

Поляризация солнечного излучения в проблеме дистанционного зондирования Земли из космоса

© Т.А.Сушкевич, А.Б.Гаврилович

*Институт прикладной математики имени
М.В.Келдыша РАН*

tamaras@keldysh.ru

Работа поддержана РФФИ проекты 06-01-00666, 08-01-00024

*Открытая всероссийская конференция
Современные проблемы
дистанционного зондирования Земли из космоса
Москва, ИКИ РАН, 10-14 ноября 2008 года*

Home Page

Title Page

Contents



Page 1 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 2.

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

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

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

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 2 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 3.

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

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

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

Home Page

Title Page

Contents



Page 3 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 4.

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

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

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

Home Page

Title Page

Contents



Page 4 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 5.

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

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

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)

[◀◀](#) [▶▶](#)

[◀](#) [▶](#)

Page 5 of 60

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

Векторная задача для плоского слоя с отражающей границей

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

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

Home Page

Title Page

Contents



Page 6 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

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

$$\hat{K}\Phi = \mathbf{F}, \quad \Phi|_t = \mathbf{F}^0, \quad \Phi|_b = \varepsilon\hat{R}\Phi + \mathbf{F}^H \quad (1)$$

с линейными операторами: оператор переноса

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

интеграл столкновений

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

равномерно ограниченный оператор отражения

$$[\hat{R}\Phi](H, r_{\perp}, s) \equiv \int_{\Omega^+} \hat{q}(r_{\perp}, s, s^+) \Phi(H, r_{\perp}, s^+) ds^+; \quad (2)$$

This is Slide No. 8.

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

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

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

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

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

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

Если хотя бы одна из функций \mathbf{F}^0 , \mathbf{F}^H , \hat{q} зависит от r_\perp , то решение задачи (1)–(2) находится в 5D фазовом объеме $(x, y, z, \vartheta, \varphi)$, а если нет зависимости от r_\perp , то в 3D фазовом объеме (z, ϑ, φ) .

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 8 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 9.

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

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

Home Page

Title Page

Contents



Page 9 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 10.

Остановимся подробнее на решении самой простой вектор-ной краевой задачи

$$\hat{D}_z \Psi = \hat{S} \Psi + \mathbf{F}, \quad \Psi|_{\Gamma_0} = \Psi_0(\mathbf{s}), \quad \Psi|_{\Gamma_H} = \Psi_H(\mathbf{s}), \quad (3)$$

где вектор-функция источника

$$\hat{S} \Psi \equiv \sigma_s(z) \int_{\Omega} \hat{P}(z, \mu, \mu', \varphi' - \varphi) \Psi(z, \mu', \varphi') d\mu' d\varphi'. \quad (4)$$

Ядром интегрального оператора (4) является фазовая матрица

$$\hat{P}(z, \mathbf{s}, \mathbf{s}') = \hat{P}(z, \mu, \varphi, \mu', \varphi') = \hat{L}(\alpha) \hat{\Gamma}(\vartheta_s) \hat{L}(\alpha'). \quad (5)$$

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

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 10 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 11.

Граничные условия записываются в общем виде:

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

где $\pi \mathbf{F}_0$ — внешний мононаправленный поток излучения на верхней границе слоя $z = 0$ в направлении μ_0 и \mathbf{f}_0 — диффузный источник;

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

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

This is Slide No. 12.

Основные даты

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

Home Page

Title Page

Contents



Page 12 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 13.

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

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

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

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 13 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

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

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

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

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

Home Page

Title Page

Contents



Page 14 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 15.

Истории открытия поляризации

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 15 of 60

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 16.

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

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

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

Home Page

Title Page

Contents



Page 16 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

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

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

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

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

Home Page

Title Page

Contents



Page 17 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 18.

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

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

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 18 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 19.

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

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

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

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

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 19 of 60

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

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

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

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

Home Page

Title Page

Contents



Page 20 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 21.

Независимо от оптических исследований выполнялись исследования по электричеству и магнетизму.

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

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

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 21 of 60

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 22.

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

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

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 22 of 60

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 23.

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

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

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 23 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 24.

Характеристики состояния поляризации

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 24 of 60

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 25.

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

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

Home Page

Title Page

Contents



Page 25 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 26.

Параметрами Стокса общего вида являются следующие четыре величины:

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

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

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

This is Slide No. 27.

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

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

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)

[◀◀](#) [▶▶](#)

[◀](#) [▶](#)

Page 27 of 60

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 28.

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

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

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

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 28 of 60

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 29.

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

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

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

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)

[◀◀](#) [▶▶](#)

[◀](#) [▶](#)

Page 29 of 60

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 30.

В дальнейшем внесли заметный вклад в основы этой теории

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

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

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 30 of 60

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 31.

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

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

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

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 31 of 60

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 32.

Скалярное и векторное уравнение переноса

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 32 of 60

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 33.

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

В 1889 году в Известиях Петербургской академии наук было опубликовано сочинение Ореста Даниловича Хвольсона "Основы математической теории внутренней диффузии света", в котором содержится вывод интегрального уравнения теории многократного рассеяния света (статья была подготовлена в 1885 г.). Краткий реферат по докладу был опубликован в 1886 году в Журнале русского физико-химического общества.

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 33 of 60

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 34.

В 1887 и 1889 гг. вышли статьи E.Lommel (немецкий физик) Опредил работы E.A.Milna) на ту же тему "Фотометрия диффузного отражения" и получено то же уравнение. Рассматривалось только изотропное рассеяние и в разложении учитывались только две кратности рассеяния.

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

Но долго ещё их работы не замечали. Интегральные уравнения вновь появились через почти 25 лет в связи задачами о переносе излучения в атмосфере Земли и Солнце, но без ссылок...

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 34 of 60

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 35.

В 1914 г. вышла статья астрофизика Карла Шварцшильда, которому принадлежит также двухпотокое приближение (Шварцшильда-Шустера). Шварцшильд указал на способ вывода интегрального уравнения, исходя из дифференциальной формы, а также на численное решение путем перехода к системе линейных алгебраических уравнений.

Между 1915 и 1930 гг. становление теории переноса связано с Англией - это А.Эддингтон, Дж.Джинс и Э.Милн. В 1934 г. вышла книга немецкого ученого Э.Хопфа "Математические задачи лучистого переноса это первая книга! Кстати, Хопф - соавтор метода Винера-Хопфа.

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 35 of 60

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 36.

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

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

Home Page

Title Page

Contents



Page 36 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

Home Page

Title Page

Contents



Page 37 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 37.

Следует отметить три наиболее значимых результата сороковых годов:

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

This is Slide No. 38.

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

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

This is Slide No. 39.

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

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

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

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 39 of 60

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

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

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

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

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

Home Page

Title Page

Contents



Page 40 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

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

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

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

Home Page

Title Page

Contents



Page 41 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

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

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

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

Home Page

Title Page

Contents



Page 42 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 43.

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

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

В 1949 г. провел качественный расчет.

В 1955 г. вышел прекрасный обзор

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

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

Home Page

Title Page

Contents



Page 43 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 44.

В сноске на стр. 105 читаем:

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

Home Page

Title Page

Contents



Page 44 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 45.

Нужно отметить работы

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

Home Page

Title Page

Contents



Page 45 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

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

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

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

Home Page

Title Page

Contents



Page 46 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 47.

Замечания:

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

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 47 of 60

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 48.

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

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

Home Page

Title Page

Contents



Page 48 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 49.

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

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

Home Page

Title Page

Contents



Page 49 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

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

Фактические результаты:

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

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

Home Page

Title Page

Contents



Page 50 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 51.

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

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

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

Home Page

Title Page

Contents



Page 51 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 52.

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

Замечание:

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

Home Page

Title Page

Contents



Page 52 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 53.

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

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

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

Home Page

Title Page

Contents

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Page 53 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 54.

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

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

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

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

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 54 of 60

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)

This is Slide No. 55.

Подготовлены Таблицы соответствия "Шаблона" наиболее распространенным представлениям:

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

Home Page

Title Page

Contents



Page 55 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

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

Уровень современных зарубежных достижений представлен в книгах

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

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

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

Home Page

Title Page

Contents



Page 56 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

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

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

Но нужно знать, что

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

Home Page

Title Page

Contents



Page 57 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 58.

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

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

Home Page

Title Page

Contents



Page 58 of 60

Go Back

Full Screen

Close

Quit

This is Slide No. 59.

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

This is Slide No. 60.

**THANK YOU
FOR ATTENTION
БЛАГОДАРИМ
ЗА ВНИМАНИЕ**

[Home Page](#)

[Title Page](#)

[Contents](#)



Page 60 of 60

[Go Back](#)

[Full Screen](#)

[Close](#)

[Quit](#)