

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

А.А. Лагутин, В.В. Учайкин

МЕТОД СОПРЯЖЕННЫХ  
УРАВНЕНИЙ  
В ТЕОРИИ ПЕРЕНОСА  
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ  
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Монография



Барнаул

---

Издательство  
Алтайского государственного  
университета  
2013

**УДК 524.1; 539.12.04**

**Л 149**

**Рецензенты:**

член-корр. РАН Г.А. Михайлов (ИВМ и МГ СО РАН, г. Новосибирск)  
д.ф.-м.н. В.В. Рыжов (ИСЭ СО РАН, г. Томск)

**Л 149 Лагутин, А.А.**

Метод сопряженных уравнений в теории переноса космических лучей высоких энергий [Текст] : монография / А.А. Лагутин, В.В. Учайкин. — Барнаул : Изд-во Алт. ун-та, 2013. — 293 с.  
ISBN 978–5–7904–1478–7

Содержит систематическое изложение концепции ценности и метода сопряженных уравнений в теории переноса космических лучей высоких энергий с учетом естественных флуктуаций в элементарных процессах взаимодействий частиц с атомами среды. В основу представленного подхода к теории переноса положено понятие детектора, показание которого трактуется как функционал, заданный на множестве реализаций марковского ветвящегося процесса. Подробно рассмотрены различные типы ценности: линейная детерминированная, линейная стохастическая, нелинейная ценности, ценность в случайной среде. Наряду с основными уравнениями переноса для плотности потоков частиц космических лучей выводятся и обсуждаются сопряженные (в смысле Лагранжа) уравнения для различных характеристик стохастической ценности. Рассматриваются важнейшие модели случайно-неоднородной среды и особенности переноса в них. Двойственный подход, опирающийся на обе (основную и сопряжённую) системы уравнений переноса, позволяет сформулировать закон сохранения ценности, концепцию контрибутонов, теорию возмущений. На основе этих понятий строится теория чувствительности и применяется для решения нескольких задач физики космических лучей.

Для специалистов в области ядерной физики, физики и астрофизики космических лучей, имеющих дело с измерениями или расчетами потоков частиц высокой энергии.

**УДК 524.1; 539.12.04**

*Издание публикуется в рамках реализации  
Программы стратегического развития  
Алтайского государственного университета*

ISBN 978–5–7904–1478–7 © А.А. Лагутин, В.В. Учайкин, 2013  
© Оформление. Издательство Алтайского  
государственного университета, 2013

# Оглавление

<b>Предисловие</b>	<b>9</b>
<b>Глава 1. Понятие ценности в теории переноса</b>	<b>11</b>
1.1. Эволюция понятия ценности . . . . .	11
1.2. Модель процесса переноса частиц . . . . .	15
1.3. Процесс измерения и ценность . . . . .	17
1.4. Среднее значение и дисперсия показания аддитивного детектора . . . . .	21
1.5. Ценность как функционал от траектории частицы . . . . .	26
<b>Глава 2. Линейная детерминированная ценность</b>	<b>31</b>
2.1. Уравнение для ЛДЦ . . . . .	31
2.2. Двойственное представление показания аддитивного детектора . . . . .	34
2.3. Основное уравнение теории переноса . . . . .	38
2.4. Начальные и граничные условия . . . . .	41
2.5. Сопряженная функция (ценность) . . . . .	43
2.6. Сопряженное уравнение . . . . .	47
2.7. Задачи с сокращенным числом переменных . . . . .	52
2.8. Сохранение ценности . . . . .	56
2.9. Контрибутоны . . . . .	59
2.10. Каскадные процессы в атмосфере . . . . .	62
2.11. Метод функций Грина и теорема взаимности . . . . .	66
<b>Глава 3. Линейная стохастическая ценность</b>	<b>69</b>
3.1. ЛСЦ частицы в неразмножающей среде . . . . .	69

3.2.	Начальные и граничные условия. Примеры аддитивных функционалов . . . . .	72
3.3.	Некоторые частные случаи уравнений для ЛСЦ . . . . .	75
3.4.	Флуктуации числа столкновений в однородной среде . . . . .	77
3.5.	Кумулятивная ценность . . . . .	82
3.6.	Уравнение для функции распределения ЛСЦ каскадного процесса . . . . .	85
3.7.	Уравнения для ковариационной матрицы векторной ЛСЦ . . . . .	89
<b>Глава 4.</b>	<b>Нелинейная стохастическая ценность</b>	<b>95</b>
4.1.	Понятие нелинейной ценности . . . . .	95
4.2.	Математическое ожидание показания неаддитивного детектора . . . . .	96
4.3.	Нелинейная ценность одной частицы в неразмножающейся среде . . . . .	98
4.4.	Метод поливариантного разложения . . . . .	101
4.5.	Пуассоновский поток . . . . .	105
4.6.	Нелинейная ценность в теории метода Монте-Карло . . . . .	111
4.7.	Метод коррелированных оценок . . . . .	115
4.8.	Мультипликативная ценность частицы в размножающейся среде . . . . .	126
4.9.	Производящие функционалы в каскадной теории . . . . .	128
4.10.	Метод ковариационной матрицы . . . . .	132
<b>Глава 5.</b>	<b>Стохастическая ценность в случайной среде</b>	<b>135</b>
5.1.	Понятие случайной среды . . . . .	135
5.2.	Рандомизация среды методом сдвига . . . . .	139
5.3.	Стохастическая ценность в случайной среде . . . . .	142
5.4.	Гауссова (нормальная) среда . . . . .	145
5.5.	Однородная среда с включениями конечных размеров . . . . .	148
5.6.	Пуассоновская модель точечных включений . . . . .	153
5.7.	Среда марковского типа . . . . .	158
5.8.	Фазонная интерпретация марковской среды . . . . .	163
5.9.	Квазистационарная среда . . . . .	169
5.10.	Рассеяние и размножение частиц в случайной среде . . . . .	174
<b>Глава 6.</b>	<b>Элементы теории чувствительности</b>	<b>181</b>
6.1.	Понятие чувствительности . . . . .	181
6.2.	Функциональная и параметрическая чувствительность . . . . .	183

6.3. Коэффициенты чувствительности . . . . .	186
6.4. Барометрические коэффициенты нейтронного монитора . . .	190
6.5. Температурные коэффициенты мюонной компоненты . . . .	193
6.6. Температурный эффект электронной компоненты ЭФК и ШАЛ . . . . .	201

<b>Глава 7. Чувствительность показаний подземных детекторов мюонов к вариациям спектра частиц на уровне моря</b>	<b>217</b>
7.1. Вводные замечания . . . . .	217
7.2. Спектр мюонов на уровне моря и потери энергии мюонов в веществе . . . . .	218
7.3. Численный метод решения сопряженного уравнения пере- носа мюонов . . . . .	221
7.4. Анализ сходимости метода решения сопряженного уравнения	226
7.5. Спектр мюонов на уровне моря по данным подземных экс- периментов . . . . .	232

<b>Глава 8. Вариации характеристик ЭФК, развивающихся в фо- тонном поле</b>	<b>239</b>
8.1. ЭФК в фотонном поле . . . . .	239
8.2. Сечение взаимодействия электронов и гамма-квантов с фо- тонным полем . . . . .	242
8.3. Характеристики ЭФК в моноэнергетическом фотонном поле	245
8.4. Метод расчета вариаций . . . . .	252
8.5. Вариации плотности без изменения формы спектра фотон- ного поля . . . . .	255
8.6. Чувствительность характеристик ЭФК к изменению струк- туры фотонного поля . . . . .	256
8.7. Спектры гамма-квантов ЯАГ и их вариации в каскадной модели . . . . .	265

<b>Библиографический список</b>	<b>273</b>
---------------------------------	------------

Научное издание

Лагутин Анатолий Алексеевич  
Учайкин Владимир Васильевич

**Метод сопряженных уравнений в теории переноса  
космических лучей высоких энергий**

Монография

Оригинал-макет подготовлен и отпечатан в пакете  $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$

---

Подписано к печати 04.03.2013.

Формат 60x90/16.

Печать офсетная.

Печ. л. 17,23

Тираж 100 экз.

Заказ 1341.

---

Отпечатано в типографии «Концепт»: Барнаул,  
пр-т Социалистический, 85

---