

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации

1544364

О. И. Смоктий

**Принцип
зеркального отображения
в теории переноса
излучения**



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCE
St Petersburg Institute for Informatics and Automation

O.I. Smokty

MIRROR REFLECTION PRINCIPLE IN
RADIATIVE TRANSFER THEORY

St. Petersburg
VVM Publishing
2019

О. И. Смоктий

Принцип зеркального отображения
в теории переноса излучения

Санкт-Петербург
Издательство ВВМ
2019

УДК 523.4852

ББК 22.654

С51



Смоктый О. И.

С51 Принцип зеркального отображения в теории переноса излучения. СПб.: Изд-во ВВМ, 2019. — 764 с.

ISBN 978-5-9651-1325-5

В монографии рассмотрено применение сформулированного автором принципа зеркального отображения в задачах численно-аналитического моделирования интенсивностей скалярного и поляризованного некогерентного монохроматического излучения плоского однородного слоя конечной оптической толщины, ограниченного снизу горизонтально-однородной неортоотропной подстилающей поверхностью с произвольным законом отражения падающего на нее излучения. На базе данного принципа разработана концепция фотометрических и поляриметрических инвариантов, объединяющая нисходящие и восходящие излучения в симметричных направлениях визирования на двух текущих оптических уровнях, зеркально-симметричных относительно середины заданного однородного слоя и инвариантных при сдвигах оптических глубин и угловых вращениях линий визирования. На основе указанной концепции получены новые линейные и нелинейные интегральные уравнения Фредгольма II рода, а также линейные сингулярные интегральные уравнения для фотометрических и поляриметрических инвариантов на произвольных симметричных и несимметричных оптических уровнях среды в зеркально-симметричных направлениях визирования в двух альтернативных областях их определения, которые в два раза меньше исходной. Проведен также анализ полученных численно-аналитических результатов, связанных с обобщением принципа инвариантности Амбарцумяна-Чандрасекара и применением методов классической теории переноса скалярного и поляризованного излучения, для исследования аналитической пространственно-угловой структуры их интенсивностей. Особое внимание уделено обобщению классических структурных функций Амбарцумяна и Чандрасекара на произвольные оптические глубины заданного однородного слоя. В качестве примера использования полученных числовых данных построены приближенные аналитические модели образования слабых спектральных линий поглощения в системе «атмосфера — подстилающая поверхность» для различных законов отражения, представляющих практический интерес и используемых в прикладных исследованиях по оптике и спектрофотополариметрии природных сред в видимой области спектра 400–800 нм. Для этой области спектра представлены также другие примеры использования полученных численно-аналитических результатов при проведении наземных измерений и дистанционного зондирования Земли и планет из космоса.

Монография предназначена для специалистов по теории переноса некогерентного монохроматического излучения, оптике и спектроскопии природных и техногенных сред, геофизике и физике планетных атмосфер. Она может быть также использована при анализе, пространственно-частотной фильтрации и обработке гиперспектральных цифровых данных дистанционного космического зондирования Земли и планет в диапазоне длин волн $\lambda = 450\text{--}1200$ нм. В качестве учебного пособия при чтении факультативных курсов ее можно рекомендовать также преподавателям и аспирантам высших учебных заведений соответствующих физико-математических специальностей.

Библиогр.: 563 назв. Табл. 30. Рис. 89.

Рецензенты:

доктор физ.-мат. наук, профессор А. К. Колесов,
доктор физ.-мат. наук, профессор В. В. Козодеров.

ISBN 978-5-9651-1325-5

© О. И. Смоктый, 2019

Оглавление

Предисловие	5
Введение	7
Глава 1 Принцип зеркального отображения и вероятностные инварианты переноса скалярного излучения	24
§1.1 Основные интегральные уравнения и функциональные соотношения для вероятностей выхода фотонов из однородного слоя конечной оптической толщины ...	26
§1.2 Вероятностные инварианты в теории многократного рассеяния фотонов	36
§1.3 Принцип пространственно-угловой симметрии для полных вероятностей выхода фотонов из однородного слоя	42
§1.4 Симметризация основных интегральных уравнений для базовых вероятностных функций	45
§1.5 Линейные сингулярные интегральные уравнения для вероятностных инвариантов и вероятностей выхода фотонов из однородного слоя конечной оптической толщины	48
§1.6 Модификация принципа инвариантности Амбарцумяна–Чандрасекара для нахождения единой вероятностной функции выхода фотонов из однородного слоя	56
§1.7 Инвариантная трактовка базисных резольвентных функций теории переноса скалярного излучения	59
§1.8 Дискретные численные решения линейных интегральных уравнений для инвариантов резольвент и фундаментальных функций Соболева	64
§1.9 Особенности реализации метода дискретизации при численном моделировании резольвентных функций и фундаментальных функций Соболева	70
§1.10 Влияние неортоотропной подстилающей поверхности на вероятностные инварианты полей скалярного излучения	72
Глава 2 Принцип зеркального отображения, конценция фотометрических инвариантов и единой функции коэффициентов яркости скалярного излучения. 78	78
§2.1 Фотометрические инварианты интенсивностей диффузно отраженного и диффузно пропущенного скалярного излучения	78
§2.2 Принцип зеркального отображения для коэффициентов яркости однородного слоя	83
§2.3 Линейные интегральные уравнения Фредгольма II рода для инвариантов азимутальных гармоник коэффициентов яркости однородного слоя	89
§2.4 Нелинейные интегральные уравнения для инвариантов азимутальных гармоник коэффициентов яркости	90
§2.5 Определение единых функций выхода $E(\eta, \xi, \varphi, \tau_0)$ на основе модификации классического принципа инвариантности Амбарцумяна–Чандрасекара	95
§2.6 Приближенные выражения для коэффициентов яркости и единой функции выхода в случае сильно вытянутых индикатрис рассеяния	98
§2.7 Влияние однократного рассеяния фотонов на точность численного моделирования диффузно отраженного и диффузно пропущенного скалярного излучения	107
§2.8 Аналитические аппроксимации реальных индикатрис рассеяния $P(\cos \gamma)$	113
§2.9 Модификация приближенного метода Соболева для решения задач численно-аналитического радиационного моделирования	119

§2.10 Линейные сингулярные интегральные уравнения для единой функции выхода и инвариантов коэффициентов яркости однородного слоя произвольной оптической толщины	125
§2.11 Метод угловой дискретизации для нахождения решений регуляризованных линейных сингулярных интегральных уравнений.....	127
§2.12 Корни k_m и псевдокорни \tilde{k}_m характеристических уравнений теории переноса скалярного излучения.....	130
§2.13 Устранение неединственности численных решений симметризованных линейных сингулярных интегральных уравнений.....	133
§2.14 Особенности численной схемы расчетов Фурье-гармоник инвариантов коэффициентов яркости однородного слоя	135
§2.15 Результаты численного моделирования Фурье-гармоник инвариантов коэффициентов яркости и единых функций выхода на основе метода угловой дискретизации.....	139
§2.16 Симметризация структурных функций Амбарцумяна и Чандрасекара.....	144
§2.17 Симметризация классических структурных функций Амбарцумяна на основе их вероятностной трактовки	155
§2.18 Точные выражения для азимутальных гармоник коэффициентов яркости, их инвариантов и единых функций выхода в случае аппроксимирующих трехчленных индикатрис рассеяния	161
§2.19 Точные асимптотические выражения для азимутальных гармоник единой функции выхода и инвариантов коэффициентов яркости однородных слоев большой оптической толщины	168
§2.20 Инварианты Фурье-гармоники коэффициентов яркости и единых фотометрических функций выхода для системы «атмосфера – подстилающая поверхность».....	173
§2.21 Приближенная теория образования слабых спектральных линий в системе «однородный атмосферный слой – неортогортронная подстилающая поверхность».....	183
Глава 3 Принцип зеркального отображения, фотометрические инварианты и единые функции внутренних полей скалярного излучения	201
§3.1 Связь вероятностных и фотометрических инвариантов интенсивностей скалярного излучения	202
§3.2 Принцип зеркального отображения внутренних полей скалярного излучения.....	208
§3.3 Симметризация основных краевых задач классической теории переноса скалярного излучения	213
§3.4 Усовершенствование основных численно-аналитических методов теории переноса скалярного излучения.....	215
§3.5 Линейные сингулярные интегральные уравнения для фотометрических инвариантов интенсивностей скалярного излучения	237
§3.6 Корни и псевдокорни характеристических уравнений классической теории переноса скалярного излучения.....	241
§3.7 Устранение неединственности регулярных решений линейных сингулярных интегральных уравнений для интенсивностей скалярного излучения	251
§3.8 Устранение неединственности регулярных решений линейных сингулярных интегральных уравнений для интенсивностей скалярного излучения	254

§3.9 Численное решение линейных интегральных уравнений для фотометрических инвариантов интенсивностей скалярного излучения	255
§3.10 Особенности численной реализации метода дискретизации при расчетах фотометрических инвариантов интенсивностей скалярного излучения	261
§3.11 Единая фотометрическая функция выхода скалярного излучения с зеркально-симметричных оптических уровней однородного слоя	274
§3.12 Приближенные аналитические соотношения для интенсивностей i' фотометрических инвариантов скалярного излучения в случае сильно вытянутых индикатрис рассеяния	292
§3.13 Линейные сингулярные интегральные уравнения для единых фотометрических функций	301
Глава 4 Пространственно-угловая структура интенсивностей и фотометрических инвариантов полей скалярного излучения	309
§4.1 Аналитическая форма представления обобщенных коэффициентов яркости однородного слоя конечной оптической толщины	310
§4.2 Пространственно-угловая структура базовых вспомогательных функций теории многократного неізотропного рассеяния скалярного излучения	313
§4.3 Пространственно-угловая структура азимутальных гармоник обобщенных коэффициентов яркости однородного слоя конечной оптической толщины	316
§4.4 Линейные интегральные уравнения для обобщенных структурных функций Чандрасекара и их инвариантов	320
§4.5 Обобщенные структурные функции Амбарцумяна и их инварианты	325
§4.6 Аналитические представления вспомогательных структурных функций теории многократного неізотропного рассеяния скалярного излучения	327
§4.7 Определение пространственно-угловой структуры интенсивностей скалярного излучения на основе обобщенных функций Амбарцумяна	329
§4.8 Нелинейные интегральные уравнения для обобщенных структурных функций Амбарцумяна	334
§4.9 Симметризация пространственно-угловой структуры интенсивностей скалярного излучения на основе принципа зеркального отображения	340
Глава 5 Фотометрические инварианты интенсивностей скалярного излучения системы «однородный слой – неортотропная подстилающая поверхность»	351
§5.1 Основная краевая задача теории переноса скалярного излучения для системы «однородный слой – неортотропная подстилающая поверхность»	353
§5.2 Точные линейные интегральные уравнения Фредгольма II рода для азимутальных гармоник интенсивностей скалярного излучения в системе «однородный слой – неортотропная подстилающая поверхность»	359
§5.3 Точная математическая модель для расчета интенсивностей скалярного излучения в приближении однократного рассеяния и отражения фотонов	362
§5.4 Многосеточные релаксационно-итерационные методы и сглаживающие алгоритмы численного радиационного моделирования	364
§5.5 Релаксационно-итерационные схемы метода Гаусса–Зайделя и сглаживающего алгоритма Якоби	371
§5.6 Усовершенствование классической релаксационно-итерационной схемы метода Гаусса–Зайделя и сглаживающего алгоритма Якоби	379

§5.7 Принцип зеркального отображения полей скалярного излучения системы «однородный слой – подстилающая поверхность»	391
§5.8 Симметризованная форма основной краевой задачи для фотометрических инвариантов интенсивностей скалярного излучения системы «однородный слой – подстилающая поверхность»	395
§5.9 Применение метода Гаусса–Зайделя для численного моделирования инвариантов Фурье-гармоник интенсивностей скалярного излучения в системе «однородный слой – неортогруппная подстилающая поверхность»	405
§5.10 Учет пространственно-угловой инвариантности дискретных интенсивностей скалярного излучения системы «однородный слой – неортогруппная подстилающая поверхность» по методу Гаусса–Зайделя	412
§5.11 Пространственно-угловая структура интенсивностей скалярного излучения и их фотометрических инвариантов на симметричных оптических уровнях системы «однородный слой – подстилающая поверхность»	417
§5.12 Фурье-гармоники интенсивностей скалярного излучения и их инварианты в системе «однородный слой – неортогруппная подстилающая поверхность» в случае сильно вытянутых атмосферных индикатрис рассеяния	437
§5.13 Оптимальные уровни информативности базовых оптических функций и интенсивностей скалярного излучения системы «атмосферный слой – подстилающая поверхность»	440
§5.14 Сжатие общего числа структурных элементов дискретных интенсивностей скалярного излучения системы «однородный атмосферный слой – неортогруппная подстилающая поверхность»	464
§5.15 Калибровка базовых оптических функций и отражательных характеристик системы «однородный атмосферный слой – подстилающая поверхность»	470
§5.16 Калибровка дискретных интенсивностей скалярного излучения и фотометрических инвариантов системы «атмосфера – неортогруппная подстилающая поверхность»	483
Глава 6 Обобщенные фотометрические инварианты полей скалярного излучения на несимметричных виртуальных уровнях системы «однородный слой – подстилающая поверхность»	495
§6.1 Основная краевая задача и линейные интегральные фредгольмовские уравнения для азимутальных гармоник интенсивностей скалярного излучения на несимметричных оптических уровнях однородного слоя	497
§6.2 Линейные интегральные уравнения Фредгольма для азимутальных гармоник обобщенных фотометрических инвариантов интенсивностей скалярного излучения .	504
§6.3 Линейные сингулярные интегральные уравнения для обобщенных фотометрических инвариантов интенсивностей скалярного излучения	507
§6.4 Обобщенные фотометрические инварианты интенсивностей скалярного излучения на несимметричных оптических уровнях системы «однородный слой – подстилающая поверхность»	518
Глава 7 Принцип зеркального отображения полей поляризованного излучения однородного слоя конечной оптической толщины	525
§7.1 Основная краевая задача теории переноса поляризованного излучения и базовые оптические параметры рассеивающего однородного слоя	528

§7.2 Принцип зеркального отображения полей поляризованного излучения	536
§7.3 Симметризованная форма матричных краевых задач для поляриметрических инвариантов	543
§7.4 Симметризация внешних энергетических источников поляризованного излучения в однородном слое конечной оптической толщины	547
§7.5 Применение классического принципа инвариантности Амбарцумяна–Чандрасекара в теории переноса поляризованного излучения.....	551
§7.6 Система нелинейных интегральных уравнений для коэффициентов яркости поляризованного излучения.....	560
§7.7 Единая функция для интенсивностей многократно рассеянного поляризованного излучения в однородном слое конечной оптической толщины	563
§7.8 Проблема неединственности для единых поляриметрических функций.....	567
§7.9 Специальное Фурье-представление интенсивностей и функций источников поляризованного излучения.....	573
§7.10 Линейные интегральные фредгольмовские уравнения и основная краевая задача для Фурье-гармоник матричных интенсивностей и их поляриметрических инвариантов	576
§7.11 Полиномиальное преобразование краевой задачи для Фурье-гармоник интенсивностей и функций источников поляризованного излучения.....	590
§7.12 Базовые вспомогательные функции полей поляризованного излучения	593
§7.13 Угловая структура вспомогательных функций поляризованного излучения	597
§7.14 Линейные сингулярные интегральные уравнения для интенсивностей и функций источников поляризованного излучения.....	602
§7.15 Проблема неединственности решений матричных линейных сингулярных интегральных уравнений.....	609
Глава 8 Пространственно-угловая структура интенсивностей поляризованного излучения однородного слоя конечной оптической толщины	614
§8.1 Угловая структура диффузно отраженного и диффузно пропущенного поляризованного излучения.....	615
§8.2 Свойства угловой симметрии инвариантов и единых функций внешних полей поляризованного излучения.....	623
§8.3 Свойства пространственно-угловой симметрии Фурье-гармоник единых функций и инвариантов внутренних полей поляризованного излучения	627
Глава 9 Обобщенные инварианты интенсивностей и функций источников поляризованного излучения на несимметричных оптических уровнях однородного слоя.....	632
§9.1 Основная краевая задача для обобщенных интенсивностей и инвариантов поляризованного излучения.....	633
§9.2 Линейные сингулярные интегральные уравнения для обобщенных поляриметрических инвариантов	643
Глава 10 Инвариантные свойства интенсивностей поляризованного излучения в системе «однородный слой – неортотропная подстилающая поверхность».....	655
§10.1 Интегральные представления основной краевой задачи теории переноса поляризованного излучения в системе «атмосфера – подстилающая поверхность»....	656

§10.2 Принцип зеркального отображения поляризованного излучения для системы «однородный слой – подстилающая поверхность»	662
§10.3 Метод суперпозиции экспонент при численном моделировании интенсивностей поляризованного излучения системы «однородная атмосфера – неортогруппная подстилающая поверхность»	667
§10.4 Применение обобщенного принципа инвариантности для определения интенсивностей поляризованного излучения и их инвариантов в системе «однородный слой – подстилающая поверхность»	670
§10.5 Применение обобщенного принципа инвариантности для определения интенсивностей поляризованного излучения и их инвариантов в системе «однородный слой – подстилающая поверхность»	673
§10.6 Случай горизонтально-однородной ортогруппной подстилающей поверхности .	674
§10.7 Зеркальное отражение поляризованного излучения в системе «однородный атмосферный слой – подстилающая поверхность»	678
§10.8 Модификация метода Гаусса–Зайделя для численного моделирования интенсивностей и инвариантов поляризованного излучения системы «однородный атмосферный слой – неортогруппная подстилающая поверхность»	680
§10.9 Приближенная аналитическая модель образования слабых спектральных линий поляризованного излучения в системе «однородный слой – неортогруппная подстилающая поверхность»	686
§10.10 Приближенные аналитические модели интенсивностей поляризованного излучения в задачах наземной и космической спектрополяриметрии системы «атмосфера – подстилающая поверхность»	697
Заключение	712
Литература	720



004

Смоктий Олег Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, Заслуженный деятель науки Российской Федерации, главный научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской Академии Наук. Автор и соавтор более 290 научных публикаций, в том числе 9 монографий, одного открытия и 6 изобретений. Область научных интересов: теория переноса некогерентного излучения, тематический анализ гиперспектральных данных дистанционного зондирования Земли и планет из космоса, численно-аналитическое моделирование полей скалярного и поляризованного излучения природных и техногенных полидисперсных сред, аэрокосмическая геоинформатика. По результатам съемки Земли с пилотируемых космических корабля “Союз-5” первый дал количественную интерпритацию спектров яркости земной атмосферы с учетом ее сферичности. В 1986 г сформулировал принцип зеркального отображения (симметрии) и концепцию фотометрических инвариантов полей скалярного и поляризованного излучения, которые позволили модифицировать основные методы численно-аналитического радиационного моделирования и существенно повысить его эффективность. В 1990 г. избран членом-корреспондентом, а в 1995 г.— действительным членом (академиком) Международной Академии Астронавтики (Франция) по Отделению фундаментальных наук. В 2002 г. в составе авторского коллектива стал Лауреатом Премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники за работу “Разработка методов и технологий дистанционного аэрокосмического мониторинга природной среды”. За большой вклад в развитие науки, образования и подготовку высококвалифицированных специалистов в области космических исследований награжден орденами “Дружбы ” и “Почета”.