

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
Одесский государственный экологический университет.

А. В. Глушков

**ПРОБЛЕМЫ
ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

**ОПТИМАЛЬНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ
МЕТОДЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ
И РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ
(ФИЗИКА ПРОЦЕССОВ)**

Монография

Одесса
«Экология»
2013

УДК 539.184:535.3
ББК 22.343
Г55

Изложено современное состояние физики разделения изотопов в свете проблем радиационно-экологической безопасности атомной энергетики, связанных с выбросом в окружающую среду радиоактивных отходов атомной энергетики. Разработаны принципиально новые теоретические методы оптимального лазерно-фотоионизационного детектирования и разделения изотопов и изомеров, в т. ч. радиоактивных, базирующиеся на методах теории оптимального управления и новых последовательных квантовых подходах к описанию характеристик атомов, радиоактивных изотопов (изомеров) во внешнем электромагнитном поле (поле лазерного излучения), а также в радиационно-столкновительных процессах.

Издание подготовлено в рамках проекта 511390-TEMPUS-1-2010-1-SK-TEMPUS-JPCR «Система управления для учебных программ, связанных с изучением окружающей среды».

Проект финансируется при поддержке Европейской Комиссии. Содержание данной публикации является предметом ответственности автора и не отражает точку зрения Европейской Комиссии.

Рецензенты:

д.ф.-м.н., проф. **В.Н. Павлович** (Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев);

д.ф.-м.н., проф. **В.Н. Ващенко** (Государственная экологическая академия последипломного образования и управления, Киев);

д.ф.-м.н., проф. **В.Г. Шевчук** (Одесский национальный университет имени И. И. Мечникова)

Печатается по решению Учёного совета Одесского государственного экологического университета (*протокол № 10 от 25.10.2012 г.*)

ISBN 978—966—7046—05—8

© Одесский государственный
экологический университет, 2013
© Глушков А. В., 2013

*Памяти выдающегося советского
и российского физика-оптика
Владилена Степановича Летохова*



ОГЛАВЛЕНИЕ

стр.

Памяти выдающегося советского и российского физика-оптика Владилена Степановича Летохова.....	3
Некоторые обозначения и список сокращений.....	8
ВВЕДЕНИЕ.....	9
РАЗДЕЛ I. РАЗДЕЛЕНИЕ ИЗОТОПОВ И ЯДЕРНЫХ ИЗОМЕРОВ В СВЕТЕ СОВРЕМЕННЫХ ПРОБЛЕМ РАДИАЦИОННО- ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ...	15
1.1. Введение.....	15
1.2. Классификация радиоактивных отходов.....	17
1.3. Техногенные радионуклиды в атмосфере и океане.....	28
1.4. Трансмутация радиоактивных отходов и методы лазерного разделения изотопов.....	34
РАЗДЕЛ II. КЛАССИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА СЕЛЕКТИВНОЙ ФОТОФИЗИКИ: ЛАЗЕРНЫЙ ФОТОИОНИЗАЦИОННЫЙ МЕТОД....	41
2.1. Введение.....	41
2.2. Характеристика классических методов разделения изотопов.....	44
2.2.1 Вводные замечания.....	44
2.2.2 Молекулярно-кинетические методы разделения изотопов.....	46
2.2.2.1 Газовая диффузия через пористые перегородки (фильтры).....	46
2.2.2.2 Метод масс-диффузии (диффузия в потоке пара).....	48
2.2.2.3 Метод термодиффузии.....	49
2.2.2.4 Методы электролиза воды и миграции ионов.....	50
2.2.2.5 Метод центрифугирования.....	51
2.2.3 Физико-химические методы разделения изотопов.....	52
2.2.4 Электромагнитные методы разделения изотопов.....	53
2.2.4.1 Собственно электромагнитный метод.....	53
2.2.4.2 Методы ионного циклотронного резонанса и плазменного разделения изотопов.....	56
2.3. Характеристика лазерных методов разделения изотопов.....	57
2.3.1 Вводные замечания.....	57
2.3.2 Общие достоинства и недостатки современных лазерных схем разделения изотопов.....	62
2.3.3 Схемы многоступенчатой лазерной фотоионизации: Физика элементарных атомных процессов.....	65
2.3.4 Схемы многоступенчатой лазерной фотоионизации: Критерии оптимальности и эффективности. Механизмы автоионизации и ионизации электрическим полем и столкновительной ионизации возбужденных атомов.....	69

2.3.5	Обзор экспериментов по реализации схем многоступенчатой селективной ионизации атомов лазерным излучением.....	74
2.4.	Обзор методов расчета характеристик различных резонансов в спектрах атомных систем и столкновительных процессов с участием электронов и атомов.....	76
2.5.	Актуальные проблемы физики лазерно-фотоионизационных процессов в установках для разделения изотопов. Заключительные замечания.....	82

РАЗДЕЛ III. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФИЗИКИ АТОМНЫХ ЛАЗЕРНО-ФОТОИОНИЗАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОСТОЯННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ И НОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СХЕМ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ. НОВЫЙ РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ПОДХОД К РАСЧЕТУ ШТАРКОВСКИХ И АВТОИОНИЗАЦИОННЫХ РЕЗОНАНСОВ ДЛЯ АТОМОВ В ПОЛЕ.....			85
3.1.	Введение. Теория расчета характеристик штарковских резонансов в постоянном электрическом поле.....	85	
3.2.	Новый релятивистский метод расчета штарковских и автоионизационных резонансов в спектрах многоэлектронных атомов в электрическом поле.....	91	
3.2.1	Обобщенный метод операторной теории возмущений Глушкова-Иванова для многоэлектронного атома в электрическом поле.....	91	
3.2.2	Новый релятивистский подход к расчету энергий и ширин штарковских резонансов.....	101	
3.2.2.1	Вводные замечания.....	101	
3.2.2.2	Основные уравнения.....	103	
3.3.	Аппарат релятивистской многочастичной ТВ многоэлектронной атомной системы в постоянном электрическом поле.....	107	
3.4.	Новый подход к расчету характеристик многоэлектронных атомов в переменном электрическом поле.....	114	
3.4.1	Вводные замечания.....	114	
3.4.2	Гамильтониан атома в электромагнитном поле. Метод квазиэнергий и теорема Флоке.....	115	
3.4.3	Метод комплексных координат для многоэлектронных ридберговских атомов в электромагнитном поле.....	120	
3.5.	Результаты расчета энергий и ширин штарковских резонансов для щелочных атомов в постоянном электрическом поле.....	124	
3.5.1	Ридберговский атом лития в электрическом поле.....	124	
3.5.2	Результаты расчета энергий и ширин штарковских резонансов для щелочных атомов натрия и рубидия в постоянном электрическом поле.....	130	
3.5.3	Результаты расчета энергий и ширин штарковских резонансов для щелочных атомов калия и цезия в постоянном электрическом поле.....	132	

3.5.4	Эффект скейлинга для околопороговых и подпороговых штарковских резонансов.....	133
3.6.	Атом в световом и электрическом полях. Селективная ионизация для атомов щелочных элементов.....	137
3.7.	Результаты расчета характеристик автоионизационных резонансов в электрическом поле для тяжелых атомов: Изотопы Gd, Tm, Yb, U.....	146
3.7.1	Автоионизационные резонансы в спектре атома Tm в электрическом поле. Эффект гигантского уширения автоионизационных резонансов реориентационного типа в поле....	147
3.7.2	Автоионизационные резонансы в спектре атома Gd в электрическом поле.....	152
3.7.3	Автоионизационные резонансы в спектре атома Yb в электрическом поле.....	155
3.7.4	Автоионизационные резонансы в спектре атома U в электрическом поле. Эффект гигантского уширения автоионизационных резонансов.....	160
3.8.	Результаты расчета характеристик ридберговских атомов водорода и лития в переменном электромагнитном поле.....	165
3.8.1	Ридберговский атом водорода в переменном электромагнитном поле.....	165
3.8.2	Ридберговские атомы лития и рубидия в микроволновом поле.....	172
3.9.	Атом в скрещенных электрическом и магнитном полях.....	179
3.10.	Заключительные замечания к разделу III.....	190

РАЗДЕЛ IV. СТОЛКНОВИТЕЛЬНЫЕ ИОНИЗАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ СЕЛЕКТИВНОЙ ИОНИЗАЦИИ АТОМОВ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ: НОВЫЙ ПОДХОД К РАСЧЕТУ МЕЖАТОМНЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ, СЕЧЕНИЙ СТОЛКНОВЕНИЙ И ИОНИЗАЦИИ.....		194
4.1.	Характеристика столкновительных процессов при многоступенчатой селективной ионизации атомов.....	194
4.2.	Новый квантово-механический подход к расчету столкновительных процессов при многоступенчатой селективной ионизации атомов.....	201
4.2.1	Схема расчета столкновительных процессов на основе формализма T матрицы столкновений.....	201
4.2.2	Теория возмущений с модельным псевдопотенциалом нулевого приближения для расчета двухатомных систем.....	205
4.2.3	Метод эффективного псевдопотенциала определения межатомных потенциалов в задачах расчета столкновительной ионизации по сценарию “захват электрона”.....	214
4.3.	Результаты расчета характеристик (сечений ионизации) процессов столкновительной ионизации возбужденных атомов в схемах селективной фотоионизации атомов.....	220

4.4. Пеннинговская и стохастическая столкновительная ионизация атомов: последовательный квантовый подход.....	222
4.5. Заключительные замечания к разделу IV.....	230

РАЗДЕЛ V. ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ИОНИЗАЦИИ АТОМОВ В СХЕМАХ ЛАЗЕРНО-ФОТОИОНИЗАЦИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ..... 231

5.1. Постановка задачи оптимального управления процессами селективной фотоионизации атомов.....	231
5.2. Оптимизационная модель селективной ионизации атомов лазерным излучением с ионизацией импульсным электрическим полем (через автоионизационные резонансы) и столкновительной ионизацией.....	232
5.3. Расчет оптимальной схемы селективной ионизации атомов лазерным излучением с ионизацией импульсным электрическим полем (через автоионизационные резонансы) и столкновительной ионизацией.....	235
5.4. Численное моделирование процесса ионизации атома в задачах лазерного контроля и очистки вещества на атомном уровне.....	243
5.5. Оптимальные схемы лазерного разделения изотопов Yb, U на основе схем ионизации атомов лазерным и электрическим полями.....	252

ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... 259

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ..... 262

ОГЛАВЛЕНИЕ..... 316

Глушков, А. В.

Г55 Проблемы экологической безопасности : Оптимальные лазерные методы детектирования и разделения изотопов (физика процессов) : монография / А. В. Глушков ; МОН Украины ; Одес. гос. эколог. ун-т. — Одесса : Экология, 2013. — 324 с.

ISBN 978-966-7046-05-8

Изложено современное состояние физики разделения изотопов в свете проблем радиационно-экологической безопасности атомной энергетики, связанных с выбросом в окружающую среду радиоактивных отходов атомной энергетики. Разработаны принципиально новые теоретические методы оптимального лазерно-фотоионизационного детектирования и разделения изотопов и изомеров, в т. ч. радиоактивных, базирующиеся на методах теории оптимального управления и новых последовательных квантовых подходах к описанию характеристик атомов, радиоактивных изотопов (изомеров) во внешнем электромагнитном поле (поле лазерного излучения), а также в радиационно-столкновительных процессах.

УДК 539.184:535.3
ББК 22.343

State-of-the-art of the Isotope Separation Physics is presented from the point of view of radiation and environmental safety problems of atomic power engineering, related to emissions of the respective radioactive wastes into the environment. Principally new theoretical methods for optimal laser-photoionization detection and separation of the isotopes and isomers (including radioactive ones), based on the optimal governing theory methods and new consistent quantum approaches to the description of atoms and radioactive isotopes (isomers) in an external electromagnetic field (a laser radiation field) and radiation-collisional processes, are elaborated.

The publication is prepared within the framework of 511390-TEMPUS-1-2010-1-SK-TEMPUS-JPCR 'Environmental Governance for Environmental Curricula' EC TEMPUS IV project.

This project has been funded with support from the European Commission. This publication reflects the views only of the author, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.

Викладено сучасний стан фізики розподілу ізотопів у світлі проблем радіаційно-екологічної безпеки атомної енергетики, пов'язаних з викидами у навколишнє середовище радіоактивних відходів атомної енергетики. Розроблені принципово нові теоретичні методи оптимального лазерно-фотоіонізаційного детектування та розподілу ізотопів та ізотопів, у т. ч. радіоактивних, які базуються на методах теорії оптимального керування та нових послідовних квантових підходах до опису характеристик атомів, радіоактивних ізотопів (ізотопів) у зовнішньому електромагнітному полі (полі лазерного випромінювання), а також у радіаційних процесах із зіткненнями.

Видання підготовлено в рамках проекту 511390-TEMPUS-1-2010-1-SK-TEMPUS-JPCR «Система управління для навчальних програм, пов'язаних із вивченням навколишнього середовища».

Проект фінансується за підтримки Європейської Комісії. Зміст даної публікації є предметом відповідальності автора і не відображає точку зору Європейської Комісії.

Наукове видання

ГЛУШКОВ Олександр Васильович
доктор фіз.-мат. наук, професор

**ПРОБЛЕМИ
ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ**

**ОПТИМАЛЬНІ ЛАЗЕРНІ
МЕТОДИ ДЕТЕКТУВАННЯ
ТА РОЗПОДІЛУ ІЗОТОПІВ
(ФІЗИКА ПРОЦЕСІВ)**

Монографія

Російською мовою

Надруковано в авторській редакції з готового оригінал-макета

Підписано до друку 30.05.2013. Формат 60x84/16. Папір офсетний.
Гарнітура «Таймс». Друк офсетний. Ум. друк. арк. 18,89.
Тираж 100 прим. Вид. № 20. Зам. № 105.

Одеський державний екологічний університет
65016, Одеса, вул. Львівська, 15

Друкарня видавництва «Екологія»
65045, м. Одеса, вул. Базарна, 106, к. 313
Тел.: (0482) 33-07-18, 37-07-95, 37-15-27

www.fotoalbum-odessa.com

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1873 від 20.07.2004 р.