $\Theta_{mn}(s^-; z, r_{\perp}, s)$, $m = 1, \dots, M$, находятся **как решение набора задач**

$$\begin{aligned}\hat{K}\Theta_n &= 0, \quad \Theta_n|_t = 0, \quad \Theta_n|_b = \mathbf{t}_n f_{\delta}, \\ f_{\delta}(s^-; r_{\perp}, s) &= \delta(r_{\perp})\delta(s - s^-),\end{aligned}$$

с параметром $s^- \in \Omega^-$.



This is Slide No. 127.

**Компоненты параметров Стокса $\Phi_n = \{\Phi_{mn}(z, r_\perp, s)\}$
вычисляются как скалярные функционалы:**

$$\begin{aligned} \Phi_{mn} &= [\hat{\mathcal{P}}(\mathbf{f})]_{mn} \equiv (\Theta_{mn}, f_n) \equiv \\ &\equiv \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega^-} ds^- \int_{-\infty}^{\infty} \Theta_{mn}(s^-; z, r_\perp - r'_\perp, s) f_n(s^H; r'_\perp, s^-) dr'_\perp. \end{aligned} \quad (66)$$

This is Slide No. 128.

Введем **тензор функций влияния**, определенный N векторами Стокса Θ_n :

$$\hat{\Pi} = \begin{bmatrix} \Theta_{11} & \dots & \Theta_{1n} & \dots & \Theta_{1N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Theta_{m1} & \dots & \Theta_{mn} & \dots & \Theta_{mN} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Theta_{M1} & \dots & \Theta_{Mn} & \dots & \Theta_{MN} \end{bmatrix}. \quad (67)$$

Первый индекс $m = 1, \dots, M$, $M \leq 4$, компоненты Θ_{mn} тензора $\hat{\Pi}$ отвечает **порядковому номеру параметра Стокса** Θ_n , а **второй индекс** $n = 1, \dots, N$, $N \leq 4$, соответствует **индексу вектора источника** \mathbf{t}_n в наборе задач (65), описывающем модель расчета Θ_n , а, следовательно, компонент тензора $\hat{\Pi}$ (67).

Home Page

Title Page

Contents



Page 128 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

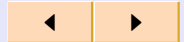
This is Slide No. 129.

Введем линейный векторный функционал

$$\Phi = \hat{\mathcal{P}}(\mathbf{f}) \equiv (\hat{\Pi}, \mathbf{f}) = \{\Phi_m\}, \quad m = 1, \dots, M, \quad M \leq 4. \quad (68)$$



Компоненты решения задачи (64), определяемые через скалярное произведение



$$\Phi_m = [\hat{\mathcal{P}}(\mathbf{f})]_m \equiv \sum_{n=1}^N (\Theta_{mn}, f_n),$$

являются линейной комбинацией линейных скалярных функционалов (66).

This is Slide No. 130.

Если источник $f_n(r_\perp)$ — изотропный и горизонтально-неоднородный, то решение задачи (65) находится через векторные линейные функционалы

$$\begin{aligned}\Phi_n(z, r_\perp, s) &= [\hat{\mathcal{P}}_r(\mathbf{f})]_n \equiv (\Theta_{rn}, f_n) = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \Theta_{rn}(z, r_\perp - r'_\perp, s) f_n(r'_\perp) dr'_\perp,\end{aligned}$$

ядра которых — векторные функции влияния

$$\Theta_{rn}(z, r_\perp, s) = \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega^-} \Theta_n(s^-; z, r_\perp, s) ds^- \quad (69)$$

удовлетворяют задачам

$$\hat{K}\Theta_{rn} = 0, \quad \Theta_{rn}|_t = 0, \quad \Theta_{rn}|_b = \mathbf{t}_n\delta(r_\perp). \quad (70)$$

This is Slide No. 131.

В случае **анизотропного горизонтально-однородного источника** $f_n(s^H; s)$ решение задачи (65) находится в форме **линейного функционала**

$$\begin{aligned}\Phi_n(s^H; z, s) &= [\hat{\mathcal{P}}_z(\mathbf{f})]_n \equiv (\Theta_{zn}, f_n) = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega^-} \Theta_{zn}(s'; z, s) f_n(s^H; s') ds'\end{aligned}$$

с ядром — **векторной функцией влияния**

$$\Theta_{zn}(s^-; z, s) = \int_{-\infty}^{\infty} \Theta_n(s^-; z, r_{\perp}, s) dr_{\perp}, \quad (71)$$

которая является **решением одномерной задачи**

$$\hat{K}_z \Theta_{zn} = 0, \quad \Theta_{zn}|_t = 0, \quad \Theta_{zn}|_b = \mathbf{t}_n \delta(s - s^-); \quad s^- \in \Omega^-. \quad (72)$$

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 131 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

При анизотропном, но горизонтально-однородном источнике решение задачи (65)

$$\Phi_n(z, s) = [\hat{\mathcal{P}}_c(\mathbf{f})]_n \equiv f_n \mathbf{W}_n(z, s), \quad f_n = \text{const},$$

рассчитывается через **векторную функцию влияния**

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_n(z, s) &= \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega^-} ds^- \int_{-\infty}^{\infty} \Theta_n(s^-; z, r_{\perp}, s) dr_{\perp} = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \Theta_{rn}(z, r_{\perp}, s) dr_{\perp} = \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega^-} \Theta_{zn}(s^-; z, s) ds^-, \quad (73) \end{aligned}$$

которую называют также **векторной функцией пропускания**, отягощенной вкладом многократного рассеяния, и определяют как **решение одномерной векторной задачи**

$$\hat{K}_z \mathbf{W}_n = 0, \quad \mathbf{W}_n|_t = 0, \quad \mathbf{W}_n|_b = \mathbf{t}_n. \quad (74)$$

This is Slide No. 133.

Векторный оптический передаточный оператор

Введем параметрический ряд регулярных возмущений

$$\Phi_R = \sum_{k=1}^{\infty} \varepsilon^k \Phi_k,$$

члены которого удовлетворяют системе рекуррентных первых векторных краевых задач

$$k = 1: \hat{K}\Phi_1 = 0, \quad \Phi_1|_t = 0, \quad \Phi_1|_b = \mathbf{E}; \quad (75)$$

$$k \geq 2: \hat{K}\Phi_k = 0, \quad \Phi_k|_t = 0, \quad \Phi_k|_b = \hat{R}\Phi_{k-1}. \quad (76)$$

Home Page

Title Page

Contents



Page 133 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

Введем **операцию**, описывающую **взаимодействие излучения с границей через тензор (67)**:

$$[\hat{G}\mathbf{f}](s^-; H, r_\perp, s) \equiv \hat{R}(\hat{\Pi}, \mathbf{f}) = \int_{\Omega^+} \hat{q}(r_\perp, s, s^+)(\hat{\Pi}, \mathbf{f}) ds^+.$$

Можно показать, что **решения задач (75)–(76)** представимы **через тензор (67)** в рекуррентной форме:

$$\Phi_1 = (\hat{\Pi}, \mathbf{E}); \quad \Phi_k = (\hat{\Pi}, \hat{R}\Phi_{k-1}) = (\hat{\Pi}, \hat{G}^{k-1}\mathbf{E})$$

и **асимптотически точное решение** задачи (63) выражается явно (полагаем $\varepsilon = 1$):

$$\Phi_R = (\hat{\Pi}, \mathbf{Y}); \quad \mathbf{Y} \equiv \hat{Y}\mathbf{E} \equiv \sum_{k=0}^{\infty} \hat{G}^k \mathbf{E} = \sum_{k=0}^{\infty} \hat{R}\Phi_k \quad (77)$$

— сумма ряда Неймана по кратности отражения излучения от подложки — "сценарий" оптического изображения или яркость подстилающей поверхности.



This is Slide No. 135.

Для "сценария" $\mathbf{Y}(x)$, $x = (r_{\perp}, s^{-}) \in X^{-}$, $X^{-} = \Omega^{-} \times R^2$,
получаем **оценку**

$$\|\mathbf{Y}\| \leq \sum_{k=0}^{\infty} \|\hat{R}\Phi_k\| \leq \|\hat{R}\Phi_0\| \sum_{k=0}^{\infty} (q_*c_0)^k = \frac{\|\mathbf{E}\|}{1 - q_*c_0} \leq \frac{q_*\|\Phi_0\|}{1 - q_*c_0},$$

где c_0 — сферическое альbedo Земли, т.е. **ряд Неймана (77)**
сходится как геометрическая прогрессия.



This is Slide No. 136.

Сходимость оценивается в векторном пространстве линейных непрерывных функционалов посредством следующих норм и соотношений:

$$\|\Phi_k\| = \max_m \text{vrai} \sup_{z, r_\perp, s} |\Phi_{mk}| \leq q_*^{k-1} c_0^k \|\mathbf{E}\|,$$

$$\|\hat{R}\Phi_k\| \leq \|\hat{R}(\tilde{\mathbf{1}})\| \|\Phi_k\| \leq q_*^k c_0^k \|\mathbf{E}\|,$$

$$\|\hat{R}(\tilde{\mathbf{1}})\| \leq \max_m \text{vrai} \sup_{r_\perp, s^-} \sum_{n=1}^N \int_{\Omega^+} |q_{mn}(r_\perp, s^-, s^+)| ds^+ = q_* \leq 1,$$

$$\|\hat{\mathcal{P}}(\mathbf{f})\| \leq \|\hat{\mathcal{P}}(\tilde{\mathbf{1}})\| \|\mathbf{f}\|, \quad \|\hat{\mathcal{P}}(\tilde{\mathbf{1}})\| \leq \max_m \text{vrai} \sup_{z, s} |W_{m1}| = c_0 < 1.$$

Можно показать, что "сценарий" удовлетворяет **уравнению Фредгольма II-рода**

$$\mathbf{Y} = \hat{R}(\hat{\Pi}, \mathbf{Y}) + \mathbf{E},$$

которое называют уравнением "приземной фотографии".

В соответствии с **новой математической моделью (77)**, вместо расчета ряда по кратности отражения в полном фазовом объеме решения задачи (63), достаточно рассчитать **конечный ряд Неймана** только для "сценария" на границе с $z = H$ в фазовом объеме X^- , а **затем** искать угловые и пространственные распределения параметров Стокса — решения задачи (63) **с помощью функционала (77)**.

Функция влияния рассчитывается методом преобразования Фурье как обратное фурье-преобразование от пространственно-частотных характеристик или методом Монте-Карло.

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 137 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

Векторные пространственно-частотные характеристики

С помощью фурье-преобразования по координате r_{\perp} :

$$\mathbf{g}(p) \equiv \mathcal{F}[\mathbf{f}(r_{\perp})] = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{f}(r_{\perp}) \exp[i(p, r_{\perp})] dr_{\perp}, \quad (78)$$

где пространственная частота $p = (p_x, p_y)$ принимает только действительные значения ($-\infty < p_x, p_y < \infty$), **в классе обобщенных функций медленного роста исходная задача (64) приводится к краевой задаче для параметрического одномерного векторного комплексного уравнения переноса ($\mathbf{V} \equiv \mathcal{F}[\Phi]$):**

$$\hat{L}(p)\mathbf{V} = 0, \quad \mathbf{V}|_t = 0, \quad \mathbf{V}|_b = \mathbf{g}(s^H; p, s) \quad (79)$$

с линейным оператором

$$\hat{L}(p) \equiv \hat{D}_z - i(p, s_{\perp}) - \hat{S}; \quad (p, s_{\perp}) = p_x \sin \vartheta \cos \varphi + p_y \sin \vartheta \sin \varphi.$$

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 138 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit



This is Slide No. 139.

Решение задачи (79) представляется **в виде суперпозиции**

$$\mathbf{B}(z, p, s) = \sum_{n=1}^N \mathbf{B}_n(z, p, s),$$

компоненты которой являются **решением набора задач**

$$\hat{L}(p)\mathbf{B}_n = 0, \quad \mathbf{B}_n|_t = 0, \quad \mathbf{B}_n|_b = \mathbf{t}_n g_n, \quad (80)$$

получающегося в результате **фурье-преобразования** (78) **набора задач** (65); при этом источник определяется через

$$g_n(s^H; p, s) \equiv \mathcal{F}[f_n(s^H; r_\perp, s)].$$



This is Slide No. 140.

Решение задачи (80) для фиксированного $n = 1, \dots, N$ находится в форме векторного линейного функционала

$$\mathbf{B}_n(z, p, s) = (\Psi_n, g_n) = \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega^-} \Psi_n(s^-; z, p, s) g_n(s^H; p, s^-) ds^-,$$

ядром которого является векторная пространственно-частотная характеристика $\Psi_n = \{\Psi_{mn}(s^-; z, p, s)\}$, $n = 1, \dots, N$, $N \leq 4$, с параметрами $s^- \in \Omega^-$ и p — решение векторной задачи для комплексного уравнения переноса

$$\hat{L}(p)\Psi_n = 0, \quad \Psi_n|_t = 0, \quad \Psi_n|_b = \mathbf{t}_n g_\delta, \quad (81)$$

где

$$g_\delta(s^-; p, s) \equiv \mathcal{F}[f_\delta(s^-; r_\perp, s)] = \delta(s - s^-).$$



This is Slide No. 141.

Компоненты фурье-образа вектора Стокса $V_n = \{B_{mn}\}$ вычисляются с помощью линейного функционала аналогично скалярной задаче:

$$\begin{aligned}
 B_{mn}(z, p, s) &= [\hat{T}(\mathbf{g})]_{mn} \equiv (\Psi_{mn}, g_n) = \\
 &= \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega^-} \Psi_{mn}(s^-; z, p, s) g_n(s^H; p, s^-) ds^-. \quad (82)
 \end{aligned}$$

Если ввести **тензор**, определенный N векторами Ψ_n :

$$\hat{\Gamma} = \begin{bmatrix} \Psi_{11} & \dots & \Psi_{1n} & \dots & \Psi_{1N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Psi_{m1} & \dots & \Psi_{mn} & \dots & \Psi_{mN} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Psi_{M1} & \dots & \Psi_{Mn} & \dots & \Psi_{MN} \end{bmatrix}, \quad (83)$$

решение задачи (79) можно представить в виде **линейного векторного функционала**:

$$\mathbf{B} = \hat{T}(\mathbf{g}) \equiv (\hat{\Gamma}, \mathbf{g}) = \{B_m\}, \quad m = 1, \dots, M, \quad M \leq 4, \quad (84)$$

где **фурье-образы параметров Стокса**, определяемые через **скалярное произведение**

$$B_m = [\hat{T}(\mathbf{g})]_m \equiv \sum_{n=1}^N (\Psi_{mn}, g_n),$$

являются **линейными комбинациями линейных скалярных функционалов** (82).

This is Slide No. 143.

Кроме модели Ψ_n (81) для случая горизонтально-неоднородного анизотропного источника в задаче (64), в набор базовых моделей входит векторная пространственно-частотная характеристика

$$\Psi_{rn}(z, p, s) \equiv \mathcal{F}[\Theta_{rn}(z, r_{\perp}, s)] = \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega^-} \Psi_n(s^-; z, p, s) ds^-$$

— решение векторной краевой задачи для комплексного уравнения переноса

$$\hat{L}(p)\Psi_{rn} = 0, \quad \Psi_{rn}|_t = 0, \quad \Psi_{rn}|_b = \mathbf{t}_n,$$

когда источник в задаче (64) изотропный, но горизонтально-неоднородный. Если для фурье-образов имеют место соотношения

$$\mathbf{g} = \mathcal{F}(\mathbf{f}), \quad \mathbf{f} = \mathcal{F}^{-1}[\mathbf{g}], \quad \Psi_n = \mathcal{F}(\Theta_n), \quad \Theta_n = \mathcal{F}^{-1}[\Psi_n],$$

то для функционалов получим следующие связи :

$$\hat{T}(\mathbf{g}) = \mathcal{F}[\hat{\mathcal{P}}(\mathbf{f})], \quad \hat{\mathcal{P}}(\mathbf{f}) = \mathcal{F}^{-1}[\hat{T}(\mathbf{g})].$$

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 143 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

Фурье-представление векторного оптического передаточного оператора

В терминах фурье-образов (78) компоненты ряда

$$\mathbf{B}_R(z, p, s) \equiv \mathcal{F}[\Phi_R(z, r_\perp, s)] = \sum_{k=1}^{\infty} \varepsilon^k \mathbf{B}_k(z, p, s) \quad (85)$$

— решения системы рекуррентных комплексных задач ($\mathbf{B}_k \equiv \mathcal{F}[\Phi_k]$):

$$k = 1: \hat{L}(p)\mathbf{B}_1 = 0, \quad \mathbf{B}_1|_t = 0, \quad \mathbf{B}_1|_b = \mathbf{W}; \quad (86)$$

$$k \geq 2: \hat{L}(p)\mathbf{B}_k = 0, \quad \mathbf{B}_k|_t = 0, \quad \mathbf{B}_k|_b = \hat{T}\mathbf{B}_{k-1}, \quad (87)$$

которая получается из системы (75)–(76). При этом $\mathbf{W}(H, p, s) \equiv \mathcal{F}[\mathbf{E}(H, r_\perp, s)]$, а фурье-образ оператора отражения (61) определяется по формуле ($\hat{v} \equiv \mathcal{F}[\hat{q}]$)

$$[\hat{T}\mathbf{B}] \equiv \mathcal{F}[\hat{R}\Phi] = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} dp' \int_{\Omega^+} \hat{v}(p-p', s, s^+) \mathbf{B}(H, p', s^+) ds^+.$$

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 144 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 145.

Введем **операцию**, описывающую **взаимодействие излучения с границей через тензор ПЧХ (83)**:

$$\begin{aligned} [\hat{Q}\mathbf{g}](s^-; H, p, s) &\equiv \mathcal{F}[\hat{G}\mathbf{f}] = \hat{T}(\hat{\Gamma}, \mathbf{g}) = \\ &= \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} dp' \int_{\Omega^+} \hat{v}(p - p', s, s^+) (\hat{\Gamma}, \mathbf{g}) ds^+, \end{aligned}$$

и получим **решение задач (86)–(87) в форме векторных функционалов с рекуррентными соотношениями**:

$$\mathbf{B}_1 = (\hat{\Gamma}, \mathbf{W}); \quad \mathbf{B}_k = (\hat{\Gamma}, \hat{T}\mathbf{B}_{k-1}) = (\hat{\Gamma}, \hat{Q}^{k-1}\mathbf{W}).$$

Сумма ряда (85) — **фурье-образ асимптотически точного решения** задачи (63) в классе функций медленного роста \mathcal{S}' — определяется через **линейный векторный функционал**

$$\mathbf{B}_R = (\hat{\Gamma}, \mathbf{Z}), \quad (88)$$

ядром которого является **тензор ПЧХ**, а фурье-образ "сценария"

$$\mathbf{Z} \equiv \hat{Z}\mathbf{W} \equiv \sum_{k=0}^{\infty} \hat{Q}^k \mathbf{W} = \sum_{k=0}^{\infty} \hat{T} \mathbf{B}_k \quad (89)$$

— сумма ряда Неймана по кратности отражения излучения от подложки (в терминах фурье-образов).

Поскольку преобразование Фурье (78) — линейная непрерывная операция, переводящая пространство \mathcal{S}' в \mathcal{S}' , оценки сходимости ряда возмущений (89), определяющего фурье-образ "сценария" $\mathbf{Z} = \mathcal{F}[\mathbf{Y}]$, аналогичны (77).

This is Slide No. 147.

В итоге исходная ОКЗ сведена к линейному функционалу — передаточному оператору и сформулирован линейно—системный подход к решению проблем дистанционного зондирования и учета вклада отражающей и излучающей земной поверхности.

При этом четко определено проявление нелинейных эффектов из-за многократного переотражения излучения от поверхности в формировании "сценария", которые описываются через линейные передаточные характеристики изолированного слоя атмосферы.

Отметим, что расчеты ФВ эффективно реализуются методом Монте-Карло.

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 147 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

В целом решение исходной общей краевой задачи сводится к трем этапам.

Этап 1. Расчет вектора функций влияния с параметрической зависимостью для атмосферы как решение первых краевых задач. Для расчета функций влияния выбираются аналитические или численные методы, которые наиболее адекватно описывают радиационный режим в атмосфере.

Этап 2. Расчет вектора "сценария" на земной поверхности как суммы ряда Неймана с помощью матрично-векторной операции, ядром которой является вектор функций влияния атмосферы.

Этап 3. Расчет угловых и пространственных распределений излучения внутри системы или на её границах через векторный линейный функционал, содержащий вектор "сценариев" на границах и ядром которого является вектор функций влияния атмосферы.

Home Page

Title Page

Contents



Page 148 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

Важно создание обеспечения теоретико–расчетных исследований решений прямых и обратных задач теории переноса излучения в системе "атмосфера – гетерогенная земная поверхность" (суша-океан) для оценки возможностей гиперспектральных и поляризационных систем мониторинга и оперативного анализа больших объемов космических изображений с целью обнаружения и распознавания состояния исследуемых объектов, а также выявления их динамических изменений путем анализа временных серий аэрокосмических изображений.

Корректность и эффективность решения таких задач может быть существенно улучшена с помощью априорной информации, полученной из расчетов яркости системы на основе численного моделирования оптического передаточного оператора и позволяющей выявить и установить закономерности формирования пространственного и углового распределения яркости атмосферы и освещенности земной поверхности в зависимости от условий визирования и "оптико-метеорологической погоды".

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 149 of 173

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 150.

Многослойные гетерогенные системы

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 150 of 173

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 151.

Предлагается оригинальный *универсальный математический аппарат* для моделирования переноса оптического излучения с учетом многократного рассеяния и поглощения в многослойных неоднородных гетерогенных природных и искусственных системах *с существенно различными радиационными режимами в отдельных областях системы*.

Для таких задач не применимы широко распространенные методы сложения или удвоения слоев. Гетерогенной является система "свободная атмосфера - многоярусная слоистая облачность - приземный слой атмосферы - океан" или система "мезосфера - стратосфера - тропосферные многоярусные слоистые облака - шлейфы дымов или выбросов загрязнений - земная поверхность".

Home Page

Title Page

Contents



Page 151 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 152.

Подход основан на построении *обобщенных решений в форме матричных функционалов*, ядрами которых являются векторы функций влияния отдельных слоев системы.

В свою очередь, функции влияния рассчитываются по аналитическим формулам или численными методами (например, итерационным методом характеристик с процедурами учета сильной анизотропии рассеяния и ускорения сходимости итераций) как решения первых краевых задач для интегро-дифференциальных кинетических уравнений или их модификаций.

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

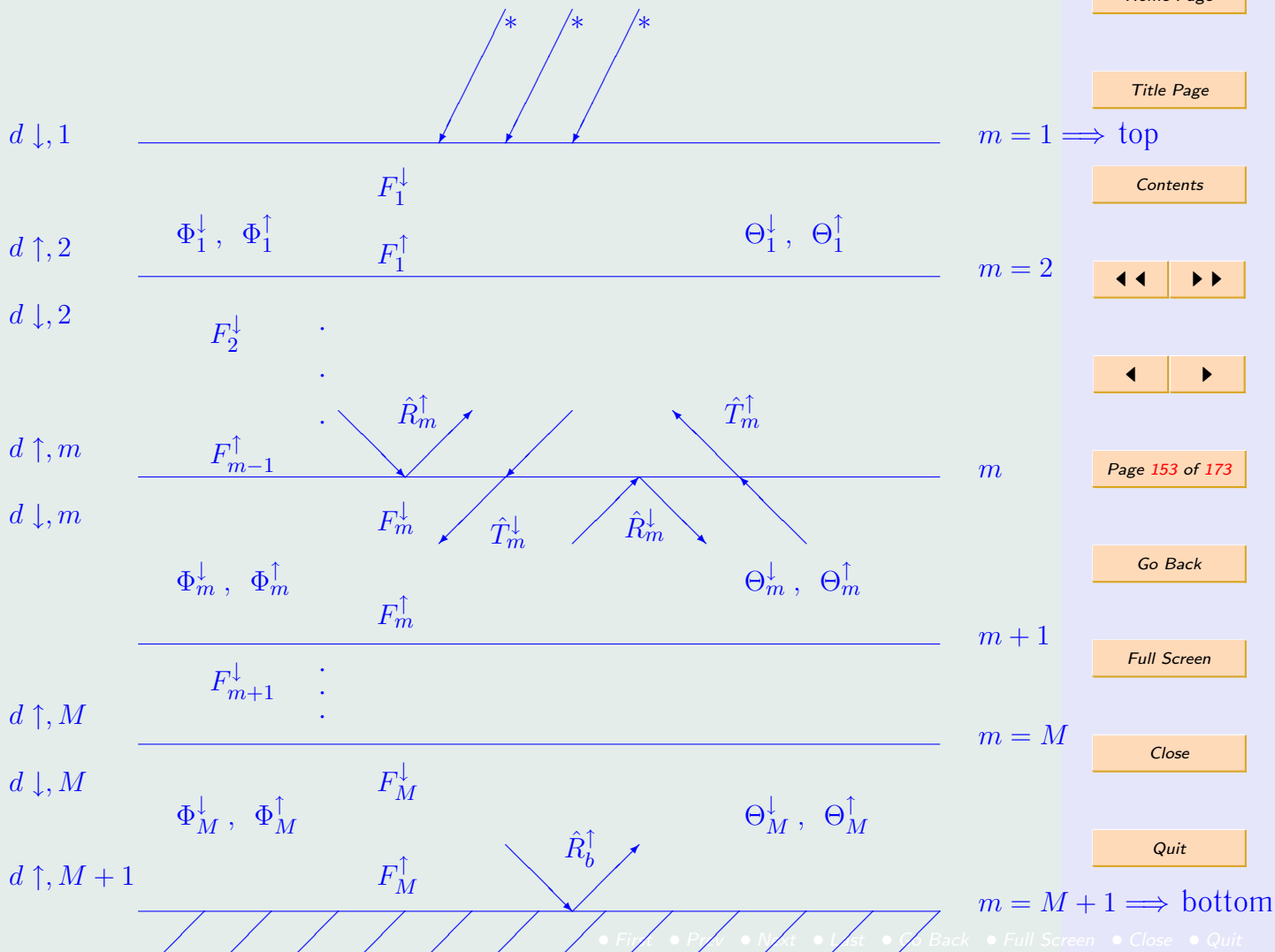
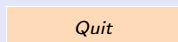
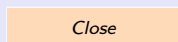
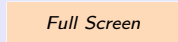
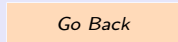
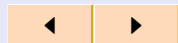
Page 152 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit



Краевая задача для многослойной гетерогенной системы

$$\hat{K}\Phi = F^{in}, \quad \Phi|_{t\downarrow} = F_t^\downarrow, \quad \Phi|_{b\uparrow} = \hat{R}_b^\uparrow\Phi + F_b^\uparrow,$$

для $m = 2 \div M$

$$\Phi|_{d\uparrow, m} = \varepsilon(\hat{R}_m^\uparrow\Phi + \hat{T}_m^\uparrow\Phi) + F_{m-1}^\uparrow,$$

$$\Phi|_{d\downarrow, m} = \varepsilon(\hat{R}_m^\downarrow\Phi + \hat{T}_m^\downarrow\Phi) + F_m^\downarrow,$$

$$F_1^\downarrow = F_t^\downarrow; \quad F_M^\uparrow = F_b^\uparrow; \quad d_{\downarrow, 1} = t_{\downarrow}; \quad d_{\uparrow, M+1} = b_{\uparrow};$$

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

$m = 1 \div M$ — номер слоя,

$m = 2 \div M$ — внутренние границы раздела слоев.

Решение ищем в виде ряда регулярных возмущений

$$\Phi = \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon^n \Phi^{(n)}$$

Home Page

Title Page

Contents



Page 154 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit



This is Slide No. 155.

Операторы отражения \hat{R}_m^\uparrow , \hat{R}_m^\downarrow и пропускания \hat{T}_m^\uparrow , \hat{T}_m^\downarrow определяются через индикатрисы рассеяния сред по следующим правилам:

$$[\hat{R}_m^\uparrow(\gamma_{m-1}^\uparrow)f_{m-1}^\downarrow](h_m, s_{m-1}^-) = \int_{\Omega^+} f_{m-1}^\downarrow(h_m, s_{m-1}^+) \gamma_{m-1}^\uparrow(h_m, s_{m-1}^+, s_{m-1}^-) ds_{m-1}^+;$$

$$[\hat{T}_m^\downarrow(\gamma_m^\downarrow)f_{m-1}^\downarrow](h_m, s_m^+) = \int_{\Omega^+} f_{m-1}^\downarrow(h_m, s_{m-1}^+) \gamma_m^\downarrow(h_m, s_{m-1}^+, s_m^+) ds_{m-1}^+;$$

$$[\hat{T}_m^\uparrow(\gamma_{m-1}^\uparrow)f_m^\uparrow](h_m, s_{m-1}^-) = \int_{\Omega^-} f_m^\uparrow(h_m, s_m^-) \gamma_{m-1}^\uparrow(h_m, s_m^-, s_{m-1}^-) ds_m^-;$$

$$[\hat{R}_m^\downarrow(\gamma_m^\downarrow)f_m^\uparrow](h_m, s_m^+) = \int_{\Omega^-} f_m^\uparrow(h_m, s_m^-) \gamma_m^\downarrow(h_m, s_m^-, s_m^+) ds_m^-;$$

Вводим алгебраические векторы с размерностью $2M$:

n -приближение решения

$$\Phi^{(n)} = \{\Phi_1^{\downarrow(n)}, \Phi_1^{\uparrow(n)}, \Phi_2^{\downarrow(n)}, \Phi_2^{\uparrow(n)}, \dots, \Phi_m^{\downarrow(n)}, \Phi_m^{\uparrow(n)}, \dots, \Phi_M^{\downarrow(n)}, \Phi_M^{\uparrow(n)}\};$$

полное решение

$$\Phi = \{\Phi_1^{\downarrow}, \Phi_1^{\uparrow}, \Phi_2^{\downarrow}, \Phi_2^{\uparrow}, \dots, \Phi_m^{\downarrow}, \Phi_m^{\uparrow}, \dots, \Phi_M^{\downarrow}, \Phi_M^{\uparrow}\};$$

источники в n -приближении

$$\mathbf{F}^{(n)} = \{F_1^{\downarrow(n)}, F_1^{\uparrow(n)}, F_2^{\downarrow(n)}, F_2^{\uparrow(n)}, \dots, F_m^{\downarrow(n)}, F_m^{\uparrow(n)}, \dots, F_M^{\downarrow(n)}, F_M^{\uparrow(n)}\};$$

функции влияния слоев

$$\Theta = \{\Theta_1^{\downarrow}, \Theta_1^{\uparrow}, \Theta_2^{\downarrow}, \Theta_2^{\uparrow}, \dots, \Theta_m^{\downarrow}, \Theta_m^{\uparrow}, \dots, \Theta_M^{\downarrow}, \Theta_M^{\uparrow}\};$$

начальное приближение источников

$$\mathbf{E} = \{E_1^{\downarrow}, E_1^{\uparrow}, E_2^{\downarrow}, E_2^{\uparrow}, \dots, E_m^{\downarrow}, E_m^{\uparrow}, \dots, E_M^{\downarrow}, E_M^{\uparrow}\};$$

"сценарий" на границах

$$\mathbf{Z} = \{Z_1^{\downarrow}, Z_1^{\uparrow}, Z_2^{\downarrow}, Z_2^{\uparrow}, \dots, Z_m^{\downarrow}, Z_m^{\uparrow}, \dots, Z_M^{\downarrow}, Z_M^{\uparrow}\}.$$

Расщепление исходной задачи на $2M$ задач со своими граничными условиями.

Нулевое приближение — излучение от источников без обмена излучением между слоями: $m = 1 \div M$

$$\hat{K}\Phi_m^{\downarrow(0)} = F_m^{\downarrow in}, \quad \Phi_m^{\downarrow(0)}|_{d\downarrow,m} = F_m^{\downarrow}, \quad \Phi_m^{\downarrow(0)}|_{d\uparrow,m+1} = 0;$$

$$\hat{K}\Phi_m^{\uparrow(0)} = F_m^{\uparrow in}, \quad \Phi_m^{\uparrow(0)}|_{d\downarrow,m} = 0, \quad \Phi_m^{\uparrow(0)}|_{d\uparrow,m+1} = F_m^{\uparrow}.$$

Приближения $n \geq 1$ — система $2M$ уравнений для $m = 1 \div M$

$$\hat{K}\Phi_m^{\downarrow(n)} = 0, \quad \Phi_m^{\downarrow(n)}|_{d\downarrow,m} = F_m^{\downarrow(n-1)}, \quad \Phi_m^{\downarrow(n)}|_{d\uparrow,m+1} = 0;$$

$$\hat{K}\Phi_m^{\uparrow(n)} = 0, \quad \Phi_m^{\uparrow(n)}|_{d\downarrow,m} = 0, \quad \Phi_m^{\uparrow(n)}|_{d\uparrow,m+1} = F_m^{\uparrow(n-1)}$$

Home Page

Title Page

Contents

Page 157 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 158.

С ИСТОЧНИКАМИ

$$F_1^{\downarrow(n)} = 0; \quad F_M^{\uparrow(n)} = \hat{R}_b^{\uparrow} \Phi_M^{\downarrow(n)} + \hat{R}_b^{\uparrow} \Phi_M^{\uparrow(n)};$$

$$F_m^{\downarrow(n)} = \hat{T}_m^{\downarrow} \Phi_{m-1}^{\downarrow(n)} + \hat{T}_m^{\downarrow} \Phi_{m-1}^{\uparrow(n)} + \hat{R}_m^{\downarrow} \Phi_m^{\downarrow(n)} + \hat{R}_m^{\downarrow} \Phi_m^{\uparrow(n)};$$

$$F_m^{\uparrow(n)} = \hat{R}_{m+1}^{\uparrow} \Phi_m^{\downarrow(n)} + \hat{R}_{m+1}^{\uparrow} \Phi_m^{\uparrow(n)} + \hat{T}_{m+1}^{\uparrow} \Phi_{m+1}^{\downarrow(n)} + \hat{T}_{m+1}^{\uparrow} \Phi_{m+1}^{\uparrow(n)}.$$

This is Slide No. 159.

Решения в виде линейных функционалов для каждого из слоев с $m = 1 \div M$

$$\Phi_m^{\downarrow(n)} = (\Theta_m^{\downarrow}, F_m^{\downarrow(n-1)}) ; \quad \Phi_m^{\uparrow(n)} = (\Theta_m^{\uparrow}, F_m^{\uparrow(n-1)}) .$$

Ядра функционалов — функции влияния слоев $m = 1 \div M$ определяются из краевых задач

$$\hat{K}\Theta_m^{\downarrow} = 0, \quad \Theta_m^{\downarrow} |_{d\downarrow, m} = f_{\delta, m}^{\downarrow}, \quad \Theta_m^{\downarrow} |_{d\uparrow, m+1} = 0 ;$$

$$\hat{K}\Theta_m^{\uparrow} = 0, \quad \Theta_m^{\uparrow} |_{d\downarrow, m} = 0, \quad \Theta_m^{\uparrow} |_{d\uparrow, m+1} = f_{\delta, m}^{\uparrow} .$$

This is Slide No. 160.

В векторной форме n -приближение решения

$$\Phi^{(n)} = (\Theta, \mathbf{F}^{(n-1)}) .$$

Источник в $(n - 1)$ -приближении

$$\mathbf{F}^{(n-1)} = \hat{P}\Phi^{(n-1)} .$$

Два последовательных n -приближения связаны рекуррентным соотношением

$$\Phi^{(n)} = (\Theta, \hat{P}\Phi^{(n-1)}) = (\Theta, \hat{G}^{n-1}\mathbf{E}) ,$$

где \mathbf{E} — начальное приближение.

This is Slide No. 161.

Асимптотически точное решение получается в форме векторного линейного функционала — оптического передаточного оператора:

$$\Phi = (\Theta, \mathbf{Z}) .$$

"Сценарий" — вектор \mathbf{Z} распределений яркостей на границах

$$\mathbf{Z} \equiv \hat{Z}\mathbf{E} \equiv \sum_{n=0}^{\infty} \hat{G}^n \mathbf{E} = \sum_{n=0}^{\infty} \hat{P} \Phi^{(n)}$$

— есть сумма ряда Неймана по кратности прохождения излучения через границы с учетом вклада многократного рассеяния с помощью функций влияния каждого слоя.

This is Slide No. 162.

\hat{P} — матрица ленточного типа с характеристиками отражения и пропускания границ

i, j	1	2	3	4	5	6	7	...	$2M$
1	0	0	0	0	0	0	0	...	0
2	\hat{R}_2^\uparrow	\hat{R}_2^\uparrow	\hat{T}_2^\uparrow	\hat{T}_2^\uparrow	0	0	0	...	0
3	\hat{R}_2^\downarrow	\hat{R}_2^\downarrow	\hat{T}_2^\downarrow	\hat{T}_2^\downarrow	0	0	0	...	0
4	0	0	\hat{R}_3^\uparrow	\hat{R}_3^\uparrow	\hat{T}_3^\uparrow	\hat{T}_3^\uparrow	0	...	0
5	0	0	\hat{R}_3^\downarrow	\hat{R}_3^\downarrow	\hat{T}_3^\downarrow	\hat{T}_3^\downarrow	0	...	0

...

i, j	1	...	$2(m-2)$	$2(m-1)-1$	$2(m-1)$	$2m-1$	$2m$	$2(m+1)-1$	$2(m+1)$	$2(m+2)-1$...	$2M$
$2(m-1)$	0	...	0	\hat{R}_m^\uparrow	\hat{R}_m^\uparrow	\hat{T}_m^\uparrow	\hat{T}_m^\uparrow	0	0	0	...	0
$2m-1$	0	...	0	\hat{R}_m^\downarrow	\hat{R}_m^\downarrow	\hat{T}_m^\downarrow	\hat{T}_m^\downarrow	0	0	0	...	0
$2m$	0	...	0	0	0	\hat{R}_{m+1}^\uparrow	\hat{R}_{m+1}^\uparrow	\hat{T}_{m+1}^\uparrow	\hat{T}_{m+1}^\uparrow	0	...	0
$2(m+1)-1$	0	...	0	0	0	\hat{R}_{m+1}^\downarrow	\hat{R}_{m+1}^\downarrow	\hat{T}_{m+1}^\downarrow	\hat{T}_{m+1}^\downarrow	0	...	0

...

i, j	1	...	$2(M-3)$	$2(M-2)-1$	$2(M-2)$	$2(M-1)-1$	$2(M-1)$	$2M-1$	$2M$
$2(M-2)$	0	...	0	\hat{R}_{M-1}^\uparrow	\hat{R}_{M-1}^\uparrow	\hat{T}_{M-1}^\uparrow	\hat{T}_{M-1}^\uparrow	0	0
$2(M-1)-1$	0	...	0	\hat{R}_{M-1}^\downarrow	\hat{R}_{M-1}^\downarrow	\hat{T}_{M-1}^\downarrow	\hat{T}_{M-1}^\downarrow	0	0
$2(M-1)$	0	...	0	0	0	\hat{R}_M^\uparrow	\hat{R}_M^\uparrow	\hat{T}_M^\uparrow	\hat{T}_M^\uparrow
$2M-1$	0	...	0	0	0	\hat{R}_M^\downarrow	\hat{R}_M^\downarrow	\hat{T}_M^\downarrow	\hat{T}_M^\downarrow
$2M$	0	...	0	0	0	0	0	\hat{R}_b^\uparrow	\hat{R}_b^\uparrow

Home Page

Title Page

Contents



Page 162 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 163.

Компоненты матрицы

$m = 1, i = 1$ — первая строка: $P_{1,j} = 0, j = 1 \div 2M$;

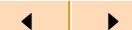
$m = 1 \div M - 1, i = 2m, i = 2 \div 2M$ — четные строки:

$$P_{2m,j} = \begin{cases} 0, & j = 1 \div 2(m-1) \\ \hat{R}_{m+1}^\uparrow, & j = 2(m-1) + 1, 2(m-1) + 2 \\ \hat{T}_{m+1}^\uparrow, & j = 2(m-1) + 3, 2(m-1) + 4 \\ 0, & j = 2(m-1) + 5 \div 2M ; \end{cases}$$

Home Page

Title Page

Contents



Page 163 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

$m = 2 \div M$, $i = 2m - 1$, $i = 3 \div 2M - 1$ — **нечетные строки:**

$$P_{2m-1,j} = \begin{cases} 0, & j = 1 \div 2(m-1) \\ \hat{T}_m^\downarrow, & j = 2(m-1) + 1, 2(m-1) + 2 \\ \hat{R}_m^\downarrow, & j = 2(m-1) + 3, 2(m-1) + 4 \\ 0, & j = 2(m-1) + 5 \div 2M; \end{cases}$$

$m = M$, $i = 2M$ — **последняя строка:**

$$P_{2M,j} = \begin{cases} 0, & j = 1 \div 2(M-1) \\ \hat{R}_M^\uparrow, & j = 2M - 1, 2M. \end{cases}$$

Матрично-векторная операция, описывающая один акт взаимодействия излучения с границами и учитывающая многократное рассеяние в слоях через функции влияния

$$\hat{G}\mathbf{F} = \hat{P}(\Theta, \mathbf{F}) =$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \hat{R}_2^\uparrow(\Theta_1^\downarrow, F_1^\downarrow) + \hat{R}_2^\uparrow(\Theta_1^\uparrow, F_1^\uparrow) + \hat{T}_2^\uparrow(\Theta_2^\downarrow, F_2^\downarrow) + \hat{T}_2^\uparrow(\Theta_2^\uparrow, F_2^\uparrow) \\ \vdots \\ \hat{T}_m^\downarrow(\Theta_{m-1}^\downarrow, F_{m-1}^\downarrow) + \hat{T}_m^\downarrow(\Theta_{m-1}^\uparrow, F_{m-1}^\uparrow) + \hat{R}_m^\downarrow(\Theta_m^\downarrow, F_m^\downarrow) + \hat{R}_m^\downarrow(\Theta_m^\uparrow, F_m^\uparrow) \\ \hat{R}_{m+1}^\uparrow(\Theta_m^\downarrow, F_m^\downarrow) + \hat{R}_{m+1}^\uparrow(\Theta_m^\uparrow, F_m^\uparrow) + \hat{T}_{m+1}^\uparrow(\Theta_{m+1}^\downarrow, F_{m+1}^\downarrow) + \hat{T}_{m+1}^\uparrow(\Theta_{m+1}^\uparrow, F_{m+1}^\uparrow) \\ \vdots \\ \hat{T}_M^\downarrow(\Theta_{M-1}^\downarrow, F_{M-1}^\downarrow) + \hat{T}_M^\downarrow(\Theta_{M-1}^\uparrow, F_{M-1}^\uparrow) + \hat{R}_M^\downarrow(\Theta_M^\downarrow, F_M^\downarrow) + \hat{R}_M^\downarrow(\Theta_M^\uparrow, F_M^\uparrow) \\ \hat{R}_b^\uparrow(\Theta_M^\downarrow, F_M^\downarrow) + \hat{R}_b^\uparrow(\Theta_M^\uparrow, F_M^\uparrow) \end{bmatrix}$$

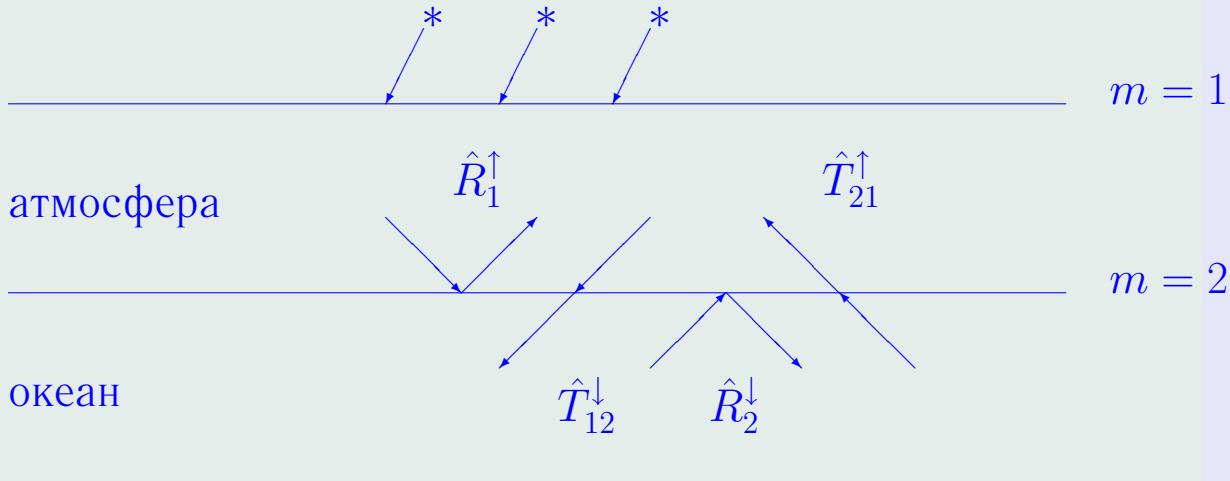
[Home Page](#)
[Title Page](#)
[Contents](#)

Page 165 of 173

[Go Back](#)
[Full Screen](#)
[Close](#)
[Quit](#)

This is Slide No. 166.

Частные случаи

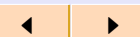


нулевое граничное условие

Home Page

Title Page

Contents



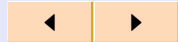
Page 166 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit



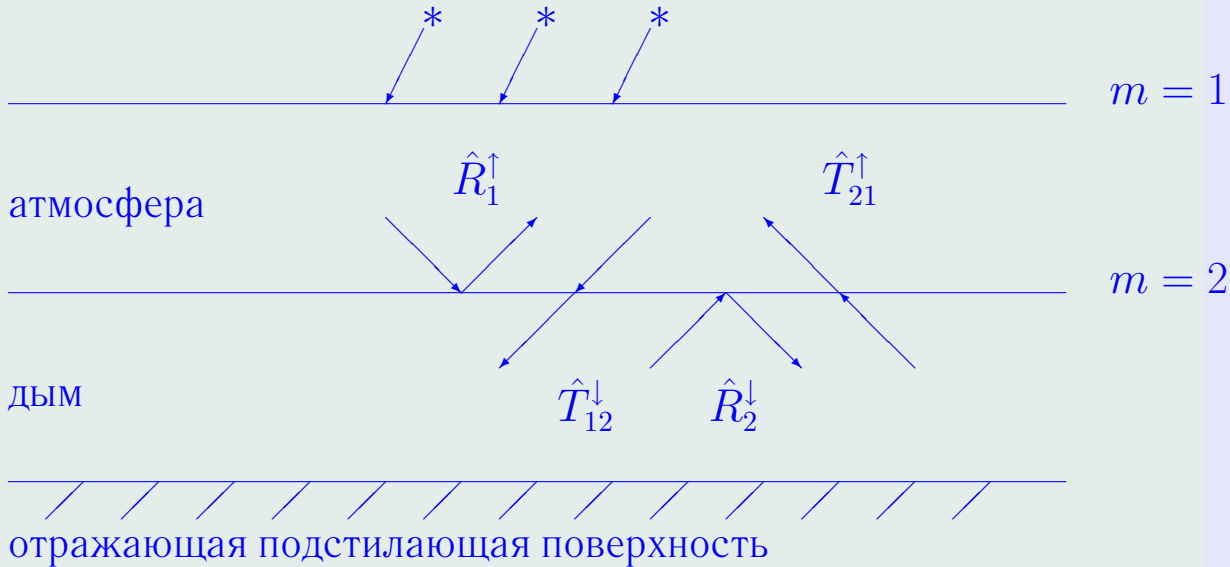
This is Slide No. 167.

$$\hat{P} = \begin{bmatrix} \hat{R}_1^\uparrow & \hat{T}_{21}^\uparrow \\ \hat{T}_{12}^\downarrow & \hat{R}_2^\downarrow \end{bmatrix}; \quad \Theta = \begin{bmatrix} \Theta_1^\uparrow \\ \Theta_2^\downarrow \end{bmatrix};$$

$$\hat{G}\mathbf{F} = \hat{P}(\Theta, \mathbf{F}) = \begin{bmatrix} \hat{R}_1^\uparrow(\Theta_1^\uparrow, F_1^\uparrow) + \hat{T}_{21}^\uparrow(\Theta_2^\downarrow, F_2^\downarrow) \\ \hat{T}_{12}^\downarrow(\Theta_1^\uparrow, F_1^\uparrow) + \hat{R}_2^\downarrow(\Theta_2^\downarrow, F_2^\downarrow) \end{bmatrix}.$$



This is Slide No. 168.



This is Slide No. 169.

$$\hat{P} = \begin{bmatrix} \hat{R}_1^\uparrow & \hat{T}_{21}^\uparrow & \hat{T}_{21}^\uparrow \\ \hat{T}_{12}^\downarrow & \hat{R}_2^\downarrow & \hat{R}_2^\downarrow \\ 0 & \hat{R}_b^\uparrow & \hat{R}_b^\uparrow \end{bmatrix} ; \quad \Theta = \begin{bmatrix} \Theta_1^\uparrow \\ \Theta_2^\downarrow \\ \Theta_2^\uparrow \end{bmatrix} ;$$

$$\hat{G}\mathbf{F} = \hat{P}(\Theta, \mathbf{F}) = \begin{bmatrix} \hat{R}_1^\uparrow(\Theta_1^\uparrow, F_1^\uparrow) + \hat{T}_{21}^\uparrow(\Theta_2^\downarrow, F_2^\downarrow) + \hat{T}_{21}^\uparrow(\Theta_2^\uparrow, F_2^\uparrow) \\ \hat{T}_{12}^\downarrow(\Theta_1^\uparrow, F_1^\uparrow) + \hat{R}_2^\downarrow(\Theta_2^\downarrow, F_2^\downarrow) + \hat{R}_2^\downarrow(\Theta_2^\uparrow, F_2^\uparrow) \\ \hat{R}_b^\uparrow(\Theta_2^\downarrow, F_2^\downarrow) + \hat{R}_b^\uparrow(\Theta_2^\uparrow, F_2^\uparrow) \end{bmatrix} .$$

В целом решение исходной задачи для гетерогенной системы сводится к трем этапам.

Этап 1. Расчет вектора функций влияния с параметрической зависимостью от направлений и для отдельных слоев как решение задач с внешним мононаправленным потоком (аналог обычных задач для слоя, освещаемого солнечным потоком). Для расчета функций влияния в разных слоях выбираются аналитические или численные методы, которые наиболее адекватно описывает радиационный режим в соответствующих слоях.

Этап 2. Расчет вектора "сценариев" на внутренних и внешних границах системы с помощью матрично-векторной операции.

Этап 3. Расчет угловых и пространственных распределений излучения внутри системы или на её границах через векторный линейный функционал, содержащий вектор "сценариев" на границах и ядром которого является вектор функций влияния

Home Page

Title Page

Contents



Page 170 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 171.

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.

Home Page

Title Page

Contents



Page 171 of 173

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 172.

Исследования других авторов в направлении мониторинга природной среды из космоса касаются, главным образом, эмпирических подходов по сбору и систематизации данных разного пространственного разрешения и валидации разрабатываемых моделей на основе данных наземных наблюдений.

В наших подходах акцент делается на более широкое развитие научных исследований в области описания взаимодействия полей солнечного излучения с природными средами и развития методов математического моделирования и информационных технологий в аэрокосмическом мониторинге природной среды.

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 172 of 173

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 173.

**БЛАГОДАРЮ
ЗА ВНИМАНИЕ

THANK YOU
FOR ATTENTION**

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 173 of 173

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)