

Министерство образования и науки РФ

ПРОГРАММА-МИНИМУМ

кандидатского экзамена по специальности

02.00.09

(код специальности)

«ХИМИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ»

(название специальности)

«Физико-математические науки»

(отрасль наук)

Учреждение разработчика программы: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Факультет: химический факультет

Разработчики:

Фельдман В.И. - профессор,
доктор химических наук

Мельников М.Я. - профессор,
доктор химических наук

Москва 2012 г.

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
Введение.....	4
Программа 02.00.09 «Химия высоких энергий» (физико-математические науки).....	5
1. Общая характеристика химии высоких энергий.....	5
1.1. Предмет химии высоких энергий. Основные понятия и определения.....	5
1.2. Методы инициирования химических реакций и основные направления химии высоких энергий.....	5
1.3. Термодинамические аспекты химии высоких энергий.....	5
1.4. Временная шкала процессов в химии высоких энергий.....	5
2. Взаимодействие излучения с веществом.....	5
2.1. Поглощение света.....	5
2.2. Основы фотофизики.....	6
2.3. Взаимодействие заряженных частиц с веществом.....	6
2.4. Взаимодействие ионизирующего электромагнитного излучения с веществом.....	6
2.5. Пространственное распределение событий ионизации, формирование и эволюция радиационно-индуцированных наноструктур.....	6
2.6. Эффекты в оптически-неоднородных средах.....	6
2.7. Взаимодействие лазерного излучения с веществом.....	7
3. Элементарные процессы в химии высоких энергий.....	7
3.1. Общие представления о кинетике элементарных процессов. Роль среды.....	7
3.2. Основные первичные интермедиаты процессов химии высоких энергий.....	7
3.3. Локализация избыточных электронов в конденсированных средах. Сольватированные и стабилизированные электроны.....	8
3.4. Элементарные процессы в низкотемпературной плазме.....	8
3.5. Макрокинетика. Рекомбинационно-диффузионная модель.....	8
3.6. Кинетика фотопроцессов.....	8
3.7. Установление механизма фотохимических реакций.....	8
4. Экспериментальные методы химии высоких энергий.....	8
4.1. Методы инициирования химических процессов. Источники излучений.....	8
4.2. Методы исследования процессов химии высоких энергий.....	9
5. Теоретическое моделирование процессов химии высоких энергий.....	9
6. Основы фотохимии и радиационной химии.....	9

6.1 Особенности фотохимических реакций.....	9
6.2. Классификация фотохимических реакций.....	9
6.3. Окислительно-восстановительные фотохимические реакции (реакции фотопереноса электрона).....	10
6.4. Реакции фотодиссоциации.....	10
6.5. Кислотно-основные фотохимические реакции.....	10
6.6. Основы радиационной химии молекулярных систем	10
6.7. Основы радиационной химии твердого тела	10
6.8. Радиационно-индуцированные процессы в гетерогенных системах	11
6.9. Основы радиационной химии макромолекул и биомолекул	11
7. Прикладные аспекты химии высоких энергий.....	11
7.1. Прикладные аспекты фотохимии.....	11
7.2. Радиационное и плазменное модифицирование материалов	11
7.3. Получение наноструктур и наноматериалов с помощью методов химии высоких энергий	12
7.4. Основы светостойкости, радиационной стойкости и радиационной стабилизации материалов.....	12
8. Литература основная.....	12
9. Литература дополнительная.....	13

Введение

Специальность 02.00.09 – «Химия высоких энергий» является междисциплинарным научным направлением, которое изучает химические процессы в веществе, протекающие при воздействии носителей нетепловой энергии. Принципиальные особенности этого направления связаны с существенно неравновесным характером первичных химических процессов и неоднородностью пространственного распределения активных частиц. Предметом химии высоких энергий являются изучение механизмов взаимодействия носителей нетепловой энергии с веществом, строения, свойств и пространственного распределения первичных продуктов химических превращений, кинетики и механизма химических процессов, протекающих на различных стадиях, а также разработка и оптимизация технологий, использующих эти процессы. В обобщенном смысле к химии высоких относят ряд самостоятельных направлений химической науки (радиационная химия, фотохимия, плазмохимия, лазерная химия, механохимия и др.). В настоящей программе основное внимание уделяется фотохимии и радиационной химии как наиболее разработанным областям, имеющим ключевое значения для понимания и практического использования процессов химии высоких энергий.

Программа кандидатского экзамена по специальности 02.00.09 – «Химия высоких энергий» (физико-математические науки) составлена в соответствии с паспортом данной специальности, разработанным экспертным советом Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки РФ.

ПРОГРАММА

02.00.09 «Химия высоких энергий» (физико-математические науки)

1. Общая характеристика химии высоких энергий

1.1. Предмет химии высоких энергий. Основные понятия и определения.

Энергетическая шкала в химии. Предмет и методы химии высоких энергий.

Основные понятия химии высоких энергий, физические величины и единицы их измерения. Поглощенная доза как основная характеристика энергии, переданной веществу. Мощность поглощенной дозы. Связь между поглощенной и экспозиционной дозой.

Эффективность использования поглощенной энергии для химических превращений. Квантовый выход и радиационно-химический выход, связь между ними. Обобщенный энергетический выход.

1.2. Методы инициирования химических реакций и основные направления химии высоких энергий.

Методы нетермической активации химических реакций их классификация. Общая характеристика основных направлений химии высоких энергий (фотохимия, радиационная химия, плазмохимия, лазерная химия, механохимия, сонохимия, химия горячих атомов).

1.3. Термодинамические аспекты химии высоких энергий.

Сопоставление термической химии и химии высоких энергий. Неравновесность как фундаментальная особенность химии высоких энергий. «Температура подсистемы» и «локальная температура». Роль локальных возбуждений («горячих пятен»).

Передача энергии между подсистемами. Релаксационные процессы. Химическая реакция как один из конкурирующих каналов релаксации.

1.4. Временная шкала процессов в химии высоких энергий.

Характерные времена элементарных процессов в химии высоких энергий. Критерии выделения физической, физико-химической и химической стадии. Гомогенизация распределения (расплывание «горячих пятен»), роль релаксационных и диффузионных процессов. Влияние агрегатного состояния вещества на временную шкалу процессов в химии высоких энергий.

2. Взаимодействие излучения с веществом.

2.1. Поглощение света.

Волновые и корпускулярные свойства света и их проявление. Длина волны излучения, частота и волновое число. Энергия кванта света.

Поглощение и пропускание. Закон Бугера-Ламберта-Бееера. Оптическая плотность, коэффициент молярного поглощения. Интенсивность поглощенного света. Поглощение в светорассеивающей среде.

Энергия молекулы. Электронные, колебательные и вращательные состояния. Интенсивность электронных переходов, сила осциллятора. Правила отбора. Спиновая мультиплетность; синглетные и триплетные состояния. Классификация электронных

переходов и электронно-возбужденных состояний. Энергетическая диаграмма состояний (Диаграмма Яблонского).

2.2. Основы фотофизики.

Классификация излучательных процессов дезактивации электронно-возбужденных состояний. Флуоресценция, фосфоресценция, замедленная флуоресценция и ее виды. Характеристики излучательных процессов дезактивации.

Классификация безызлучательных процессов дезактивации электронно-возбужденных состояний. Внутренняя конверсия. Интеркомбинационная конверсия. Колебательная релаксация.

Спин-орбитальное взаимодействие. Эффект тяжелого атома. Безызлучательный перенос энергии электронного возбуждения. Индуктивно-резонансный и обменно-резонансный перенос энергии.

2.3. Взаимодействие заряженных частиц с веществом.

Основные механизмы взаимодействия заряженных частиц с веществом. Ионизация и возбуждение молекул среды (ионизационные потери энергии). Зависимость ионизационных потерь от энергии и массы заряженной частицы. Учет релятивистских эффектов. Формула Бете.

Линейная и массовая тормозная способность вещества. Пролет заряженных частиц. Линейная передача энергии излучения среде (ЛПЭ).

Прохождение заряженных частиц через слои конечной толщины. Методы расчета распределения дозы по толщине образца.

2.4. Взаимодействие ионизирующего электромагнитного излучения с веществом.

Основные механизмы взаимодействия высокоэнергетических фотонов с веществом (фотоэффект, эффект Комптона, эффект образования пар). Зависимость сечения взаимодействия от энергии фотона для различных механизмов.

Линейный и массовый коэффициенты ослабления излучения. Массовый коэффициент поглощения и его зависимость от природы поглотителя. Роль вторичных электронов. Обобщение понятия ЛПЭ для электромагнитного излучения.

2.5. Пространственное распределение событий ионизации, формирование и эволюция радиационно-индуцированных наноструктур.

Распределение вторичных электронов по энергиям и пространственное распределение событий ионизации при действии ионизирующих излучений на плотные среды. Формирование радиационно-индуцированных трековых наноструктур. Классификация трековых образований (шпоры, блобы, короткие и разветвленные треки). Влияние величины ЛПЭ на пространственное распределение событий ионизации.

Пространственно-временная эволюция трековых наноструктур. Время жизни треков, их физические и химические проявления в жидкостях и твердых телах.

2.6. Эффекты в оптически-неоднородных средах.

Отражение и преломление света на границе раздела оптических сред. Представления о градиентных средах. Интерференция света между рассеянными,

отражёнными и преломлёнными световыми волнами, а также падающей волной при прохождении оптически-неоднородных сред. Элементы оптики тонких слоев - пропускание/отражение (пленки диэлектриков и металлов). Диффузное отражение света (основы теории Кубелки— Мунка). Рассеяние на металлических сферах (основы теории Ми). Рассеяние Рэлея. Рассеяние Гиндаля.

2.7. Взаимодействие лазерного излучения с веществом.

Основы нелинейной оптики - нелинейная поляризуемость, уравнение Максвелла в оптически-нелинейной среде. Насыщение оптического перехода. ИК резонансная, селективная фотохимия молекул (колебательный квази-континуум, стохастизация колебательной энергии, фотоионизация и фотодиссоциация молекулы в мощном электромагнитном поле). Условие обмена энергией при взаимодействии волн в оптически нелинейной среде (синхронизм). Самофокусировка. Многофотонное поглощение света. Многоквантовый фотоэффект и многофотонные фотохимические реакции (диссоциации, ионизации). Фотомеханические эффекты: термоэластический эффект ниже порога абляции; механизмы абляции, генерация звуковых и ударных волн. Взаимодействие молекул с лазерным излучением фемтосекундной длительности (волновые пакеты, динамика молекулярных колебаний и элементарные акты химической реакции).

3. Элементарные процессы в химии высоких энергий.

3.1. Общие представления о кинетике элементарных процессов. Роль среды.

Динамика фотоиндуцированных и радиационно-индуцированных процессов в фемтосекундном диапазоне.

Кинетика фотопроцессов. Скорость дезактивации электронно-возбужденных состояний. Способы нахождения констант скорости основных фотофизических процессов. Квантовый выход флуоресценции и фосфоресценции.

Кинетика тушения электронно-возбужденных состояний. Уравнение Штерна-Фольмера. Статическое и динамическое тушение.

Квантовый выход фотохимических реакций. Дифференциальный и интегральный квантовый выход. Квантовый выход последовательных и параллельных фотореакций.

Скорость фотохимических реакций. Нахождение квантового выхода фотореакций из кинетических данных. Порядок фотохимических реакций. Способы нахождения констант скорости фотохимических реакций.

Влияние неоднородности начального пространственного распределения на кинетику процессов химии высоких энергий. Особенности макрокинетики фотохимических и радиационно-химических процессов.

Методы описания кинетики ранних стадий радиационно-химических процессов в жидкостях. Рекомбинационно-диффузионная модель. Определение параметров шпор и треков из экспериментальных данных.

3.2. Основные первичные интермедиаты процессов химии высоких энергий.

Механизмы образования электронно-возбужденных состояний в различных процессах химии высоких энергий. Особенности электронно-возбужденных состояний, возникающих в радиационно-химических процессах.

Катион-радикалы (молекулярные положительные ионы) как ключевые первичные интермедиаты радиационно-химических процессов. Общие представления об электронном строении и методах исследования катион-радикалов. Катион-радикалы в

конденсированных средах. Передача заряда, ион-электронная рекомбинация. Основные типы химических реакций катион-радикалов.

Образование анион-радикалов в фотохимических и радиационно-химических процессах. Общие представления о строении и свойствах анион-радикалов.

Образование нейтральных радикалов в процессах химии высоких энергий. Методы исследования и основные типы реакций нейтральных радикалов. Акцепторы радикалов.

3.3. Локализация избыточных электронов в конденсированных средах.

Сольватированные и стабилизированные электроны.

Судьба неионизирующих вторичных электронов в конденсированных средах. Механизмы потерь энергии, длина термализации.

Квазисвободные и локализованные электроны в диэлектрических средах. Поляроны. Критерии локализации электронов.

Образование сольватированных и захваченных электронов в молекулярных конденсированных средах. Влияние среды на характеристики сольватированных электронов.

Модели сольватированных электронов (континуальные и конфигурационные). Времена сольватации электронов в жидкостях и стеклах. Эксперименты в фемтосекундном и пикосекундном диапазонах. Динамика сольватации электронов, связь с молекулярной динамикой растворителя.

Гидратированный электрон. Экспериментальное обнаружение и спектральные проявления (оптический спектр и спектр ЭПР). Термодинамические свойства гидратированного электрона (стандартный потенциал, энергия гидратации). Подвижность и коэффициент диффузии. Особенности кинетики реакций гидратированного электрона.

3.4. Элементарные процессы в низкотемпературной плазме.

Процессы упругого рассеяния и резонансные процессы. Процессы неупругих соударений электронов с атомными частицами. Процессы неупругого рассеяния атомных частиц. Процессы рекомбинации заряженных частиц.

Упругое рассеяние электронов на атоме. Возбуждение атома электронным ударом. Возбуждение колебательных и вращательных состояний молекул электронным ударом. Ионизация атомов электронным ударом.

Фотоионизация и фоторекомбинация атомов в низкотемпературной плазме. Процессы, протекающие через автоионизационное состояние. Диссоциативная рекомбинация электронов и молекулярных ионов.

Резонансная перезарядка на атоме. Ионно-молекулярные реакции, фрагментация ионов. Подвижность и диффузия ионов в газах. Процессы с участием возбужденных атомов. Процессы с участием эксимерных молекул. Столкновения с участием колебательно-возбужденных молекул. Резонансная перезарядка отрицательных ионов. Рекомбинация положительных и отрицательных ионов.

4. Экспериментальные методы химии высоких энергий.

4.1. Методы инициирования химических процессов. Источники излучений.

Источники света для фотохимических исследований и технологий. Способы монохроматизации света.

Источники ионизирующих излучений. Изотопные и аппаратные источники. Краткая характеристика изотопных источников. Источники рентгеновского излучения.

Ускорители электронов, принципы действия, классификация и области применения. Ускорители тяжелых заряженных частиц.

Генераторы низкотемпературной плазмы (плазмотроны): основные типы, возможности и области применения.

Эргометрия в химии высоких энергий. Актинометрия света и дозиметрия ионизирующих излучений. Физические и химические методы актинометрии и дозиметрии. Ионизационная и калориметрическая дозиметрия. Важнейшие типы химических дозиметров и актинометров (дозиметр Фрикке, ферриоксалатный актинометр).

4.2. Методы исследования процессов химии высоких энергий.

Общая характеристика методов и подходов; временное разрешение, чувствительность и информативность.

Импульсный фотолиз и импульсный радиолиз. Методы регистрации. Особенности эксперимента в пикосекундном и фемтосекундном диапазонах. Времяразрешенная ИК-спектроскопия.

Низкотемпературная стабилизация и матричная изоляция. Инертные и специфические матрицы.

Использование метода ЭПР в химии высоких энергий. Понятие о методах спиновой химии. Химическая поляризация электронов и ядер. Магнитный резонанс, детектируемый по выходу продуктов реакции. Оптически детектируемый ЭПР.

Люминесцентные методы (спектры люминесценции, кинетика люминесценции, поляризация люминесценции). Фотоселекция и фотоориентация.

Спектроскопия аннигиляции позитронов, возможности использования для изучения радиационно-химических процессов.

Химические (косвенные) методы исследований. Метод акцептора. Метод спиновых ловушек.

5. Теоретическое моделирование процессов химии высоких энергий.

Использование методов квантовой химии и молекулярной динамики для моделирования процессов химии высоких энергий.

Моделирование макрокинетики реакций в условиях неоднородного пространственного распределения активных частиц. Определение параметров шпор и треков.

6. Основы фотохимии и радиационной химии.

6.1 Особенности фотохимических реакций.

Законы фотохимии. Закон Гроткуса-Дрепера. Закон Штарка-Эйнштейна. Глубина протекания реакций. Кривые потенциальной энергии молекулы в основном и электронно-возбужденном состояниях.

Свойства молекул, изменяющиеся при возбуждении. Потенциал ионизации и сродство к электрону. Кислотно-основные свойства молекул. Цикл Ферстера-Веллера. Дипольный момент и геометрия молекул. Реакционная способность молекул в возбужденном состоянии. Синглетно-возбужденные и триплетные состояния.

Фотореакции в газовой и конденсированной фазе. Клеточный эффект. Специфика фотореакций в твердых матрицах. Влияние среды на направление протекания реакции. Сольватация.

6.2. Классификация фотохимических реакций.

Адиабатические и диабатические реакции. Одно- и двухквантовые фотореакции. Фотосенсибилизированные реакции. Механизмы фотосенсибилизации. Перенос энергии. Цепные фотореакции.

6.3. Окислительно-восстановительные фотохимические реакции (реакции фотопереноса электрона).

Прямая фотоионизация в газовой и конденсированной фазе. Преионизация. Двухфотонная ионизация. Взаимодействие возбужденных молекул с донорами и акцепторами электрона в газовой, жидкой и твердой фазе. Туннелирование электрона. Образование эксиплексов и ион-радикалов. Скорость реакции фотопереноса электрона. Зависимость константы скорости реакции от изменения термодинамического потенциала Гиббса. Соотношения свободных энергий Маркуса и Рэма-Веллера. Диффузионная и кинетическая области. Комплексы с переносом заряда. Спектральная сенсбилизация.

6.4. Реакции фотодиссоциации.

Диссоциация из связывающего состояния. Диссоциация в континуум. Преддиссоциация. Гомолитический и гетеролитический механизмы фотодиссоциации. Роль сольватации. Двухквантовый механизм фотодиссоциации.

6.5. Кислотно-основные фотохимические реакции

Адиабатические и диабатические реакции фотопереноса протона. Влияние среды и свойств реагентов на механизм и константы скорости фотопереноса протона.

6.6. Основы радиационной химии молекулярных систем.

Возбуждение и ионизация молекул. Первичные радиационно-химические процессы в молекулярных системах. Селективность радиационно-химических процессов.

Особенности радиолиза двухкомпонентных и многокомпонентных систем. Прямое и косвенное действие излучения. Электронная доля компонента. Неаддитивные эффекты.

Первичные радиационно-химические процессы в газовой фазе. Влияние давления на радиолиз газов. Радиолиз двухатомных и трехатомных газов. Радиационно-химические процессы в воздушной среде.

Радиолиз воды. Ранние стадии радиолиза. Временная шкала первичных процессов. Реакции в шпорах (негомогенная стадия). Радиационно-химические выходы продуктов радиолиза воды после завершения реакций в шпорах. Стабильные продукты. Влияние pH среды и ЛПЭ излучения на радиолиз воды. Реакционная способность основных промежуточных продуктов радиолиза воды (гидратированный электрон, гидроксильный радикал, атом водорода). Радиолиз разбавленных водных растворов. Особенности радиолиза концентрированных водных растворов.

Общая характеристика радиационно-химических превращений органических соединений. Связь между электронной структурой и механизмом радиационно-химических превращений.

Радиационная химия углеводов. Влияние структуры молекулы на соотношение разрывов C—H и C—C связей. Радиационно-иницированная полимеризация. Особенности радиолиза ароматических углеводов, причины их радиационной стойкости. Использование ароматических углеводов в качестве антирадов.

Общие представления о радиационной химии функциональных органических соединений различной структуры.

6.7. Основы радиационной химии твердого тела.

Действие излучения на ионные и ионно-ковалентные кристаллы. Типы радиационно-индуцированных дефектов и методы их исследования. Кинетика образования и отжига дефектов. Радиационные эффекты в стеклах.

Радиационная физика и химия щелочно-галоидных кристаллов. Промежуточные и конечные продукты. Физико-химические процессы при растворении облученных солей. Общие представления о радиационно-химических превращениях других ионных кристаллов (оксиды, нитраты, азиды, сульфаты).

6.8. Радиационно-индуцированные процессы в гетерогенных системах.

Общая характеристика радиационно-химических процессов в гетерогенных системах. Особенности передачи энергии. Роль электронных характеристик фаз, размерные эффекты.

Радиационная химия адсорбированных молекул, общие представления о радиационно-индуцированной адсорбции и радиационном гетерогенном катализе.

Радиационно-химические превращения в коллоидных системах различных типов. Влияние облучения на устойчивость коллоидных систем.

6.9. Основы радиационной химии макромолекул и биомолекул.

Особенности действия излучения на макромолекулы. Локализация заряда и возбуждения. Роль структурной и химической неоднородности. Радиационная чувствительность макромолекул.

Радиационно-индуцированное сшивание и деструкция макромолекул. Методы определения радиационно-химических выходов сшивания и деструкции. Изменение макроскопических свойств полимерных материалов при облучении.

Общие представления о радиационно-химических превращениях макромолекул различного строения. «Сшивающиеся» и «деструктурирующие» полимеры. Радиационно-стойкие полимеры.

Радиационная чувствительность биологических систем и роль радиационно-химических эффектов. Общие представления о радиолизе биологически важных молекул. Радиационно-химические повреждения биополимеров.

7. Прикладные аспекты химии высоких энергий.

7.1. Прикладные аспекты фотохимии.

Регистрация и обработка изображений. Фотохромизм. Голография. Лазеры. Фотобиологические процессы. Фотокатализ. Фотохимическое преобразование солнечной энергии. Фотохимические процессы в атмосфере.

7.2. Радиационное и плазменное модифицирование материалов.

Применение радиационно-инициированной полимеризации и сополимеризации. Модифицирование поверхностных свойств полимеров с помощью радиационной прививочной полимеризации. Радиационно-химическое модифицирование сшивающихся и деструктурирующих полимеров. Примеры и перспективы технологий радиационного модифицирования.

Плазмохимическое модифицирование материалов.

7.3. Получение наноструктур и наноматериалов с помощью методов химии высоких энергий.

Общие принципы использования процессов химии высоких энергий для формирования наноструктур и получения наноматериалов.

Использование первичных радиационно-индуцированных наноструктур, образующихся при действии излучений с высокими значениями ЛПЭ на полимерные материалы. Особенности физико-химических эффектов в полимерах, облученных ускоренными тяжелыми ионами. Формирование и проявление (травление) латентных треков, влияние величины ЛПЭ на их параметры. Применение трековых наноматериалов.

Образование металлических наночастиц при фотохимическом и радиационно-химическом восстановлении ионов металлов. Механизм восстановления, формирование и рост кластеров. Стабилизация наночастиц, получение нанокомпозитов.

Фотохимические и радиационно-химические аспекты микро- и нанолитографии. Принципы нанолитографии с использованием экстремального вакуумного УФ-излучения, рентгеновского облучения и электронных пучков.

Формирование наноструктур с использованием плазмохимических методов.

7.4. Основы светостойкости, радиационной стойкости и радиационной стабилизации материалов.

Фотохимическое и радиационно-химическое старение материалов. Окислительное старение. Физико-химические принципы стабилизации материалов. Фотостабилизаторы и антирады. Проблемы радиационной стойкости материалов, используемых в атомной энергетике.

Радиационные поля и радиационно-химические процессы в космическом пространстве. Радиационно-химические аспекты космического материаловедения.

8. Основная литература.

1. Бугаенко Л.Т., Кузьмин М.Г., Поллак Л.С. Химия высоких энергий. М.: Химия, 1988.
2. Барлтроп Дж., Койл Дж. Возбужденные состояния в органической химии. - М.: Мир, 1978.
3. Экспериментальные методы химии высоких энергий (под ред. М.Я.Мельникова). – М.: МГУ, 2009.
4. Лакович Дж. Основы флуоресцентной спектроскопии. – М.: Мир, 1986
5. Пикаев А.К. Современная радиационная химия. Основные положения. Экспериментальная техника и методы. М.: Наука, 1985.
6. Пикаев А.К. Современная радиационная химия. Радиолит газы и жидкостей. М.: Наука, 1986.
7. Пикаев А.К. Современная радиационная химия. Твердое тело и полимеры. Прикладные аспекты. М.: Наука, 1987.

8. Бяков В.М., Ничипоров Ф.Г. Внутритрековые химические процессы. М.: Энергоатомиздат, 1985.

9. Дополнительная литература

1. Рабек Я. Экспериментальные методы фотохимии и фотофизики. М.: Мир, 1995.