

ТАДЖИКСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

УДК: 338.9+51(575.3)

НИГОРАИ ЗАЙДУЛЛО

**ВЛИЯНИЕ МАЛЫХ ПОТОКОВ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ НА
БИОЛОГИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ БАКТЕРИЙ RHIZOBIUM PHASEOLI IS TAAS-80 TJ И
BACILLUS MEGATERIUM VAR. PHOSPHATICUM**

Диссертация на соискание учёной степени PhD по специальности
6D060504 - Прикладная ядерная физика

Научный руководитель:

д.ф.-м.н., профессор

Махсудов Барот Исломович

Душанбе-2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ	6
ГЛАВА 1. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЯДЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С БИОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ	13
1.1. Эффект “малых доз” при взаимодействии ионизирующего излучения с веществом.....	13
1.2. Взаимодействие нейтронного потока с веществом.....	23
1.3. Особенности взаимодействия малого потока тепловых нейтронов с биологическими объектами.....	41
1.4. Выводы по первой главе и постановка задач.....	46
ГЛАВА 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ	47
2.1. Методика получения бактерий <i>Rhizobium phaseoli</i> IS TAAS-80 TJ и <i>Bacillus megaterium</i> var. <i>phosphaticum</i>	47
2.2. Приборы для регистрации ИК-спектров, методика приготовления образцов для регистрации ИК-спектров, применение ИК-спектроскопии в микробиологии.....	54
2.3. Методы получения потока тепловых нейтронов.....	67
2.4. Ядерные реакции при взаимодействии нейтронов с лёгкими ядрами.....	70
2.5. Выводы по второй главе.....	72
ГЛАВА 3. ВЛИЯНИЕ МАЛЫХ ПОТОКОВ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ НА БИОЛОГИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ БАКТЕРИЙ <i>RHIZOBIUM PHASEOLI</i> IS TAAS-80 TJ И <i>BACILLUS MEGATERIUM</i> VAR. <i>PHOSPHATICUM</i>	73
3.1. Влияние малых потоков тепловых нейтронов на скорость роста бактерий <i>Rhizobium phaseoli</i> IS TAAS-80 TJ и <i>Bacillus megaterium</i> var. <i>phosphaticum</i>	73
3.2. Влияние потока тепловых нейтронов на биологическую активность гуминовых кислот.....	80

3.3. Выводы по третьей главе.....	88
ГЛАВА 4. ИК-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАЛЫХ ПОТОКОВ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ НА СВОЙСТВА БАКТЕРИЙ RHIZOBIUM PHASEOLI IS TAAS-80 TJ И BACILLUS MEGATERIUM VAR. PHOSPHATICUM.....	90
4.1. Изучение ИК-спектров бактерий Rhizobium phaseoli IS TAAS-80 TJ и Bacillus megaterium var. phosphaticum.....	90
4.2. Влияние малых потоков тепловых нейтронов на ИК-спектры бактерий Rhizobium phaseoli IS TAAS-80 TJ и Bacillus megaterium var. phosphaticum.....	98
4.3. Выводы по четвёртой главе.....	104
ВЫВОДЫ.....	107
Рекомендации по практическому использованию результатов.....	109
ЛИТЕРАТУРА.....	110
Публикации по теме диссертации.....	124

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность и необходимость проведения исследования. В настоящее время стремительно развиваются разделы науки, относящиеся к прикладным задачам ядерной физики. Это связано с широким применением ядерного излучения в медицине и биофизике. Составной частью этих исследований можно также назвать ядерную биотехнологию производства микроудобрений, которая может быть использована для увеличения быстродействия удобрений, содержащих органические вещества для дальнейшего их применения в технологии гарантированного производства сельхозпродуктов.

Исходя из этого, исследование воздействия тепловых нейтронов на различные характеристики биологических систем представляется важной научной задачей прикладной ядерной физики, которая приведёт к разработке новых способов использования достижений ядерной биотехнологии для улучшения качества микроудобрений. На основании достаточно простого биологического строения бактерий, в настоящем диссертационном исследовании исследовано изменение характеристики бактерий при воздействии на них тепловых нейтронов, в качестве основных объектов исследования выбраны штаммы бактерии рода *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*, также предложен новый способ изучения влияния малых потоков тепловых нейтронов на свойства биологических объектов.

Степень изученности научной проблемы, теоретические и методологические основы исследований. При изучении воздействия ионизирующих излучений на изменение свойств различных материалов органического и неорганического происхождения был выявлен эффект так называемых “малых доз”. Соответственно, незначительные дозы радиационных ионизирующих излучений оказывают положительное воздействие на свойства материалов, улучшая их. В частности, авторы [1] изучили воздействие γ -излучения на характеристики инжекционных полупроводниковых лазеров.

Поскольку в кристаллических решётках твёрдых тел и компонентах биологических макромолекул не происходит изменений электронных конфигураций

входящих в их состав атомов при воздействии на них тепловых нейтронов, вероятность структурных изменений в этих объектах является чрезвычайно низкой. Поэтому механизмы, согласно которым нейтроны малых энергий (<1 эВ) воздействуют на характеристики различных биологических или не биологических сред, исследованы слабо и недостаточно.

Взаимодействие нейтронов с различными веществами происходит в том случае, когда ядра атомов осуществляют радиационный захват нейтронов, которые составляют данное вещество [2]. Помимо этого, выявлены ряд процессов, которые связаны с упругим и/или неупругим рассеянием нейтронов в атомных ядрах веществ. Исходя из этого, в биологических объектах вероятности структурных превращений нейтронно-стимулированных типов находятся в зависимостях от сечений захватов нейтронов различными атомными ядрами различных веществ. По мнению [3], сечения захватов тепловых нейтронов атомными ядрами значительно выше по сравнению с нейтронами высоких энергий.

Изучению воздействия тепловых нейтронов на характеристики биологических систем посвящено достаточно большое количество работ, но в целом данная проблема является слабоизученной [4, 5]. Известным фактом является то, что практически все биологические объекты постоянно подвержены влиянию на них малых потоков тепловых нейтронов, особенно это характерно при полётах в космическом пространстве или в стратосфере. Биологические объекты на земной поверхности облучаются за счёт тепловых нейтронов, это происходит в результате взаимодействия атмосферы с космическими лучами, после данного взаимодействия возникают различные элементарные частицы, в том числе возникают нейтроны (в виде широких атмосферных ливней). Исходя из этого, исследование воздействия тепловых нейтронов на различные характеристики биологических систем представляет собой интересную научную задачу.

Так, авторами [5] исследовано воздействие малого потока тепловых нейтронов на биологические характеристики макромолекулы ДНК и их структурные трансформации, а также изучено влияние потока тепловых нейтронов на выживаемость в условиях комнатной температуры такого типа бактерий, как *Escherichia*

coli. Из-за сложности данных биологических объектов практически остаются неизученными физические механизмы, которые приводят к эффектам гормезиса.

Основой для данного исследования послужили отечественные и иностранные научные труды авторов, которые работали по данному направлению, это научные труды таких учёных, как: А. П. Мамонтов, И. П. Чернов, К. Такака, М. Hoshi, W. Zhang, S. Endo, С.Р. Полвонов, К. Олимов, Г. П. Жижина, А. Г. Липсон, А. Ю. Цивидзе, А. М. Кузин Т. D. Luchkey, К. N. Prasad и др.

Из отечественных авторов, которые проводили работы по взаимодействию ядерного излучения с веществом, в том числе изучении радиоизотопов состава биологических объектов, следует назвать В. Г. Гафурова, А.А. Саломова, Б. И. Махсудова, Я. Шукурова, О. Аббосова, Р. Марупова, Т. Шукурова, Т.А. Ходжаев, С. Ф. Абдуллаева, Н. У. Муллоева и др.

Связь исследования с научными проектами и темами. Диссертационная работа выполнена в 2018-2021 гг. в соответствии с тематикой научных исследований кафедры ядерной физики Таджикского национального университета (ТНУ) по теме “Ядерное взаимодействие нейтронов с веществом”, №2241-03 от 25.06.16 г., 01 16 TJ 00666 от 23.11. 2016 г.

Тема диссертационной работы соответствует Перечню, в который включены приоритетные направления научных и научно-технических исследований, выполняемые в течение 2015-2020 гг. Республике Таджикистан (Согласно Постановлению Правительства РТ № 765 от 04.12.2014 г.) и на период с 2021 по 2025 гг. (Согласно Постановлению Правительства РТ № 503 от 26.09.2020 г.).

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Цель исследования. Исследование воздействия тепловых нейтронов малого потока на изменение биологической активности и спектральных характеристик штаммов бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и штаммов бактерий *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*.

Задачи исследования:

1. Разработка методики получения штаммов бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*.
2. Исследование влияния малого потока тепловых нейтронов на биологическую активность бактерий.
3. Проведения модельного эксперимента влияния малого потока тепловых нейтронов на биологическую активность микроудобрений.
4. Исследование характеристик штаммов бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* спектральными методами.
5. С помощью исследования ИК-спектров поглощения, полученных для штаммов бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* определить возможные механизмы протекания ядерных реакций под действием тепловых нейтронов, приводящих к изменениям характеристик этих бактерий.

Объект исследования. Объектом исследования являются бактерии *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*, а также изменения их характеристик под действием малого потока тепловых нейтронов.

Предметом исследования являются изменения биологической активности и спектральные характеристики, которые получены для штаммов бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* после их обработки тепловыми нейтронами.

Научная новизна исследования заключается в том, что впервые:

- **обнаружено** явление “нейтронного гормезиса” при взаимодействии тепловых нейтронов малых потоков на штаммы бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*;

- **исследованы** характеристики ИК-спектров, снятых для штаммов бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *Phosphaticum*, которые находят применение в качестве составной части микроудобрений;

- **установлены** физические причины, приводящие к улучшению характеристик биологических активностей указанных бактерий при воздействии на них определённого потока тепловых нейтронов.

Теоретическая ценность исследования. Методом ИК-спектроскопии установлено, что улучшение характеристик биологических активностей указанных бактерий при воздействии на них определённого потока тепловых нейтронов зависит от протекающих в них ядерных реакций с радиационным захватом тепловых нейтронов более лёгкими ядрами. Выяснение роли составляющих биомолекул микроорганизмов в “нейтронном гормезисе” представляет ценность в детализации физического механизма обнаруженного эффекта.

Практическая ценность исследования. Полученные в работе экспериментальные результаты, а также обнаруженный эффект “нейтронного гормезиса” найдут применение в ядерной биотехнологии производства микроудобрений и могут быть использованы для увеличения быстродействия удобрений, содержащих органические вещества для дальнейшего их применения в технологии гарантированного производства сельхозпродуктов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Существует явление “нейтронного гормезиса”, связанное с уменьшением времени прорастания бактерий при их облучении малыми потоками тепловых нейтронов. Наилучший результат достигается при потоке тепловых нейтронов $5,4 \cdot 10^6$ нейтрон/см², и в этом случае время прорастания бактерий уменьшается в 5-6 раз.

2. Характерные пики, наблюдаемые на ИК-спектрах, зарегистрированные для бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *Phosphaticum*, являются подтверждением двойственности и двучленности молекул указанных бактерий, соответственно в их состав входят алифатические и ароматические цепи.

3. Вероятно, что механизмом, оказывающим влияние на ИК-спектры бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*, является эффект “нейтронного гормезиса”, а также влияние тепло-

вых нейтронов, что выражается ядерными реакциями по радиационному захвату тепловых нейтронов атомными ядрами типа $^{14}_7\text{N}(n, p)^{14}_6\text{C}$.

Достоверность полученных результатов обеспечивается наличием многократно повторяемых экспериментальных данных. С целью обеспечения надёжности данных физических параметров проводилось усреднение результатов измерения по стандартным методикам.

Соответствие паспорту научной специальности.

Содержание диссертационной работы соответствует паспорту научной специальности 6D060500- Ядерная физика (6D060504- Прикладная ядерная физика), который утверждён Высшей аттестационной комиссией при Президенте Республики Таджикистан, основой которого являются экспериментальные и теоретические исследования, посвященные изучению взаимодействия ядерного излучения с веществом, радиационной безопасности человека и окружающей среды, использованию методов ядерной физики для анализа химических элементов состава вещества, а также определению роли мутировавших воздействий ядерного излучения в астрофизических ядрах. Значение научных и технических проблем данной специальности состоит в изучении прикладных основ структуры вещества ядерно-физическими методами и развитии применения ядерной физики в национальной экономике. Соответствие отмечается по следующим пунктам:

- влияние ядерного излучения на структуру вещества. Радиационные дефекты.
- нейтронная физика.
- химические и биологические эффекты под действием ядерного излучения.
- воздействие ядерного излучения на свойства бактерий, биомолекулы, клетки и все органы.
- использование радиационного излучения в науке и технике.

Личный вклад соискателя. Автор непосредственно участвовала в процессе выращивания бактерий, измерений времени активации выращенных бактерий, экспериментальных исследованиях спектральных характеристик изучаемых объектов, в компьютерной обработке полученных данных и анализе экспериментальных исследований по влиянию малых потоков тепловых нейтронов на свойства

бактерий. Основные результаты диссертационной работы, их интерпретация и соответствующие заключения выполнены автором лично.

Апробация работы. Результаты данной диссертационной работы обсуждались на семинарах физического факультета и кафедры ядерной физики Таджикского национального университета (Душанбе, 2018-2021 гг.); а также были доложены на: Республиканской научно-практической конференции “Современные проблемы физики конденсированного состояния и ядерной физики”, посвященной “20-летию изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования” (Душанбе, 19 февраля 2020); Республиканской научно-теоретической конференции профессорско-преподавательского состава и сотрудников ТНУ (Душанбе, 20-27 апреля 2019 г.); Республиканской научно-практической конференции “Математическое и компьютерное моделирование физических процессов” (Душанбе, 25 октября 2019 г.); Республиканской научно-теоретической конференции профессорско-преподавательского состава и сотрудников ТНУ, посвященной “20-летию изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования на период 2020-2040 гг.” (Душанбе, 2020 г.); XV Международной научно-практической конференции молодых учёных и студентов “Современные проблемы и перспективные направления инновационного развития науки” (Душанбе, 24 апреля 2020 г.); Научно-практической конференции “Проблемы и перспективы физики, техники и технологии полупроводников” (Худжанд, 2021 г.); Симпозиуме физиков Таджикистана, посвященном 85-летию академика Р. Марупова (Душанбе 25-26 ноября 2021 г.); Республиканской научно-теоретической конференции профессорско-преподавательского состава и сотрудников ТНУ (Душанбе, 2021 г.).

Опубликованные результаты диссертации. Материалы диссертации были опубликованы в 10 научных изданиях, включая 4 статьи в аннотированных журналах ВАК Республики Таджикистан, 6 тезисов в сборниках и материалах научных конференций и симпозиумов республиканского и международного формата.

Структура и объем диссертации. Структура диссертации определена в соответствии с целями и задачами исследования и включает введение, четыре главы, заключение, список литературных источников (135) и приложение. Общий объем диссертации составляет 125 страниц компьютерного набора, количество рисунков 20, таблиц 10.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы исследования, кратко излагается содержание предмета исследования. Формулируются основные цели и задачи диссертационного исследования, обосновываются научная новизна и практическая значимость. Приводятся основные положения, которые автор выносит на открытую защиту, обосновывается достоверность полученных автором результатов, указывается личный вклад автора.

В первой главе приводится обзор имеющихся литературных источников по влиянию ионизирующего излучения на свойства различных материалов, приводится анализ различных аспектов влияния нейтронов на свойства веществ и особенностей взаимодействия тепловых нейтронов с биологическими средами. Обосновывается необходимость проведения исследования по данной тематике.

Во второй главе приведена методика выращивания бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*, ИК-спектрометрический метод исследования степени изменения спектральных характеристик исследуемых объектов, и способ облучения бактерий тепловыми нейтронами. Приведены характеристики изотопного источника нейтронов на основе Pu-Be, способы получения тепловых нейтронов, схема бака для получения тепловых нейтронов и возможность протекания ядерных реакций по радиационному захвату тепловых нейтронов лёгкими атомными ядрами, входящими в состав органических веществ.

Третья глава посвящена результатам экспериментальных исследований влияния тепловых нейтронов и их величин потоков на время активации бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*. Приводятся результаты анализа экспериментальных результатов по определению воз-

можных механизмов, которые оказывают воздействие на характеристики биологических объектов через тепловые нейтроны и ядерные реакции радиационных захватов тепловых нейтронов атомными ядрами азота (N). Отдельно приводятся результаты модельного эксперимента по изучению влияния малых потоков тепловых нейтронов на биологическую активность гуминовых кислот, которые используются при выращивании различных сельскохозяйственных культур на примере арахиса.

Четвертая глава посвящена результатам экспериментальных исследований *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* методом ИК-спектрометрии, и определена зависимость спектральных характеристик этих биологических объектов от величины потока тепловых нейтронов. В качестве предмета исследований были выбраны ИК-спектры бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *Phosphaticum*, проведена оценка воздействия малых потоков тепловых нейтронов на спектральные характеристики этих бактерий, предназначенных для применения в производстве микроудобрений. Обнаружено, что в некоторых полосах ИК-спектров бактерий при их облучении малыми потоками тепловых нейтронов происходят изменения оптической плотности.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы.

ГЛАВА 1. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЯДЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С БИОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

1.1. Эффект “малых доз” при взаимодействии ионизирующего излучения с веществом

Для решения поставленных в данной диссертационной работе задач, вначале рассмотрим некоторые вопросы взаимодействия ионизирующего излучения с различными веществами в конденсированном состоянии. Это необходимо для выяснения особенностей, при которых происходит взаимодействие тепловых нейтронов с малыми потоками с различными веществами и, соответственно, определения значимости данного диссертационного исследования с точки зрения научной новизны.

Ионизирующее излучение (ИИ) – данное название оно получило из-за его способности инициировать процесс ионизации молекул и атомов в веществе, которое подвергается данному виду облучения. Элементарным актом взаимодействия ИИ с веществами является процесс поглощения энергии молекулами или атомами, что влечёт за собой высвобождение электронов, то есть вызывает ионизацию данной молекулы или данного вещества. Каждому акту ионизации соответствует высвобождение энергии в количестве 33.0 электронвольт (эВ), что несколько больше энергии, которая необходима для разрыва атомных связей в молекулах вещества. Ионизирующее излучение по своей природе принято подразделять на следующие виды: электромагнитные ИИ, которые в свою очередь делятся на квантовые и фотонные; а также корпускулярные виды ИИ.

К электромагнитному виду ИИ относят излучение рентгеновское и гамма-излучение, которым характеризуются радиоактивные химические элементы. Радиоволны и видимый свет также являются электромагнитными видами излучений. Все другие типы ионизирующего излучения являются по своей природе корпускулярными видами ИИ. К ним относятся альфа- и бета-частицы, внутриядерные частицы, а также ускоренные ионы, представляющие собой атомы химических элементов, которые по различным причинам лишаются электронов. Также к

корпускулярным видам ионизирующего излучения относят нейтроны – ядерные частицы, не имеющие заряда.

Во введении данной работы было отмечено, что при изучении влияния ионизирующих излучений на характеристики некоторых органических и неорганических материалов был выявлен так называемый эффект “малых доз”, когда при воздействии на указанные материалы незначительных доз ионизирующего излучения происходит улучшение различных характеристик этих материалов [1].

Проблемы влияния ионизирующих излучений именно в малых дозах являются сложными по своей природе, они имеют, как радиобиологическое, так и экономическое и социальное значение. В последние годы получен большой спектр данных, свидетельствующих о положительных и отрицательных воздействиях малых доз ионизирующего излучения на биологические объекты, включая воздействие на человеческий организм. Выявлены феномены, возникающие при воздействии доз, получаемых живыми организмами (и человеком) от радиации, исходящей от природных источников. Во-первых, ионизирующее излучение оказывает стимулирующее воздействие на растительные и животные организмы, изменяет происходящие в них метаболические процессы, обусловленные активацией восстановления клеточных систем, что приводит к повышению радиорезистентности к острым облучениям, то есть к радиоадаптации. Во-вторых, у организмов значительно повышается радиочувствительность в результате накопления хромосомных перестроек в геноме организмов, что, соответственно, влечёт за собой образование отклоняющихся от нормального строения клеток, которые приобретают пониженную устойчивость к вторичному воздействию высоких доз гамма-излучений.

Необходимо отметить, что существует два типа облучений – это облучение от внешних источников (внешнее) и от внутренних источников (внутреннее облучение). Внешнее облучение вызывают космические лучи, доходящие до нас из глубин Вселенной, но часть из них также приходит со стороны Солнца, где они рождаются при солнечных вспышках. На Земле нет мест, куда бы не проникали эти лучи, представляющие собой космический невидимый душ [6]. Ещё одним

компонентом внешнего облучения является земная радиация, обусловленная некоторыми радиоактивными элементами, которые встречаются в горных породах Земли, входящих в её состав с самого начала её образования из солнечной туманности. К этим химическим элементам необходимо отнести калий-40, рубидий-87 и представителей радиоактивных семейств, родоначальниками которых являются уран-238 и торий-232.

Внутреннее облучение обуславливается поступлением радиоактивных веществ в живые организмы с воздухом, водой или пищей. Перед попаданием радиоактивных веществ в человеческий организм, они проходят сложные пути по пищевым цепочкам в окружающей среде.

В последние десятилетия широко развиваются исследовательские направления, посвящённые стимулирующему действию от облучения малыми дозами радиации, которые сравнимы с дозами радиационного воздействия, получаемыми живыми организмами в результате облучения повышенными естественными фоновыми дозами радиации (повышенный естественный радиационный фон – ПЕРФ) [7, 9, 10]. Незначительные превышения естественного радиационного фона оказывают благоприятное воздействие на живые организмы, но при этом резкое увеличение ЕРФ может значительно снизить их жизнеспособность вплоть до гибели этих живых организмов. Такой радиационный эффект широко освящается в работах А. М. Кузина [3, 8, 9, 11], данный эффект А.М. Кузин называет “радиационным гормезисом” [11]. Когда дозы воздействия радиации превышают фоновые значения в десятки или даже сотни раз, не всегда отмечается повреждающее её воздействие на человеческий организм, хотя в основном отмечается превышение фоновых значений в 5-10 раз. В этом случае прослеживается противоположный эффект - радиация оказывает биостимулирующее воздействие, то есть можно утверждать, что малые дозы ионизирующего излучения способны повышать жизнеспособность живых организмов.

Для каждого вида живых организмов величины малых доз ионизирующего облучения являются индивидуальными. В частности, для человеческого организма малая поглощённая доза в среднем составляет от 4 до 5 рад, то есть данную до-

зу человек получает в условиях естественного радиационного фона в течение всей своей жизни. Чем более радиорезистентные живые организмы, тем выше могут быть величины “малых доз”. Хорошую устойчивость к радиационным воздействиям проявляют растения, для них полулетальные дозы могут составлять величины в сотни или даже тысячи Гр), особенно это касается спор грибов и бактерий, некоторых водорослей, сухих семян растений, которые могут без вреда переносить воздействие доз радиации более 10 Гр. Таким образом, малые дозы поглощённой радиации для растений, являющиеся для них безвредными, для животных и человека являются смертельными дозами.

В концепции “радиационного гормезиса” рассматриваются вопросы о том, что в больших дозах ионизирующее излучение оказывает вредное воздействие на живые организмы, при этом малые дозы могут стимулировать положительные биологические процессы в организмах, оказывать положительные воздействия на них, в результате чего возможно увеличение скорости деления клеток, усиленный рост, повышение плодовитости и в целом при этом продолжительность жизни различных биологических организмов может увеличиваться [11-14]. Эффекты радиационного гормезиса были отмечены при воздействии ионизирующих облучений на различные виды животных и растений. Так, показано, что при облучении различных видов млекопитающих, рыб, кур дозами в пределах <50 сГр у них увеличивается плодовитость, выживаемость и скорость роста, облучение растений указанными дозами показало также стимулирующее действие – ускоряются ростовые процессы, ветвление, генеративные органы развиваются быстрее.

Данная динамика объясняется тем, что при облучении малыми дозами ионизирующей радиации происходит стимуляция иммунной системы, когда измененные клетки уничтожаются. Данный факт отмечали также в работах [13-15], где показано увеличение активности различных звеньев иммунной системы биологических объектов.

Также были проведены исследования на различных других биологических объектах – инфузориях, сине-зелёных водорослях, клетках млекопитающих, и также показана их стимуляция под воздействием малых доз ионизирующего из-

лучения, в частности, особенно стимулируется рост клеток [15-19]. Эти биологические объекты облучались однократными дозами от 0,01 до 0,5 Гр, при этом при регулярном облучении мощности доз составляли не более 5.0 сГр/сутки.

Разработано значительное количество различных моделей, которые объясняют механизмы эффекта радиационного гормезиса [13, 14, 17-21]. Наиболее поздней из них и наиболее успешной можно назвать модель, которую разработали в 2003 году М. Поляков и Л.Е. Фининдеган [17]. Согласно этой модели, воздействие на живые клетки малых доз ионизирующих облучений отличается от воздействия больших доз и имеет двойственный характер. С одной стороны, повреждение ДНК происходит с немедленным запуском репаративных и регенеративных механизмов, с другой стороны, усиливаются физиологические процессы, отвечающие за нейтрализацию повреждений в цепочках ДНК. Усиление этих физиологических адаптивных процессов происходит не сразу, каждый из них является неспецифичным и направляется, в основном на то, чтобы нейтрализовать повреждения цепочки ДНК нерадиационного характера. Также воздействие малых доз ионизирующего излучения оказывает антиканцерогенное воздействие на биологические объекты, но при этом имеется недостаточно сведений по воздействию доз радиации на неканцерогенные заболевания, а также на здоровье детей.

Опираясь на результаты собственных исследований и обобщая данные других авторов, в работе [22] Е.Б. Бурлаковой с соавторами сделан вывод, что малые и сверхмалые дозы облучения имеют уникальную способность десятикратно увеличивать биологические эффекты. При этом авторы выявили ряд закономерностей, среди которых основными являются: 1) зависимости эффектов от доз облучения являются полимодальными и немонотонными; 2) экстремальные дозы зависят от интенсивности облучения и от его мощности; 3) облучение малыми дозами способствует изменению, а именно увеличивает чувствительность живых объектов к воздействию повреждений; 4) при определенных диапазонах дозовых нагрузок на организмы более эффективным является низкоинтенсивное облучение по сравнению с острым облучением.

Также рассмотрено радиационно-индуцированное повреждение ДНК биологических объектов и показан возможный эффект индуцируемых защитных реакций на смягчение внутренних повреждений при воздействии низких доз облучения [23].

В работе [24] К. Прасад и соавторы приводят данные, полученные при проведении эпидемиологических исследований, где отмечается, что риски для здоровья человека при облучении малыми дозами ионизирующего излучения складываются из нескольких рисков – это возможные соматические мутации, происходящие в результате, как новых опухолевых образований, так и риски заболеваний от других причин [25]. В качестве других причин отмечается, в основном, возникновение у новорожденных различных дефектов и глазных заболеваний.

Поскольку в [11] радиационный гормезис определяется в качестве “благоприятного воздействия радиации” или “пользы радиации” [23] при действии малых доз ионизирующего излучения, мы, таким образом, априори рассматриваем такие часто встречающиеся эффекты радиационного гормезиса, как увеличение биомассы растений или животных, или увеличение плодовитости полезными и благоприятными факторами. Но увеличение биомассы или темпов рождаемости для биологических объектов не всегда приносит этим объектам пользу. Такое увеличение всегда является нетипичным, отличным от установившихся физиологических норм. Такие отличия от нормы могут влиять в целом на организм или отрицательно, или положительно, а также быть, как гиперфункциональными, так и гипофункциональными.

Стимулирующий эффект малых доз ионизирующего излучения наблюдаются не только в биологических объектах, но и в различных приборах и материалах на основе твёрдых тел [26-32].

В частности, авторы [26, 27] исследовали воздействие γ -излучений на свойства лазеров - инъекционных и полупроводниковых. Выбор данных объектов связан с чувствительностью их порогового тока и его влияния на структурное изменение материала активной области этих гетеролазеров. Образцами для исследования являлись типичные гетеролазеры InGaAsP/InP заращенного типа [32], спек-

тральный диапазон действия которых составлял 1.3 мкм, длина резонатора (L) находилась в пределах от 150 до 200 мкм, ширина области - 2-7 мкм, толщина области находилась в пределах от 0.15 до 0.2 мкм. Хотя в настоящее время лазеры данного типа не имеют достаточно высоких излучательных характеристик по сравнению с аналогичными лазерами с активными квантоворазмерными областями, однако они вполне могут быть использованы для решения поставленных задач, в некоторых случаях им отдаётся предпочтение [30]. Этого можно ожидать, так как с одной стороны, воздействие облучения на активные области исследуемых материалов не зависит от квантоворазмерного эффекта, а с другой стороны, получаемые от облучения конечные эффекты являются пропорциональными оптическим ограничениям активных областей материалов. Для лазеров, обладающих значительной активной областью, данный фактор в них выше на целый порядок и более по сравнению с лазерами, имеющими квантоворазмерные области.

Для исследования было выбрано 27 образцов, которые были выбраны с условием, что при температуре 25°C усреднённое значение порогового тока было равно 70.0 мА. Перед процедурой облучения характеристики лазеров оценивались кратковременными испытаниями при следующих параметрах: постоянная мощность – 0.5 мВт, температура – 70.0°C, время испытания – 10 часов. Установка была рассчитана на одновременное автоматическое измерение ватт- и амперных характеристик для 16 лазеров.

После отбора образцов их облучали γ -квантами с использованием источника на основе кобальта-60 различными дозами (энергия γ -квантов (E'_γ) составляла 1127кэВ, (E''_γ), соответственно, 1133 кэВ). Также затем проводили повторные измерения значений (I) – порогового тока.

Рисунок 1 представляет собой изменение относительного приращения порогового тока для гетеролазеров типа InGaAsP/InP в зависимости от доз γ -облучения исследуемых образцов. На рисунке 1 видно, что снижение порогового тока отмечается в диапазоне доз от 10^{14} до 10^{15} квант/см², при этом дозы выше значений 10^{15} квант /см² вызывают увеличение порогового тока, затем плавный переход к линейной зависимости. Данная зависимость выражается следующим выражением:

$$I = I_0(1 + A\Phi)$$

в котором: I_0 - величина порогового тока;

Φ - доза облучения,

A – имеет усреднённую величину, равную $\sim 10^{-18} \text{ см}^2$.

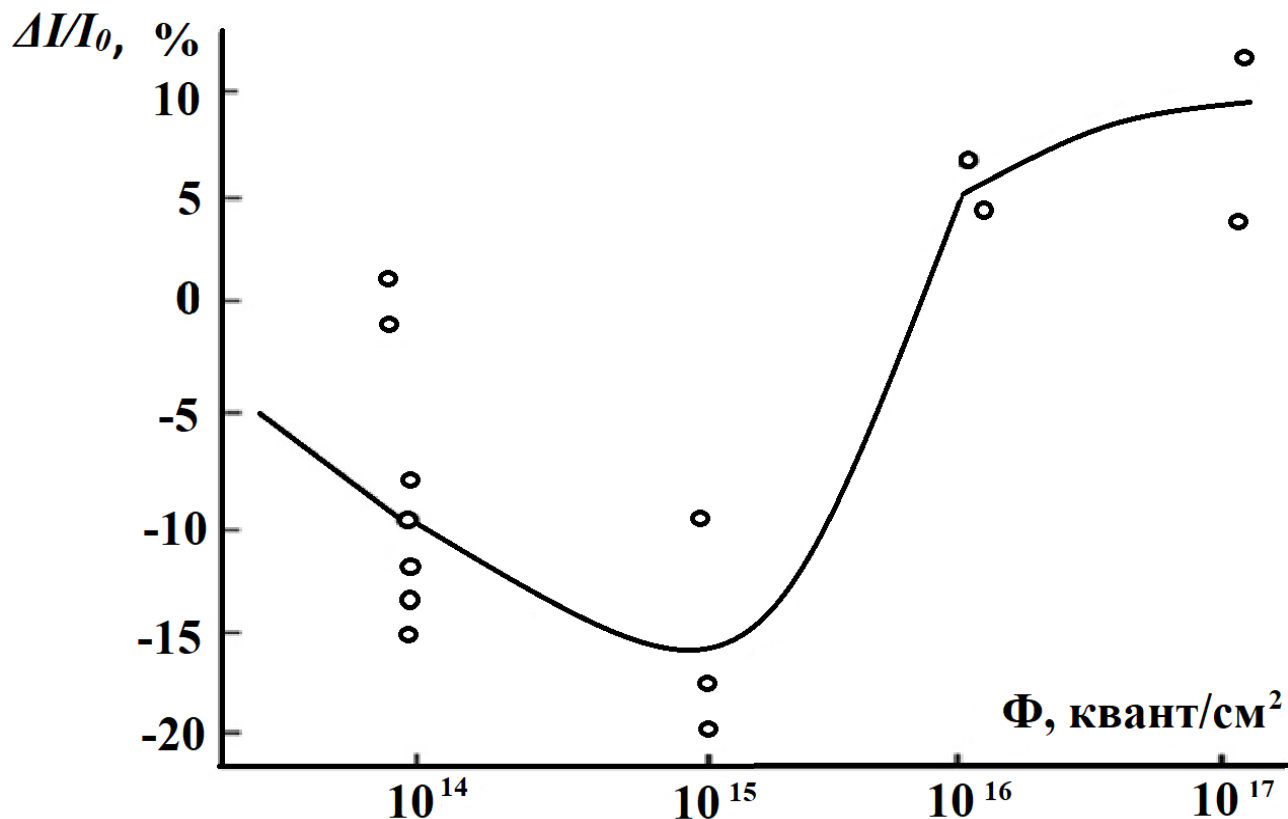


Рисунок 1 – Изменение величин относительных приращений пороговых токов лазеров в зависимости от доз γ -облучения в различных образцах [32].

Результаты работы [27] в дальнейшем были подтверждены при изучении действия гамма-облучения на электрофизические свойства мезопористого кремния и свойства различных биологических систем, а именно солодку уральскую и семена ячменя [28, 29].

В основном это связано с изменениями электронных конфигураций в атомах, которые являются составляющими кристаллических решёток макромолекул и полупроводниковых материалов живых организмов.

Зависимость характеристик излучения от доз облучения имеет не монотонный вид, что зависит от двойственного воздействия γ -излучения на лазеры и их активные области [30, 31]. Во-первых, γ -кванты производят в некотором роде

“отжиг” имеющихся в активной области лазеров технологических дефектов, во-вторых, γ -кванты генерируют в кристаллических решётках новые дефекты, которые в свою очередь являются центрами без оптического поглощения и излучательных рекомбинаций. Исходя из этого, можно предположить, что на начальном этапе облучения малыми дозами основной процесс представляет собой “отжиг” изначально имеющихся дефектов, при этом излучательные характеристики лазеров значительно улучшаются – происходит повышение дифференциальной эффективности и снижается пороговый ток. Однако при уменьшении количества дефектов, которые подвергаются радиационному отжигу, происходит замедление указанного процесса, и активируется процесс, при котором накапливаются собственные радиационные дефекты. Является очевидным, что с течением времени в зависимости от содержания исходных дефектов улучшение характеристик лазера полностью прекращается, но при этом берёт своё начало новый процесс, в котором происходит накопление стимулированных γ -излучением дефектов.

Факт, что в активной области лазера изначально существуют дефекты, подтверждается исследованиями диодных лазеров, когда были изучены методами электролюминесценции и фотолюминесценции тёмные и активные области указанных лазеров. Так, известным фактом является то, что, когда величины энергии γ -квантов составляют примерно 1.0 МэВ, происходит основной процесс - взаимодействие материала активной области и излучения, так называемый эффект Комптона, то есть процесс неупругого рассеяния, когда электроны “выбрасываются” к атомам материала из К-оболочек [4]. При этом величины сечения данного процесса находятся в диапазоне примерно 10^{-23} см². Таким образом, на основании [31] использована закономерность, по которой можно определить кинетическую энергию электрона (E_k) при рассеянии согласно выражению:

$$\frac{E_k}{h\nu} = \frac{2\Lambda \sin^2 \frac{\varphi}{2}}{\lambda + 2\Lambda \sin^2 \frac{\varphi}{2}},$$

в котором: $h\nu$ - величина энергии γ – кванта;

Λ - комптоновская длина волны электрона;

λ - величина длина волны γ – кванта;

φ - угол рассеяния.

Согласно данному выражению, можно статистически вычислить для первичного кванта энергии его часть энергии, получаемой электроном отдачи. Для этого составляется следующее равенство: при значении угла рассеяния (φ), равном 90 градусов, выражение принимает вид $\lambda = \Lambda = 0.024 \text{ \AA}$ (в области γ -излучения), и при этом верно соотношение $\frac{E_k}{h\nu} = \frac{1}{2}$. Соответственно, можно констатировать, что электрон отдачи при жёстком гамма-облучении может получить не менее половины энергии γ -квантов.

Соответственно, γ -кванты оказывают влияние на электроны с получением так называемых “быстрых” электронов, при этом атомы кристаллических решёток преобразуются в положительные ионы. С электронами может происходить термализация, при этом образуется большое количество электронно-дырочных пар. Ионы, в свою очередь, могут менять своё положение, изменяя потенциалы взаимодействия по отношению к остальным атомам кристаллических решёток, тем самым стимулируя в кристаллических решётках движение атомов. Когда это происходит с атомами, которые ответственны за формирование в решётках дефектов, то можно устранить данные дефекты путём их “отжига” при условии, что указанные атомы находятся в узлах кристаллических решёток и могут образовать новые дефекты. В частности, если предположить, что вероятность формирования дефекта в кристаллической решётке каждым квантом, для которого рассеяние происходит в течение определенного времени, равна единице, то можно предположить, что концентрация дефектов при дозе облучения (Φ) равной $\sim 10^{18}$ квант/см² составит около 10^{17} см⁻³. Данное значение соответствует уровням концентрации инжекторных носителей в активных областях лазера. Такие концентрации дефектов могут оказывать влияние на лазерную генерацию, изменяя её порог. Кроме того, вычисленное статистическим и экспериментальным путём значения A составляет 10^{-18} см², позволяет сделать заключение, что при такой дозе порог тока увеличится в два раза, а также о том, что шкала оценки для значения A является реалистичной согласно эффекту Комптона.

Таким образом, после проведения исследований можно заключить, что зависимости дифференциальных эффективностей, пороговых токов и доз облучения γ -квантами не являются монотонными: наблюдается увеличение дифференциальной эффективности и снижение пороговых токов в областях низких доз облучения (в диапазоне от 10^{14} до 10^{15} квант/см²). В областях более высоких доз ($>10^{15}$ квант/см²) отмечается обратная зависимость – снижение дифференциальной эффективности и увеличение порогового тока. Соответственно, данный процесс является “отжигом” собственных технологических дефектов и процессом генерации радиационных новых дефектов.

1.2. Взаимодействие нейтронного потока с веществом

Поскольку электронные конфигурации в атомах кристаллических решёток для твёрдых тел и компонентов макромолекул биологических объектов не изменяются при воздействии на них тепловых нейтронов, то в этих объектах почти не происходит структурных изменений. Поэтому данный вопрос касательно механизмов воздействия нейтронов малых энергий (<1.0 эВ) на твердые тела и биологические объекты находился вне сферы исследователей.

Взаимодействие вещества и нейтронов осуществляется в процессе радиационного захвата нейтронов атомными ядрами, которые находятся в составе данного вещества [2]. Также с упругим и неупругим рассеянием нейтронов в атомных ядрах связаны другие процессы. Исходя из этого, возможность структурных нейтронно-стимулированных превращений, которые происходят в биологических объектах или твёрдых телах, находится в зависимости от сечения захвата нейтронов различными атомными ядрами этих объектов или твёрдых тел. Соответственно, нейтроны высоких энергий обладают более низкими сечениями захвата по сравнению с тепловыми нейтронами атомных ядер [4, 26]. Поэтому исследование воздействия тепловых нейтронов на характеристики различных органических и неорганических систем представляет собой интересную научную задачу. Также известным фактом является то, что ряд различных электронных приборов и биологических объектов могут подвергаться непрерывному воздействию тепловых

нейтронов с малыми потоками при полётах в высоких атмосферных слоях и в космическом пространстве. Так, космические лучи, взаимодействуя с атомами атмосферы, вызывают явление, которое названо широким атмосферным ливнем (ШАЛ), необходимо отметить, что в составе ШАЛ всегда содержатся определённые количества тепловых нейтронов. Тепловые нейтроны из состава ШАЛ вступают во взаимодействие с находящимися на поверхности Земли биологическими объектами. Соответственно, исследование эффектов, которые связаны с взаимодействиями тепловых нейтронов и различных сред, являются интересными, как с научной, так и с практической точки зрения.

Экспериментальные исследования воздействия тепловых нейтронов с низкими потоками на свойства веществ выполнялись на различных биологических и небологических объектах с соблюдением основного требования - объекты должны обладать такими характеристиками, которым свойственна высокая чувствительность к структурным изменениям на ядерном и атомарном уровнях. Одними из таких объектов являются квантоворазмерные гетеролазеры.

В работе [32] представлены результаты исследования воздействия потоков тепловых нейтронов на значения порогового тока систем InGaAsP/AlGaAs-гетеролазеров (MQW), представляющих собой квантоворазмерные системы. Исследуемые образцы являлись типичными маломощными квантоворазмерными напряжёнными InGaAsP/AlGaAs-гетеролазерами, которые функционировали в красной области спектра. Всего было исследовано 40 образцов, для которых при температуре 25°C усреднённая величина порогового тока была равна 7.0 мА. Образцы до облучения были подвергнуты кратковременным испытаниям в течение 10 часов при постоянной мощности тока и температуре, равной 70°C.

После отбора образцов их облучали тепловыми нейтронами с помощью плутоний-бериллиевого источника различными потоками в диапазоне от $4 \cdot 10^7$ до $3.5 \cdot 10^8$ нейтрон/см².

Рисунок 2 представляет собой изменение пороговых токов лазеров в зависимости от значений потока тепловых нейтронов в исследуемых образцах. Каждая из точек представляет собой усреднённое значение изменения величины по-

рогового тока, полученное для 10 образцов. Согласно рисунку 2 отмечается снижение порогового тока лазера при величинах потока в пределах $4 \cdot 10^7$ нейтрон/см², а также увеличение порогового тока лазера при величине потока выше $6 \cdot 10^7$ нейтрон/см². Данная зависимость характеризуется следующим выражением:

$$I = I_0(A\Phi + B)$$

в котором: I_0 - значение порогового тока лазера, измеренного до облучения образцов,

Φ – величина флюенса облучения образцов.

Данное выражение характеризует воздействие тепловых нейтронов на характеристики гетеролазеров, которое является более сильным по сравнению с облучением γ -квантами.

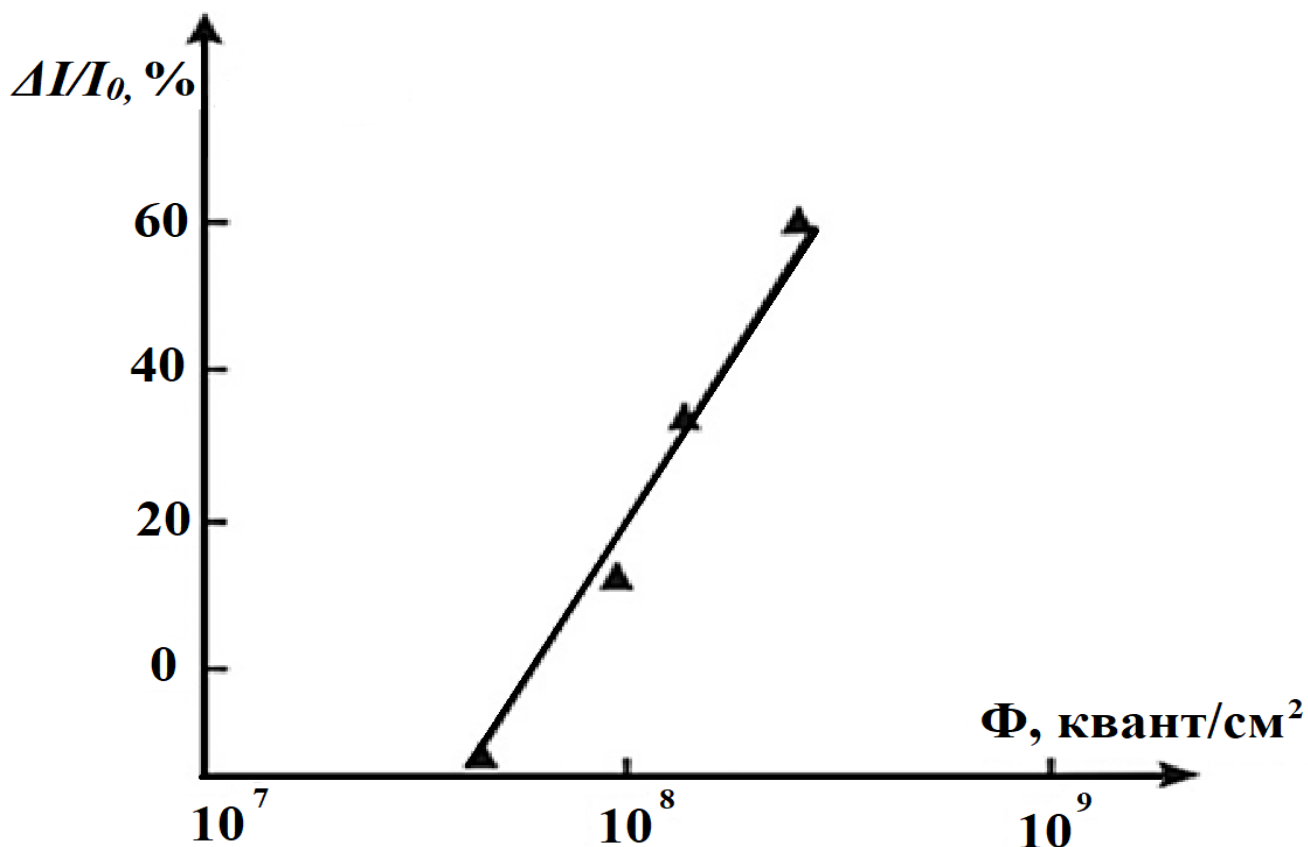


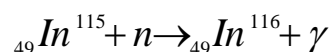
Рисунок 2 – Влияние величин потока тепловых нейтронов на значения порогового тока систем InGaAsP/AlGaAs–гетеролазеров, согласно [32].

Атомные ядра имеют способность легко захватывать тепловые нейтроны, при этом образуются новые радиоизотопы, которые в большинстве случаев явля-

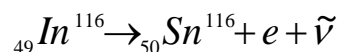
ются β -радиоактивными. При распаде этих радиоизотопов отмечается образование примесных атомов в активных областях гетеролазеров.

Авторами [26] для тепловых нейтронов различных изотопов химических элементов были рассчитаны сечения их активации, в частности, эти величины составили: для Al – 0.21, для As - 5.4 барн, для In – 155.0 барн, Таким образом, тепловые нейтроны оказывают большее воздействие на химический элемент In. Авторы [5] установили механизм воздействия тепловых нейтронов на химические элементы и показали, что при этом процессе протекают реакции, основанные на радиационном захвате (n- и γ -захваты).

Указанные реакции протекают с участием медленных нейтронов, энергия которых составляет 0-500 кэВ. В качестве примера приведём реакцию n- и γ -захватов с участием химического элемента индия (In):



Согласно данной реакции, происходит образование радиоактивного изотопа ${}_{49}\text{In}^{116}$, который также распадается, его распад происходит через 54 минуты после его образования согласно следующей схеме:



В гетероструктуре InGaAsP/AlGaAs ядра атомов Sn являются чужеродными ядрами. Они вызывают образование в кристаллических решётках дефектов, которые нарушают структуру электронных уровней, а также оказывают отрицательное воздействие на активные области гетеролазеров, ухудшая их оптические характеристики. Соответственно, в результате чего концентрации излучательных центров снижаются, увеличиваются значения пороговых токов лазеров, в составе активной области которых присутствует химический элемент индий.

В результате протекания реакции n- и γ -захвата происходит образование γ -квантов с диапазонами энергий в пределах 0.13-2.12 МэВ. В результате эффекта Комптона образующиеся γ -кванты могут приводить к увеличению излучательных характеристик в рассматриваемых лазерах (рисунок 2) при потоках тепловых нейтронов в диапазоне $4 \cdot 10^7$ нейтрон/см².

На основании результатов изучения действия тепловых нейтронов на излучательные характеристики гетеролазеров был разработан детектор тепловых нейтронов, основанный на новых физических принципах [26, 33].

В работе [34] методами индентирования и склерометрии исследованы прочностные свойства (микротвёрдость, трещиностойкость, эффективная энергия разрушения, микрохрупкость) эпитаксиальных плёнок теллурида кадмия и влияние на них облучения тепловыми нейтронами. Микротвёрдость ($H_{\text{инд}}$) указанных плёнок измерялась с применением метода индентирования на установке “ПМТ-3” согласно методическим рекомендациям, разработанным в [35]. Индектором, согласно данной методике, являлся алмазный наконечник в виде четырехгранной пирамиды, квадратным основанием, угол вершины пирамиды (α) составлял 136 градусов. На индектор нагрузку варьировали в диапазоне от 5 до 100 г. Время нагрузки, динамического действия нагрузки и её снятия составляло, соответственно, по 10 секунд, это время было выбрано, учитывая изменение ползучести в плёнках теллурида кадмия (CdTe). Чтобы избежать появления в плёнках CdTe эффекта фотопластичности, исследования указанных плёнок были осуществлены в одинаковых условиях при минимальном освещении (то есть в полутемноте). Чтобы избежать попадания влаги на образцы, в процессе измерений для всех образцов контролировалась одинаковая влажность с помощью гигрометра психрометрического марки “ВИТ-2”. Глубину индекторного проникновения изменяли в зависимости от нагрузки в диапазоне 1.2-7.7 мкм, размер отпечатка при этих условиях находился в пределах от 8.0 до 55.0 мкм. Прочностные характеристики плёнок определялись с использованием метода склерометрии, сущность которого заключалась в нанесении царапин на рёбра алмазной четырехгранной алмазной пирамиды, которая имеет квадратное основание, оправу “НПМ” и угол в вершине пирамиды (α) 136 градусов, при температуре 20-25°C на установке “ПМТ-3”. Определения производились по ГОСТ 9377-81. Индекторную нагрузку в исследовании образцов варьировали от 1.0 до 20.0 г, для индектора устанавливалась скорость движения от 40.0 до 120 мкм/с. Полное описание методики по склерометрическим измерениям приводится авторами в [35].

Для определения микрохрупкости (Z) образцов использовали стандартную методику, разработанную в [36], погрешность которой составляла 5-7%. Также склерометрические измерения были применены для определения эффективной энергии разрушения (γ) и коэффициентов трещиностойкости или вязкости разрушения (K_{1C}), которые были вычислены на основании длины радиальных трещин [35] согласно следующим выражениям:

$$\gamma = \frac{K_{1C}^2}{2E} \quad \text{и} \quad K_{1C} = 0,016 \left(\frac{E}{H} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{P}{L^{\frac{3}{2}}}.$$

где: E – модуль Юнга, Па, для Si составляет $1.5 \cdot 10^{11}$ Па;

L – длина трещин, мкм.

Погрешность вычисления γ и коэффициента K_{1C} в пределах 8%.

Для плёнок, которые выращивались на подложках из кремния, отмечается увеличение значений микротвёрдости ($H^{инд}$) при увеличении на них доз тепловых нейтронов, для плёнок CdTe/CdTe отмечается обратная зависимость, то есть снижение значений микротвёрдости. При изучении трещиностойкости плёнок CdTe/Si было показано, что при облучении данных образцов нейтронами трещиностойкость увеличивается в два и более раз. Это можно объяснить тем, что при облучении нейтронами в плёнках CdTe/Si происходит образование вторичных радиационных дефектов и установление статистического равновесия между упругими напряжениями в приповерхностных слоях плёнок [37].

Также для исходных монокристаллических подложек CdTe были исследованы зависимости их микротвёрдости от нагрузок H (P) на них, которые графически отражены на рисунке 3 (линия 1). Как видно по расположению линии 1, на ней не проявляется приповерхностное упрочнение, которое характерно для полупроводниковых монокристаллов, а также по расположению линии можно констатировать, что по мере увеличения нагрузки отмечается незначительное увеличение микротвёрдости. Данная особенность, вероятно, вызывается воздействием деформаций растяжения, которая наиболее проявляется при низких нагрузках. Также из рисунка 3 можно увидеть, что значения микротвёрдости ($H^{инд}$) являются более низкими по сравнению с монокристаллами CdTe (линии 1 и 4). Для плёнок

CdTe/CdTe значения эффективной энергии разрушения (γ) и коэффициента трещиностойкости (K_{IC}) аналогичны указанным значениям, полученным для монокристаллического CdTe (таблица 1).

Таблица 1 – Величины эффективной энергии разрушения (γ), коэффициента трещиностойкости (K_{IC}) и микрохрупкости (Z) для плёнок и монокристаллов CdTe (нагрузка 50 г)

	Монокристалл CdTe	CdTe/CdTe	CdTe/Si	CdTe/Si, облучённый $n=7.3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$
γ , Па м	18,9	10,6	0,27	1,53
K_{IC} , $10^4 \text{ Па} \cdot \text{м}^{1/2}$	142	106	16,8	40,4
Z	2,1	2,2	2,5	2,5

При осаждении плёнок CdTe на подложки монокристаллического кремния картина иная. В этом случае значения микротвёрдости ($H^{инд}$) были больше по сравнению с аналогичными значениями для монокристаллов CdTe (рисунок 3, линии 1 и 2). Необходимо отметить, что при измерении методом склерометрии значения являются более высокими по сравнению со значениями ($H^{инд}$) (разница составляет около 20%). Например, при нагрузке 5 г значение $H^{скл}$ было равно 1.47 ГПа, а при нагрузке 10 г данная величина составила 1.2 ГПа. Данный факт объясняется тем, что в склерометрическом методе растягивающие упругие напряжения практически не учитываются, но при использовании метода индентирования данные параметры учитываются и, соответственно, занижают величины микротвёрдости. Как видно из таблицы 1, величины эффективной энергии разрушения (γ) и коэффициентов трещиностойкости (K_{IC}) для плёнок CdTe на кремниевой подложке значительно ниже (в 3-8 раз) по сравнению с аналогичными величинами для монокристаллического CdTe. Для плёнок CdTe/Si отмечаются более высокие величины микрохрупкости (Z) по сравнению с аналогичными величинами для

монокристаллического CdTe и плёнок CdTe/Si. Но данный разброс величин можно объяснить погрешностями измерений [38, 39].

Отмечается различное влияние на плёнки теллурида кадмия тепловых нейтронов. Так, для плёнок CdTe, выращенных на подложках из Si, значения микротвёрдости ($H^{инд}$) при увеличении доз облучения тепловыми нейтронами также увеличиваются, что видно из рисунка 3 (линии 2 и 3). А для плёнок монокристаллического CdTe прослеживается обратная зависимость – значения микротвёрдости снижаются (рисунок 3, линии 4 и 5).

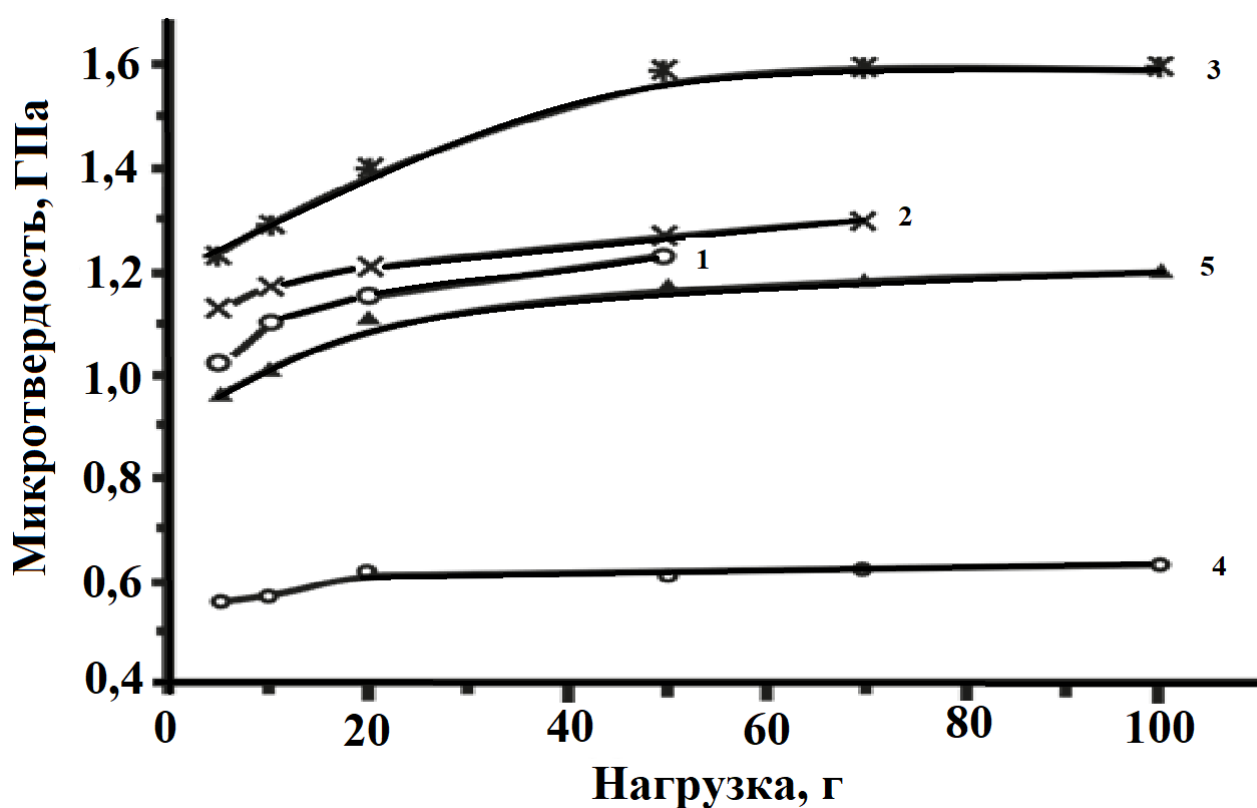


Рисунок 3 – Изменения микротвёрдости исходной монокристаллической подложки CdTe (1) и плёнок CdTe на подложках Si (2, 3) и CdTe (4, 5) от нагрузки, полученных методом индентирования (дозы облучения тепловыми нейтронами, соответственно, $3,0 \cdot 10^8$, $7,1 \cdot 10^9$, $7,3 \cdot 10^8$ см⁻²).

Также необходимо отметить, что трещиностойкость плёнок CdTe/Si при облучении их нейтронами возрастает в 2-3 раза по сравнению с исходными плёнками CdTe. Соответственно, в процессе облучения тепловыми нейтронами плёнок

CdTe ядра кадмия осуществляют радиационный захват этих тепловых нейтронов, так как Cd является эффективным поглотителем тепловых нейтронов, величина сечения захвата естественной смеси изотопов кадмия составляет, согласно данным [40] 2450 барн. Изотоп кадмия - ^{113}Cd более эффективно захватывает нейтроны по сравнению с другими изотопами, у него величина сечения захвата нейтронов по сравнению с изотопами естественной смеси на целый порядок выше [41]. Захват нейтрона изотопом кадмия ^{113}Cd вызывает ядерную реакцию (n- и γ -излучение). При этом свойства приповерхностного слоя образцов плёнок CdTe под воздействием γ -излучения могут значительно изменяться. В работе [42] также исследованы ещё несколько изотопов кадмия - ^{106}Cd , ^{114}Cd , ^{116}Cd , являющихся стабильными изотопами, определены их величины сечений захвата и показано, что для этих изотопов величины сечений захвата нейтронов ниже на четыре порядка по сравнению с исходным Cd, но при захвате этими изотопами нейтронов происходит образование β -радиоактивных изотопов, которые далее распадаясь, образуют примесные атомы In и незначительное количество атомов Sn, которые, в свою очередь, оказывают модифицирующее действие на свойства плёнок CdTe, значительно изменяя их. Процесс облучения характеризуется тем, что происходит выбивание атомов из узлов кристаллических решёток, что вызывает образование первичных радиационных дефектов – когда в кристаллических решётках образуются межузельные вакансии и междоузельные атомы, последние хаотично перемещаются в кристаллических решётках, вызывая в них вторичные радиационные дефекты, эти вторичные дефекты оказывают значительное влияние на изменение самих кристаллов и их микроструктур. При изучении плёнок CdTe/ CdTe, то есть плёнок на монокристаллических подложках из CdTe показано, что в них также происходит уменьшение величин микротвёрдости ($H^{\text{инд}}$), что можно объяснить образованием в их кристаллических решётках дефектов, которые образуются в результате того, что для плёнок CdTe на подложках CdTe величины сечений захватов тепловых нейтронов выше на четыре порядка по сравнению с аналогичной величиной для кремния.

При радиационной обработке полимеров наблюдаются переходы диэлектрик-металл, диамагнетик-ферромагнетик, прозрачные полимерные пленки становятся непрозрачными, а формирование металлических наночастиц приводит к наблюдению поверхностного плазменного резонанса. Обнаружена также модификация оптических характеристик далеко за пределами пробега ионов и при обработке γ -квантами. Представляло интерес выяснение возможности модификации полимерной пленки при обработке тепловыми нейтронами, что и явилось целью данной работы.

В работе [37] тонкие (50 мкм) плёнки полиэтилентерефталата (ПЭТФ - $C_{10}H_8O_4$) облучались тепловыми нейтронами в интервале доз $3.45 \cdot 10^7 - 7.1 \cdot 10^9$ см⁻². Спектральные зависимости пропускания регистрировались однолучевым спектрофотометром "PHOTON-RT" в интервале длин волн 250-3000 нм при падении света на две стороны плёнки.

В области прозрачности пленки ($\lambda > 310$ нм) коэффициент отражения практически не зависит от облучения нейтронами. В области непрозрачности в исходном образце наблюдается две слабо выраженные полосы при $\lambda_1 = 260$ нм и $\lambda_2 = 303$ нм, первая из которых существенно увеличивается при обработке нейтронами, а вторая остается практически неизменной.

Зависимости коэффициента отражения при $\lambda_1 = 260$ нм от дозы облучения, измеренные при падении света на облучённую и необлучённую поверхности плёнки, приведены на рисунке 4. Видно, что уже при дозе $1.38 \cdot 10^9$ см⁻² он достигает максимальной величины и при дальнейшем увеличении дозы несколько уменьшается.

Увеличение отражения ПЭТФ при $\lambda_1 = 260$ нм в случае ионной имплантации и γ -облучения было связано с модификацией надмолекулярной структуры полимера в приповерхностной области из-за перестройки приповерхностной метастабильной дефектной структуры плёнки. Как видно, облучение тепловыми нейтронами ПЭТФ также приводит к модификации надмолекулярной структуры в приповерхностной области, проявляющейся в усилении полосы отражения при $\lambda_1 =$

260 нм при падении света, как на облучённые, так и необлучённые стороны. Усиления отражения полосы при $\lambda_2 = 303$ нм не наблюдалось (рисунок 4).

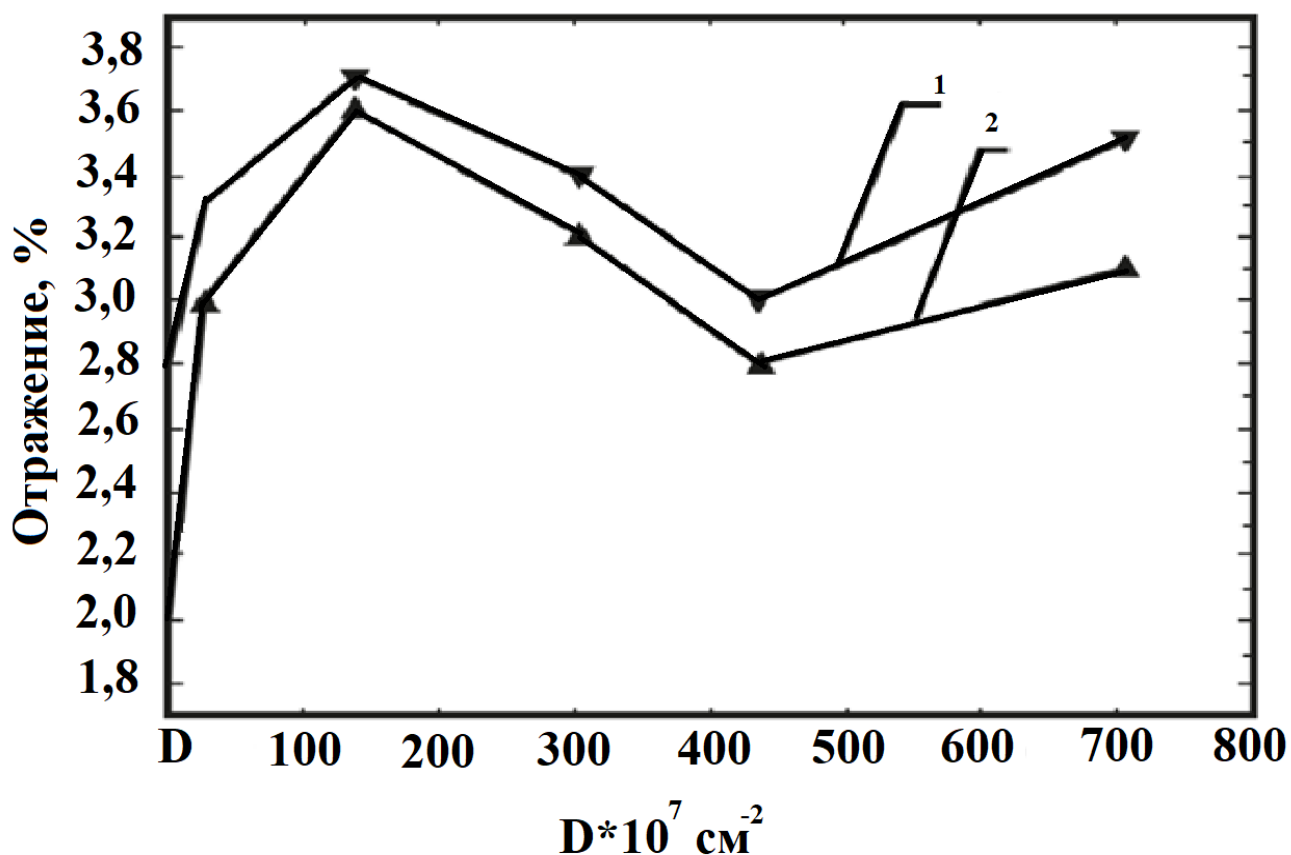


Рисунок 4 - Зависимость коэффициента отражения при $\lambda_1 = 260$ нм от дозы облучения нейтронами при падении света на облучённые (1) и необлучённые (2) стороны [34].

Как известно, радиационное воздействие оказывает заметное влияние не только на электрофизические и оптические свойства полупроводниковых материалов, но и на другие структурно-чувствительные характеристики, каковыми являются механические свойства кристаллов [39-42].

В работе [43] исследовано влияние нейтронного облучения на микротвёрдость GaAs при относительно малых ($< 2 \cdot 10^{15} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2}$) дозах облучения. Показано, что при облучении микротвёрдость GaAs повышается, и после дозы облучения $\sim 10^{15} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2}$ выходит на насыщение. Подобное изменение микротвёрдости GaAs наблюдалось и при γ -облучении [44].

В этой работе исследовано влияние нейтронного облучения на микротвёрдость GaAs в широком диапазоне доз - $\Phi = 10^{15} \div 1.25 \cdot 10^{18} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2}$, при температуре 70°C . Образцы представляли собой нелегированный GaAs n-типа с концентрацией носителей тока 10^{15} см^{-3} и плотностью дислокаций, равной 10^4 см^{-2} . Микротвёрдость измерялась на плоскости (111). Измерения микротвёрдости проводились на установке “Durimet” по методу вдавливания в интервале нагрузок от 15 до 300 г, с использованием стандартной пирамиды Кнупа.

На рисунках 5 и 6 показана зависимость изменения микротвёрдости (H) и относительное изменение её ($\Delta H/H$) GaAs от дозы облучения. Исследования показали (рисунок 5), что после дозы облучения $\Phi \sim 10^{15} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2}$, как и в работе [45], микротвёрдость выходит на насыщение. Однако после дозы $5 \cdot 10^{16} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2}$ происходит её увеличение с резким ростом при $\Phi > 10^{17} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2}$. Таким образом, насыщение микротвёрдости наблюдается только в диапазоне доз облучения $\Phi \sim 10^{15} - 5 \cdot 10^{16} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2}$.

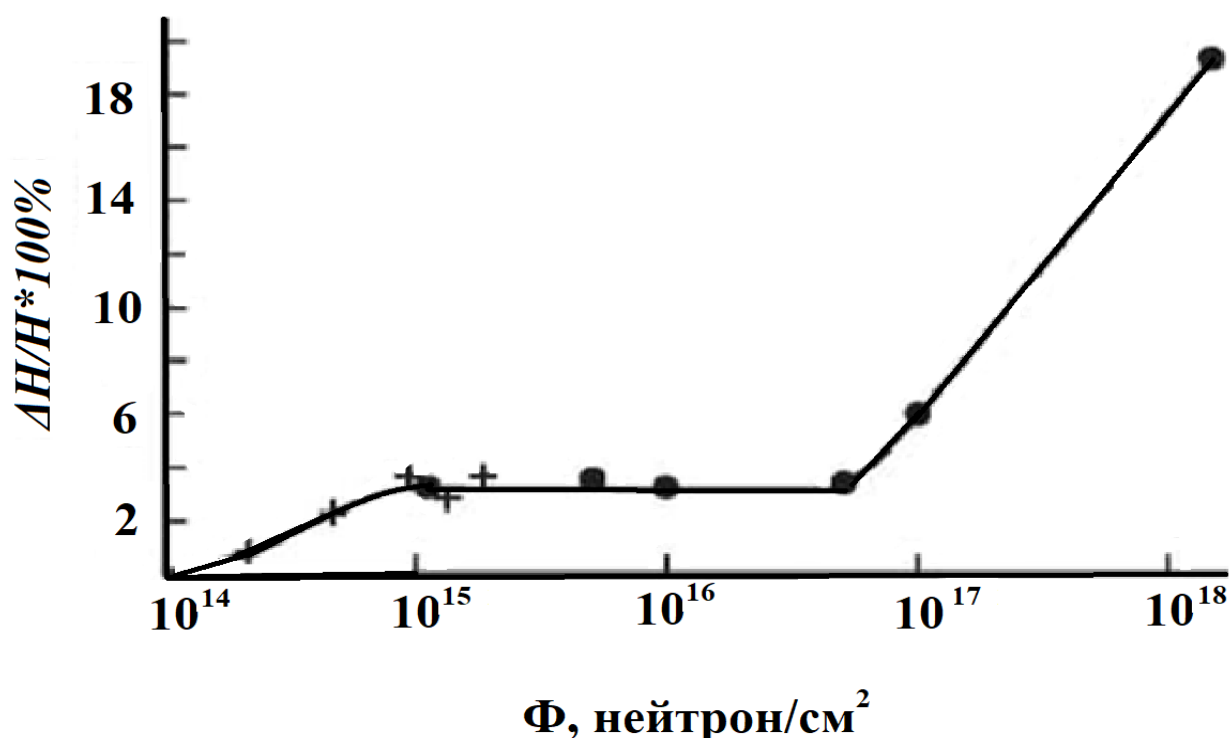


Рисунок 5 - Зависимость относительного изменения микротвёрдости GaAs от дозы облучения быстрыми нейтронами (+ данные работы [45]).

Необходимо отметить, что повышение микротвёрдости облучённого нейтронами GaAs выше доз $\Phi \sim 10^{16}$ н·см⁻² наблюдается во всём диапазоне нагрузок на индентор (рисунок б).

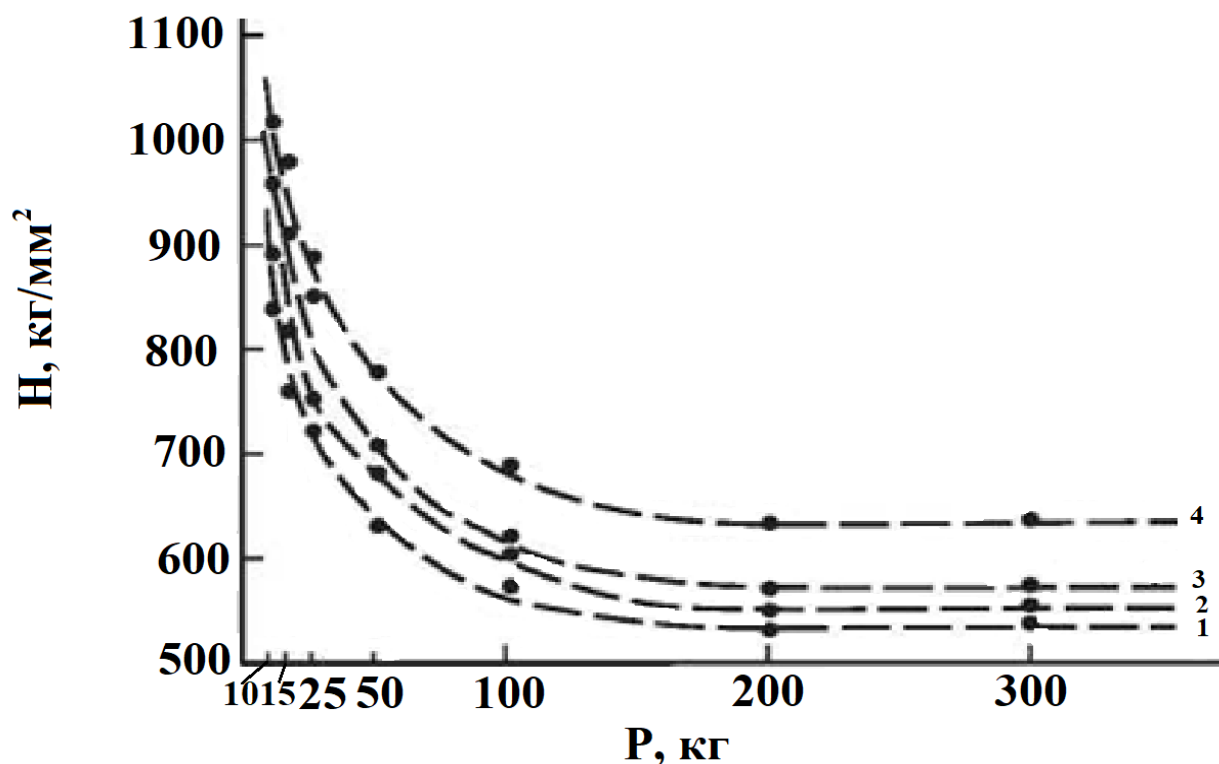


Рисунок 6 - Зависимость величины микротвёрдости GaAs от нагрузки на индентор после облучения потоками быстрых нейтронов (Φ , см⁻²): 1 - 0; 2 - $5 \cdot 10^{16}$; 3 - 10^{17} ; 4 - $1.25 \cdot 10^{18}$.

Увеличение микротвёрдости облучённого GaAs может быть вызвано, как уменьшением подвижности дислокации, так и жёстким закреплением последних на точечных радиационных дефектах (в основном вакансиях) [46]. В случае облучения нейтронами, при относительно малых дозах ($< 5 \cdot 10^{16}$ н·см⁻²), в этом процессе большую роль будут играть точечные дефекты, создаваемые в кристалле вне разупорядоченных областей. С увеличением дозы облучения, когда начинают перекрываться разупорядоченные области, объём, занимаемый ими, становится уже существенным. Концентрация точечных дефектов (типа вакансии Ga или As) в

них гораздо больше, чем в основном объеме [47-49]. Следовательно, их влияние на подвижность дислокации становится гораздо более существенным, что выражается в значительном увеличении микротвёрдости облучённого кристалла. К этому следует добавить и тот факт, что при нейтронном облучении радиационными дефектами создаются внутрикристаллические деформационные поля, аналогичные сжатию, которые также приводят к повышению микротвёрдости кристалла.

Повышение микротвёрдости кристалла могло быть вызвано также и увеличением плотности дислокации вследствие радиационного воздействия [45]. Но, как было показано в работе [43], при нейтронном облучении GaAs плотность дислокаций не меняется.

Для быстрых нейтронов энергия составляет 0.1 МэВ и более, эти величины являются гораздо большими по сравнению с затратами, которые являются необходимыми, чтобы смещать из узлов кристаллических решёток отдельные атомы углерода. Предполагая, что энергия смещения изотопа будет соответствовать числу первичных смещений углеродных атомов (N_p) в единице объёма, что происходит при облучении нейтронами исследуемых мишеней, авторы [50] считают правильным применять в данном случае следующее выражение:

$$N_p = D n_0 \sigma,$$

где: D - доза быстрых нейтронов;

$$n_0 = 1.76 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3} - \text{число углеродных атомов в единице объёма;}$$

$\sigma \approx 4b$ – величины поперечных сечений столкновений для нейтронов, энергии которых находятся в диапазоне 0.1-1.0 МэВ.

Выражение (1), используемое для дозы быстрых нейтронов с величинами $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, даёт основание предположить формирование около 10^{19} вакансий и такое же количество собственных атомов, расположенных между узлами кристаллической решётки.

Также были проведены исследования микрокристаллических алмазных порошков, алмазы для которых были выращены в доломитовых контейнерах при температуре 1612 К и давлении, составляющем 5.5 ГПа [47]. Катализатором в

данных исследованиях был выбран сплав Mn-Ni, в качестве источника углерода использовали графит марки “ГМЗ-ОСЧ”. Алмазы синтезировали прямым нагреванием шихты, время нагревания составляло от 0.5 до 4 мин, образовавшиеся кристаллы алмазов были обработаны в планетарной мельнице, затем проводился процесс их очистки и далее они классифицировались по прочности и размерам на основании ГОСТ9206-80. Таким образом, по соотношению масс исходных графитов и синтезированных алмазов устанавливались скорость и степень преобразования графита в алмаз.

Для регистрации содержания парамагнитных центров использовался спектрометр E112 фирмы “Varian”, регистрация проводилась при двух вариантах температур – комнатной и жидкого азота. Также для кристаллов были проведены измерения их прочности с использованием метода статического сжатия. Содержание примесных элементов (Ni, Mn, Al) в образцах определялось рентгенофлюоресцентным и нейтроноактивационным методами.

Пути контроля изменения фракционных составов кристаллов алмаза в процессе их синтеза определено следующее: рост алмазов крупных размеров (размерами более 160/125 мкм) происходит за счёт более мелких кристаллов, при этом также отмечается, что малые кристаллы относительно больших кристаллов в расплавах металлов находятся в неравновесных состояниях. При растворении малых фракций и образование крупных кристаллов алмазов происходит уменьшение в расплавах концентраций Mg и Ni за счёт образования нитридов или карбидов и вытеснения их из кристаллов, также за счёт увеличения содержания дефектов, вызванных азотом, которые, предположительно, имеют дисперсную природу (ПЦ Р1).

В парамагнитное состояние при этом переходит около четверти исходных атомов азота, которые ранее заместили углеродные атомы.

Размеры кристаллов не оказывают значительного влияния на трансформацию ширины в линиях ПЦ Р1, однако отмечается, что для зернистых фракций с размерами зёрен 80/63 мкм и более, значение ΔH по величине снижается в пределах 10%, а для фракций с размерами зёрен 63/50 мкм величина снижается в пре-

делах менее 7%. Также необходимо констатировать, что для всех образцов синтезированных алмазов (СА), которые облучались нейтронами, происходит более значительный рост интенсивностей центральных сигналов по сравнению с аналогичными значениями в боковых компонентах спектров ПЦ Р1. Указанную зависимость можно объяснить тем, что эти линии характеризуют суперпозицию изотопа азота ^{14}N при сверхтонком взаимодействии ПЦ Р1 и синглетными линиями парамагнитных центров, имеющих близкие значения d-фактора, но скорости релаксации более короткие по времени.

Ещё одним индикатором с высоким порогом чувствительности, который характеризует кристаллическую решётку СА, необходимо назвать парамагнитный никель. Так, значения сигналов ЭПР, которые характеризуют ионы никеля МГ в узлах кристаллических решёток СА, являются очень чувствительными к условиям синтеза кристаллов алмазов, но при воздействии на них облучения нейтронами не происходит их модификации.

В литературных источниках [47-49] имеется значительное количество данных, характеризующих роль в составе синтетических алмазов различных парамагнитных примесных соединений, в частности, имеются сведения о роли примесей азота и никеля в составе СА, эти данные являются согласованными друг с другом. При этом в литературе между различными авторами существуют разногласия в результатах исследований, посвящённых экспериментально наблюдаемым спектрам синглетных сигналов с величиной g, равной 2,003. Предполагается, что основными вкладками в суммарные широкие сигналы являются: 1) дефекты на поверхностях синтетических алмазов; 2) неспаренные электроны в углеродных атомах, расположенные на sp^2 -гибридизированных орбиталях углерода, а также на структурных неоднородностях областей вблизи границ пирамид, на которых происходит основной рост кристаллов алмазов; 3) сложные комплексы, представляющие собой азотные вакансионно-замещённые комплексы [47-49].

Учитывая сложную природу ПЦ, которая отвечает за ширину сигналов, эффект после облучения нейтронами синтетических алмазов является неоднозначным.

Повышение в кристаллах прочностных характеристик, кроме влияния на прочность снижений содержаний азота в узлах кристаллических решёток, также зависит от снижения ростовых дефектов, содержаний дислокаций и изменениями, происходящими на границах блоков при их взаимодействии с отдельными видами радиационных дефектов, в частности, с подвижными первичными дефектами. Кристаллическая структура СА также улучшается за счёт сужения на более чем 10% линий Р1-центров в СА.

Если мы принимаем гипотезу, что для всего количества азота, который имеется в составе синтетического алмаза, характерно всего два парамагнитных состояния, а именно: 1) когда азот находится в составе примесных соединений, например в составе алюминия или никеля [51, 52]; 2) происходит замещение атомами азота углеродных атомов в кристаллической решётке (ПЦ Р1), то при нейтронном облучении вариации сигналов ЭПР должны быть больше в алмазных кристаллах, имеющих малые содержания примеси алюминия или никеля. Как показывает практика, для атомов дисперсного азота интенсивности его сигналов для $C_A < 50$ ppm снижаются на 30%, и для образцов кристаллов, в которых содержание Al или Ni более 200 ppm интенсивности сигналов снижаются на 10%.

Радиационные методы могут быть использованы для управления параметрами базовых областей приборных структур и полупроводниковых приборов, а также для управления временем жизни дополнительных носителей [4, 35, 50, 52]. В этом случае кристаллы облучают определёнными дозами, позволяющими стабилизировать в полупроводниковых приборах их импульсные характеристики.

Образцы для изучения p⁺-p-nn⁺-структур на основе кремния были изготовлены методом двусторонней одновременной диффузии фосфора и бора, в исследовании использовали плёнообразующие растворы КБК-45 (с содержанием 45% борной кислоты) и КФК-54 (с содержанием 54% фосфорной кислоты), также для 100-вольтовых приборов был использован n-кремний КЭФ 0.5, а для 200-вольтовых – использован n-кремний КЭФ 2.5 с определением после процесса диффузии фосфора удельного сопротивления (ρ_P), которое составляло 0.3-0.5 Ом/см [53]. Поскольку на ограничители напряжения действуют импульсы тока

плотностью в диапазоне от 10^4 до 10^6 А/см², необходимо было принятие специальных конструктивных мер, гарантирующих максимальную импульсную электрическую прочность ограничителей напряжения. Исходя из этого, кристаллоограничитель напряжения был установлен между массивными теплоотводящими дисками-компенсаторами из посеребрённой меди, отличавшимися высокой теплоёмкостью и теплопроводностью. Толщина дисков-компенсаторов составляла около 0.5 мм, исходя из расчёта длительности импульсов, которые в среднем составляли около 1.0 мсек.

Образцы к металлическим выводам припаивали мягкими припоями на основе свинца типа “ПСР-2.5” с определёнными содержаниями серебра, температура плавления припоя составляла в пределах 400 °С. Серебро в припое улучшает его устойчивость к температурным циклам. Боковые поверхности образцов были герметизированы диэлектрической защитой двумя слоями. Изготовленные таким образом ограничители напряжения были помещены в корпуса из пластмассы и металлокерамики. Для готовых диодных структур была определена площадь р-п-перехода, которая составила 54.8 мм² и представляла собой шестигранник. Затем ограничители напряжения облучались быстрыми нейтронами с энергией в пределах от 0.3 до 2.4 МэВ при средних значениях энергии ($E_{ср.}$), составивших 1.3 МэВ. Облучение образцов осуществлялось при температурах не выше 300 К.

Перед началом исследования образцы были разделены на три группы, в свою очередь, каждая группа также делилась на выборки, в которые включали 3-4 образца со схожими параметрами. Одновременно были выбраны контрольные образцы, которые на первом этапе эксперимента не облучались. Удельные базовые сопротивления для 1 и 3 групп находились в пределах $2.0 \leq \rho_0 < 5.0$ Ом·см, для 2 группы данные параметры находились в пределах $0.1 \leq \rho_0 < 0.12$ Ом·см. Первую группу составили однокристалльные образцы 2.5ОН200, напряжение которых было равно от 180 до 210 В. Во вторую группу вошли двухкристалльные образцы 5ОН100, напряжение которых составляло примерно 100 В.

При переключении диодов из прямых направлений в обратные, значения времени, в течение которых происходит восстановление обратного тока ($\tau_{восс.}$),

рассчитываются, как суммы интервалов фаз постоянного тока (t_1) и интервалов времени фаз снижения тока (t_2). Величина восстановления обратного тока ($\tau_{\text{восс}}$) является характеристикой минимальной длительности импульса, при котором для диода сохраняются его индивидуальные функциональные характеристики. Данная величина также зависит от диффузионной ёмкости диода, и также является прямо пропорциональной времени жизни неосновных носителей заряда (τ_p), соответственно, чем меньше для неосновных носителей время жизни, тем меньше для обратного тока будет время его восстановления.

Соответственно, для указанных диодов будет верно следующее выражение:

$$I_{\text{обр}} = I_{\text{пр}} \tau_{\text{восс}} = t_1 + t_2 \text{ или } \tau_p / 2.$$

Также в ограничителях напряжения согласно [52] с использованием переходных характеристик определяли время жизни для неосновных носителей заряда и время, необходимое для восстановления обратного сопротивления, для определения был использован метод переключения направлений из прямых в обратные и нейтральные направления с применением следующего выражения:

$$DV/Dt = -(kT/q) \cdot 1/\tau_p$$

При облучении нейтронами диодов с высокими значениями удельного сопротивления быстродействие возрастает в 6-7 раз, а диодов с низкими значениями удельного сопротивления - в 4 раза. В данном случае также отмечается снижение ёмкостей диодов, соответственно, на 50 и 33%.

1.3. Особенности взаимодействия малого потока тепловых нейтронов с биологическими объектами

Биологические объекты представляют собой сложные объекты с точки зрения изучения их физических свойств. Это связано с наличием множества макромолекул и сложных структурных особенностей. Поэтому изучение влияния различных ядерных излучений на их физические свойства является сложной задачей. Основным этапом этих исследований является выбор изучаемого объекта и физический метод выявления изменений свойств этих объектов под действием излу-

чения. Существует ряд работ по изучению влияния различных видов ядерного излучения на свойства биологических объектов [54-59].

В работе [59] изучено влияние облучения тепловыми нейтронами семян кукурузы различных сортов, облучение семян проводилось перед их посевом. Для эксперимента были отобраны иранские сорта кукурузы – сорт 958 и сорт 704.

В ходе эксперимента проросшие семена сортов кукурузы подсчитывались дважды: первый подсчёт проводили через два дня после их посева, чтобы определить энергию прорастания, второй подсчёт - через 4 дня с целью определить всхожесть семян.

Значения энергии прорастания и всхожесть семян сортов кукурузы были вычислены в трёх пробах, как среднее арифметическое от общего числа проросших семян. Пробы облучали потоками нейтронов следующих диапазонов: $8.64 \cdot 10^8$; $1.73 \cdot 10^9$ и $2.60 \cdot 10^9$ н/см². Также была выбрана контрольная проба семян, которые облучению не подвергались.

На основании результатов опытов было выявлено, что воздействие облучения тепловыми нейтронами на семена кукурузы оказывает положительное влияние на энергию их прорастания, а также на их значения всхожести (рисунок 7). Из рисунка 7 можно сделать заключение, что поток нейтронов стимулирует энергию прорастания семян кукурузы и способствует большей их всхожести. В результате опыта показано, что прорастание образцов, облучённых потоками тепловых нейтронов, увеличивается в пределах 14.6-16.7%, также всхожесть семян кукурузы увеличивается на 2,8-4,7%.

Однако в результате опытов показано, что высокие дозы облучения отрицательно влияют на всхожесть и скорость прорастания семян. Поэтому можно заключить, что для увеличения посевных характеристик семян их необходимо облучать малыми потоками нейтронов.

Авторами [59] приводятся результаты исследования механизма, согласно которому нейтронное облучение оказывает влияние на всхожесть и прорастание семян кукурузы. Исследования проводились ИК-спектроскопическим методом.

На основании анализа полученных результатов показано, при воздействии потоков тепловых нейтронов на семена кукурузы их спектроскопические параметры претерпевают ряд изменений. В частности, показано, что для всех облучённых образцов семян обнаруживаются полосы различных интенсивностей и форм в области от 1800 до 500 см⁻¹. Для наглядности отдельные результаты данного исследования обобщены в таблице 2.

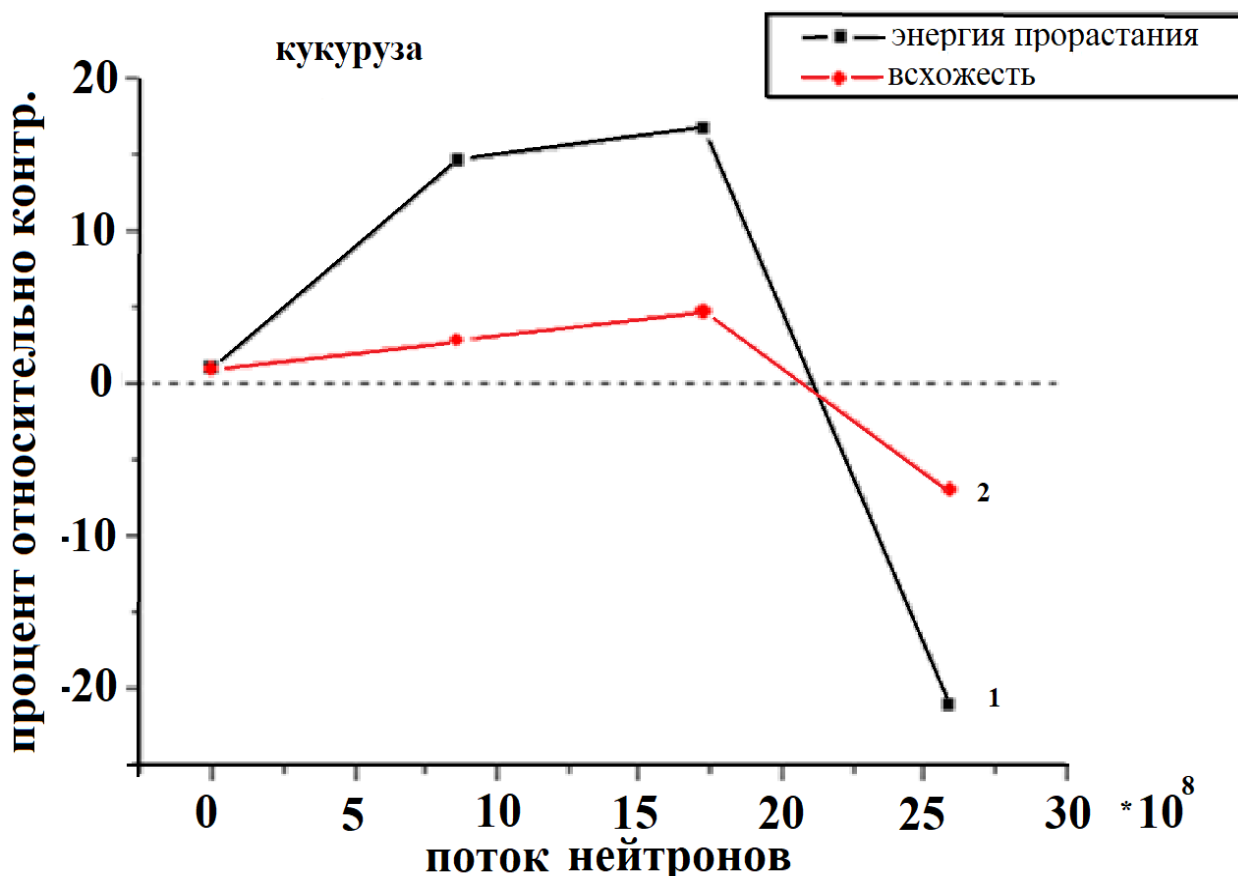


Рисунок 7 – Влияние интенсивности потоков тепловых нейтронов на прорастание семян кукурузы (1 – энергия прорастания, 2 – всхожесть), согласно [59].

Метод облучения тепловыми нейтронами, благодаря простоте и дешевизне (с учётом использования изотопных источников нейтронов) с успехом может применяться также для повышения действия азотных удобрений [60]. Авторами [60] предложено, что при предварительном облучении тепловыми нейтронами азотных удобрений, за счёт реакции захвата азот ^{14}N превращается в азот ^{15}N и это приводит к повышению урожайности зерновых и технических культур [61-64].

Таблица 2 – Влияние различных доз облучения тепловыми нейтронами на всхожесть и появление всходов в образцах семян кукурузы

Кукуруза	Поток нейтронов на телесный угол			
	0	$8.64 \cdot 10^8$ н/см ²	$1.73 \cdot 10^9$ н/см ²	$2.60 \cdot 10^9$ н/см ²
Изменение всхожести к контролю (%)	0	2,8	4,7	-7,0
Изменение появления всходов к контролю (%)	0	14,6	16,7	-21,0
Смещение пика ИК-спектра НН-связи (1/см)	3425	3426	3413	3432
Смещение пика ИК-спектра СН-связи (1/см)	1020	1020	1024	1027

Биологические системы непрерывно подвергаются действию ультраслабых полей термализованных нейтронов (УПТН), воздействие осуществляется нейтронами, которые образуются в результате воздействия на атмосферу космических лучей, также данное облучение имеет место в космическом пространстве и в стратосферном слое атмосферы. В исследованиях [6, 61] были использованы УПТН, представляющие собой разреженный нейтронный газ с низкой плотностью $n \leq 10^{-1}$ см⁻³, соответствующей потоку $\Phi n \leq 10^2$ н/с·см² и средней энергии $E_n > 1-10$ кТ. Обнаружено заметное влияние УПТН на структурную трансформацию макромолекул ДНК при 22°C в плёнках и растворах. Эти образцы ДНК изучали методами инфракрасной спектроскопии (ИКС) и гель-электрофореза. Показано, что УПТН-облучение с флюенсом $F_n \sim 10^7$ н/см² и поглощённой дозой порядка 10 мкГр индуцировало заметные структурные изменения в плёнках, в виде обратимого перехода ДНК «А-форма → разупорядоченное состояние», а в растворах ДНК - образование сшивок и двойных разрывов (ДР) макромолекул.

При облучении водных растворов ДНК медленными нейтронами, передающими свою энергию протонам воды, вдоль трека наблюдается высокая плотность H^+ , замещающих молекулы воды гидратной оболочки ДНК. Повышение рН раствора вызывает разрывы H -связей в молекулах ДНК, нарушение стекинга оснований, изменения конформации спирали, приводящие к изменению интенсивности колебаний (полос ИКС) соответствующих связей оснований, дезоксирибозы и сахаро-фосфатных групп. При агрегации (сшивках) молекул ДНК, интенсивность колебаний, напротив, снижается, и уменьшается подвижность ДНК при геле-электрофорезе. В облучённых растворах и плёнках ДНК наблюдается пост-эффект в течение 1-2 суток, то есть восстановление H -связей между основаниями и превращение сшивок в ДР ДНК [61].

Изучение цито- и гено-токсической активностей УПТН проведено на бактериальных штаммах *E. coli* дикого типа и мутантного IN602 *recA*, дефектного по репарации двойных разрывов ДНК, при облучении в дозах 2-4 мкГр при 19-20°C. Показана зависимость эффекта выживаемости бактерий от дозы и мощности дозы УПТН и повышение выживаемости (гормезис) мутантного штамма. Дозовая зависимость выживания бактерий в интервале $0 \leq D \leq 3.0$ мкГр достигала максимума при $D = 2.5$ мкГр (1,45 отн. ед.), а затем снижалась. При дозах УПТН 8-10 мкГр наблюдалась равная выживаемость бактерий *E. coli* дикого и мутантного штаммов. Причиной обнаруженного гормезиса может быть локальное расплетание участков ДНК, а при повышении дозы - образование сшивок ДНК [64].

Как полагал А.Г. Липсон [6, 61], механизм взаимодействия УПТН с неравновесными конденсированными средами (включая растворы ДНК и живые системы) может быть обусловлен резонансным безизлучательным захватом тепловых нейтронов и образованием составных ядер, которые затем безизлучательно распадаются, генерируя структурные дефекты.

1.4. Выводы по первой главе и постановка задач

Из обзора научной литературы по теме диссертационной работы следует, что изучение воздействия тепловых нейтронов малых потоков на биофизические свойства биологических объектов является актуальной научной задачей. Поэтому вопросы, рассматриваемые в данной работе, являются следующими:

- разработка методики получения и исследование спектральных характеристик бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*;

- исследование влияния малого потока тепловых нейтронов на биологическую активность бактерий и выявление возможных физических механизмов, приводящих к изменениям характеристик этих бактерий;

- проведение модельных экспериментов по влиянию тепловых нейтронов малого потока на биофизические свойства микроудобрений.

ГЛАВА 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

2.1. Методика получения бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*

Микроорганизмы могут оказывать благотворное воздействие на растения напрямую, улучшая питание сельскохозяйственных культур, или косвенно, уменьшая ущерб, наносимый растениям патогенами, вредителями и морозами. К категории микроорганизмов относятся симбиотические или свободноживущие фиксаторы азота, микоризные грибы, солубилизаторы фосфатов и бактерии, стимулирующие развитие корней путем выработки таких соединений, как фитогормоны, тем самым улучшая усвоение минералов и воды [64].

В последние десятилетия сельскохозяйственная отрасль развивается особенно широко. Распространение получили различные биотехнологии, особенно получение бактериальных комплексных удобрений, которые в настоящее время повсеместно используются в мировых масштабах. Бактериальные удобрения при их внесении в почвы оказывают на них благотворное воздействие, поскольку бактерии, входящие в состав указанных удобрений, становятся частью микрофлоры почв, улучшают их плодородность, повышают урожайность. Кроме того, внесённые микроорганизмы, приживаясь в почвенных слоях, становятся частью экосистемы, в процессе своего роста и развития оказывают благоприятное влияние на почвенную структуру, за счёт жизнедеятельности почвенных бактерий происходит накопление в почве питательных веществ, необходимых для произрастающих на ней сельскохозяйственных культур. Также почвенные микроорганизмы способны разлагать сложные органические соединения, тем самым минерализуя почву, что также способствует лучшему усвоению растениями питательных веществ. Стимуляцию указанных процессов осуществляют внесением в почву различных бактериальных удобрений, которые обогащают ризосферу растений полезными микроорганизмами. Используемые в производстве бактериальных препаратов микроорганизмы снабжают растения, как минеральными элементами для питания, так и витаминами, фитогормонами, целым спектром различных физиологически

активных веществ. На сегодняшний день не вызывает сомнений, что использование удобрений на основе различных бактерий не только повышает урожайность ценных сельхозкультур, бактериальные удобрения позволяют сократить использование химических минеральных удобрений и фитосанитарных препаратов, что способствует снижению нагрузки на экологию, обеспечивая более эффективное использование ограниченных земельных ресурсов, прилагая меньшие усилия для их восстановления, снижая тем самым материальные и людские ресурсы при обработке земель.

Азотфиксирующие бактерии – к ним отнесены виды бактерий, которые могут связывать атмосферный азот и затем переводить его в органические азотсодержащие соединения, то есть осуществлять процесс биологической азотфиксации [63, 64].

Зеленые растения не обладают способностью использовать для своего питания чистый азот, который они могут поглощать из почвы или воздуха. Выделять азот из состава различных органических соединений с переводом его далее в чистый атмосферный азот способны денитрифицирующие бактерии. Однако после такой переработки растения не могут его использовать. Напротив, также имеются различные азотфиксирующие микроорганизмы, часто это бактерии, которые обладают способностью связывать азот атмосферы, переводить его в азот органических соединений и, тем самым делать его пригодным для использования растениями. Соответственно, таким образом в природе сохраняется баланс азота [63, 64].

Азотфиксирующими бактериями являются следующие микроорганизмы – это клубеньковые бактерии, цианобактерии, отдельные виды актиномицетов.

Клубеньковые бактерии – представляют собой группу азотофиксирующих бактерий, которые исследованы широко и разносторонне. Согласно современным классификациям принято относить клубеньковые бактерии к роду *Rhizobium*, названия видов клубеньковых бактерий были даны в соответствии с названиями тех растений, на которых эти бактерии выделены из корневых клубеньков. Например, для клубеньковой бактерии *Rhizobium trifolii* – растением-хозяином является клевер, *Rhizobium phaseoli* – в виде клубеньков присутствует

на корнях фасоли, *Rhizobium leguminosarum* – присутствует на корнях гороха. Таким образом, практически для каждого вида растений существуют свои специфические клубеньковые бактерии, то есть эти бактерии обладают видоспецифичностью [65].

Клубеньковые бактерии представляют собой подвижные грамотрицательные палочки в молодых клубнях, которым характерно свободное состояние. При дальнейшем своём формировании и развитии их внешняя форма значительно усложняется и из палочек преобразуются в бактериоиды с неправильной разветвлённые сферической или булавовидной формой. В этом состоянии своего развития они фиксируют молекулярный азот [66].

Клубеньковые бактерии в почвенных слоях существуют свободно, обычно их количество варьируется в зависимости от характеристик почвы, от её типов, характера, использования технологий по обработке почвы. Для клубеньковых бактерий примечательным фактом является то, что они, присутствуя в почвенном слое в свободном состоянии используют только связанный азот, при этом не способны использовать атмосферный азот.

Симбиотические отношения между клубеньковыми бактериями и растениями устанавливаются при прорастании семян. В процессе своего развития корнями синтезируются и выделяются во внешнюю среду питательные вещества, в составе которых находятся органические соединения, они оказывают стимулирующее действие и способствуют размножению, как клубеньковых бактерий, так и ризосферных микроорганизмов. Проникновение клубеньковых бактерий из почвы в корни растений происходит через корневые волоски.

В промышленных масштабах почвы обогащают клубеньковыми бактериями специализированными препаратами на основе этих бактерий, которые при внесении в почву усиленно размножаются. Кроме того, специализированными препаратами на основе клубеньковых бактерий обрабатывают семена перед их посевом, в основном эти препараты актуальны для бобовых сельскохозяйственных культур [67-74].

Для обогащения почв связанным азотом широко используются бактериальные или биологические удобрения [64]. В сельскохозяйственной отрасли в последние десятилетия широко используются различные виды бактериальных удобрений - фосфобактерин, азотобактерин, ризоторфин, нитрагин и др. Азотфиксирующими бактериями в почву выделяется не только азот, но и различные стимуляторы роста (гетероауксин), фитогормоны, витамины, гиббереллины и др. Так, использование препарата на основе бактерий *Bacillus megaterium* - фосфобактерина позволяет разлагать сложные органические фосфорные соединения на более простые соединения, которые растения могут легко усваивать. Также препарат фосфобактерин способствует улучшению азотного питания растений, обогащению почвы витаминами.

Представители микрофлоры, которые находятся в почвенном слое, непосредственно влияют на плодородность, соответственно, повышая урожайность сельхозкультур. Растущие и развивающиеся микроорганизмы, обитающие в почвах, улучшают строение и структуру почв, способствуют накоплению в почве питательных веществ, минерализуют неорганические и органические соединения состав почв, разлагают сложные фосфорные и азотные соединения, в результате чего они превращаются в простые соединения, которые корневые системы растения могут легко усвоить.

Получение бактерии *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ

Монолитным методом извлекают корневую систему бобового растения с клубеньками. Используя мягкую щетку, нужно удалить пылевидных частиц почвы. Промывают корни с клубеньками под проточной водой на ситах с диаметром отверстий 1 мм, трижды меняя воду. Затем клубеньки срезают с корней переносят в чашку Петри со стерильной водопроводной водой, промывают в течение 1-2 мин, выдерживают в спирте 1 мин и промывают в трех чашках со стерильной водой, поэтапно по 10 мин в каждой. После того как промывают клубеньки, их переносят в стерильную чашку для измельчения скальпелем в капле воды. Одну петлю взвеси переносят на поверхность бобового агара в чашках Петри и размазывают шпателем. Посев проводят в две чашки последовательно, используя тот же

шпатель. Через 1-2 суток инкубации в термостате при 28— 30° в чашках вырастают слизистые беловатые непрозрачные колонии, порой похожи на капли стеарина. Бобовый агар готовят из фасолевого отвара: 50г белой фасоли заливают 0,5л дистиллированной воды и варят до готовности 30 минут. Отвар процеживают через марлю. К отвару добавили, в г/л: сахароза – 20; KH_2PO_4 – 1; MgSO_4 – 0,3; агар – 15; рН 7,0. Объем доводили до первоначального и стерилизовали 30 минут при 1 атм. На этой среде клубеньковые бактерии образуют обычно бесцветные или молочные, часто слизистые колонии.

Питательные среды стерилизуют паром. Стерилизация паром осуществляется в автоклаве, где давление насыщенного пара превышает 100⁰. Обычно питательные среды стерилизуют автоклавированием в течение 20-30 мин при 121⁰.

Питательная среда – однокомпонентный или многокомпонентный субстрат, применяемый для культивирования микроорганизмов или культур клеток высших организмов.

Микробиологическую посуду (пробирки, колбы, чашки Петри) стерилизуют сухим жаром (горячим воздухом) в сушильных шкафах по следующему режиму: 180⁰ - 200⁰, 2 ч. Металлические и стеклянные предметы стерилизуют прокаливанием в пламени – петли, иглы, горлышки колб, бутылок, предметные и покровные стекла, пробирок.

Рабочее место обычно стерилизуют дезинфицирующими средствами, например, этиловым спиртом. Для стерилизации лабораторных боксов используют ультрафиолетовое облучение в диапазоне 254 нм в течении 2 часов. В качестве источника ультрафиолетового излучения обычно используются специальные кварцевые бактерицидные лампы.

Питательную среду лучше всего наливать при температуре среды около 50°С, так как в этом случае на крышках чашек не образуются капли воды в результате конденсации пара. Для предотвращения расплзания колоний на агаре чашки со средой подсушивают в сушильном шкафу при 60-70°С до появления муарового рисунка на поверхности агара или в воздухе, выдерживая в течение су-

ток после разлива среды. Когда затвердеет среда, нужно перевернуть чашку Петри и дать культуре настояться около 3 дней;

Азотобактерин рекомендуется применять только на тех почвах, в составе которых находятся микроэлементы и фосфор в определённых количествах. Азотобактерин нашёл применение при бактеризации компоста, рассады растений, семян. Внесение в почвенный слой азобактерина на 10-15% увеличивает урожайность сельхозкультур. Для обработки семян злаковых культур применяют метод опудривания сухим азотобактерином, при этом на порцию семян, которая будет высажена на одном гектаре, должно приходиться около 100 млрд. клеток. При высаживании рассады их корневую систему предварительно смачивают суспензией из бактерий и воды. Суспензия готовится следующим образом: в 15 литрах воды растворяют одну норму для одного гектара. Обработку торфяным или почвенным азотобактерином предварительно семена обрабатывают влажным препаратом, затем подсушивают для более лучшего распределения препарата. Для рассады суспензию препарата используют для увлажнения корневой системы [73].

Получение бактерии *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*

Фосфобактерин – является высокоэффективным бактериальным удобрением на основе ростостимулирующих микроорганизмов - почвенных бактерий *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*. Эти бактерии увеличивают продуктивность овощных, злаковых и технических сельхозкультур. Фосфобактерин – это порошкообразное вещество, имеет желтоватый или светло-серый цвет.

Бактерии, присутствующие в составе фосфобактерина, могут переводить сложные фосфорные органические соединения (например, нуклеопротеиды, нуклеиновые кислоты) и минеральные фосфаты, которые растения не могут усваивать, в формы и соединения, доступные для усвоения растениями. Также различные виды почвенных бактерий могут вырабатывать биологически активные вещества, например, никотиновую кислоту, пантотеновую кислоту, биотин, пиридоксин, тиамин и другие, которые усиливают рост растений. Фосфор содержится в почве в основном в виде труднодоступных минеральных и органических соедине-

ний, которые становятся доступными для растений только после их мобилизации микроорганизмами.

Выращивание фосфобактерина аналогично азотобактерину и отличается составом питательной среды.

Для выращивания бактерий *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* оптимальным составом питательной среды для выращивания является среда с включением следующих компонентов: Кукурузное рыльце – 1,8% залили 1л водопроводной водой и варили до готовности. Отвар фильтровали через марлю. К отвару добавили, в %: Меласса -1,5; Сульфат аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ -0,1; Мел (CaCO_3) -1,0; Агар - агар - 7,5; pH 7,0 и стерилизовали 30 минут при 1 атм.

Процедура культивирования

- 1) Аккуратно разливают маннитол-агаровую среду в 3 стерильные пробирки;
- 2) Добавляют несколько петель взвеси в пробирки с помощью стерилизованных пипеток;
- 3) Тщательно перемешивают содержимое;
- 4) Разливают содержимое по разным чашкам Петри и инкубируют при температуре 28-30°C;
- 5) Когда среда затвердеет, нужно перевернуть чашку Петри;
- 6) Нужно дать культуре настояться около 3 дней;

По истечению 3 дней нужно будет переложит их, из чашки Петри в пробирку. После этого их облучали в потоке тепловых нейтронов с использованием плутониевого-бериллиевого источника (энергия источника Pu-Be составляла 0.0-10.0 Мэв), диапазон мощности потока тепловых нейтронов варьировали с в пределах от $1.8 \cdot 10^6$ до $1.3 \cdot 10^8$ нейтрон/см².

Облученные бактерий нужно высушить в сушильном шкафу при температуре 26-28°C около 20-30 мин. После чего их можно будет измельчить. Небольшое количество сушеных бактерий растирают в агатовой ступке до получения порошка, добавив к ним KBr перемешивают до однородной смеси (1:10). Полу-

ченную смесь прессуют в специальной форме, получая таблетки или диски, прессование проводят под большим давлением в течение 2-3 минут.

Фосфобактерин рекомендуется использовать на чернозёмных почвах со значительными содержаниями органических фосфорных соединений. Фосфобактерин используют для широкого спектра сельскохозяйственных культур - сахарной свёклы, картофеля, зерновых культур и др., повышая их урожайность.

К примеру обработку клубней картофеля фосфобактерином проводят следующим образом. Готовят смесь, в состав которой входит сухой фосфобактерин и наполнитель (почва зола и др.), соотношение компонентов составляет 1:40. Для порции препарата, рассчитанной для одного гектара почвы, смешивают 5 грамм фосфобактерина и 200 грамм наполнителя. Полученной таким образом суспензией из спор и наполнителя равномерно опрыскивают клубни картофеля, суспензия готовится следующим образом: 15 г фосфобактерина растворяют в 15 литрах воды. При такой обработке урожайность картофеля увеличивается на 10% и более [74].

2.2. Приборы для регистрации ИК-спектров, методика приготовления образцов для регистрации ИК-спектров, применение ИК-спектроскопии в микробиологии

Спектроскопия является разделом науки, которая исследует взаимодействие электромагнитного излучения с различными веществами, получая информацию о исследованных веществах, составляющих их молекул, атомов, помогает определить строение и характеристики веществ. В спектроскопии в настоящее время используются все виды электромагнитных излучений – радиочастоты, излучение микроволн, ультрафиолетовые лучи, инфракрасные лучи, рентгеновские лучи, а также γ -лучи. Методы спектроскопии поглощения (абсорбционные спектроскопические методы) основаны на влиянии электромагнитных излучений на вещества.

Спектроскопия подразделяется на молекулярную и атомную, в зависимости от исследуемых объектов. Так, в молекулярной спектроскопии исследуются строение, свойства и характеристики молекул, в атомной спектроскопии исследуются строение, свойства и характеристики атомов. Спектроскопия основана на приме-

нении спектрального анализа, сущность которого заключается в способностях молекул и атомов в поглощении или испускании различных видов электромагнитных излучений.

Одним из разделов спектроскопии является инфракрасная спектроскопия, с помощью которых получают и исследуют спектры инфракрасной области излучений. С помощью инфракрасной спектроскопии в основном исследуются молекулярные спектры отражения, поглощения и испускания, поскольку в области инфракрасных лучей располагаются в основном спектры молекул – это спектры вращательные и колебательные. Инфракрасная спектроскопия также специфичная, как и отпечатки пальцев человека. Любое индивидуальное вещество можно идентифицировать, если известен его спектр. С помощью методов инфракрасной спектроскопии определяют значительное количество характеристик индивидуальных веществ – это классификация вещества по структурному типу, определение упорядоченности в структуре вещества, наличие изомеров, качественные характеристики примесных соединений, состояние воды в веществе и ряд других характеристик, которые для каждого вещества являются индивидуальными [75].

Инфракрасный анализ нашёл широкое применение для аналитических и структурных исследований всех химических элементов, химических соединений, исключение составляют только металлы. Методы спектроскопии, например, колебательной имеют преимущества, например, перед рентгеноструктурным анализом, которые проявляются в том, что методами спектроскопии можно исследовать практически весь спектр органических и неорганических веществ во всех их агрегатных состояниях, а именно растворах, газах, жидкостях, кристаллах или аморфных состояниях, причём при использовании других методов исследования таких результатов достичь не удаётся [76- 78].

Для спектральной инфракрасной области выделяется несколько диапазонов в зависимости от используемых оптических материалов, которые в этой инфракрасной области должны быть прозрачными:

- 1) диапазон в пределах от 0.8 до 2.0 мкм – является самой ближней инфракрасной областью, где применяются оптические материалы – кварцевое стекло и

кварц;

2) диапазон 2.4 мкм – фундаментальная срединная инфракрасная область, являющаяся основной, где применяются следующие оптические материалы: щелочногалогенидные кристаллы в фазах порошка или монокристалла - CsI, KBr, NaCl, LiF. Спектрометрические исследования органических соединений и минералов проводят в этом диапазоне, но в современных ИК-спектрометрах вместо солевой оптики используют дифракционные решётки);

3) диапазон <200 мкм – является дальней инфракрасной областью, в которой происходит исследование неорганических соединений с использованием дифракционных решёток.

Различные современные приборы, применяемые в области ИК-спектроскопии с целью получения для веществ индивидуальных спектров в области инфракрасного излучения, работают в диапазоне ИК-излучения 4000-400 см⁻¹ или от 2.5 до 25 мкм, то есть в срединной инфракрасной области

Электромагнитные излучения в любых диапазонах частот при попадании на вещество изменяются, как качественно, так и количественно: определённая часть энергии поглощается веществом, часть отражается, а часть энергии через вещество пропускается свободно, исходя из этого, справедливо выражение:

$$I_0 = I_{\text{отр}} + I_{\text{погл}} + I_t$$

в котором: I_0 – величина интенсивности падающего светового потока, лм (люмен);

$I_{\text{отр}}$ - величина интенсивности отражённого светового потока, лм;

$I_{\text{погл}}$ - величина интенсивности поглощённого потока, лм;

I_t - величина интенсивности прошедшего светового потока, лм.

Величины интенсивности поглощения, зависящие от доли падающего светового потока, который поглощается веществом, являются важными индивидуальными характеристиками для каждого отдельного вещества, такой же важной, как и длина волны каждого вещества, которая характеризует в веществе его спектр поглощения и полосы поглощения. Величины длины волны, аналогично величинам интенсивности поглощения находятся в значительной зависимости от условий внешней среды, в основном от концентрации вещества, температуры и

используемого растворителя.

При регистрации в ИК-области спектров поглощения, аналогично регистрации спектров в видимой области и УФ-области (ультрафиолетовой) между концентрацией веществ, которые поглощают энергию, и пропусканием системой энергии наблюдается зависимость, которая определяется основным законом светопоглощения – законом Бугера-Ламберта-Бера:

$$D = \lg I_0/I = \varepsilon \cdot c \cdot d$$

в котором: D – величина оптической плотности;

I_0 - величина интенсивности падающего светового потока, лм;

I - величина интенсивности прошедшего светового потока, лм;

c - молярная концентрация, моль/л;

d - толщина поглощающего слоя, мм;

ε – величина молярного коэффициента поглощения для конкретной температуры и волнового числа.

Соответственно, суть метода ИК-спектроскопии заключается в следующем. Проходящие сквозь определённое вещество инфракрасные лучи оказывают влияние на колебательные уровни молекул, возбуждая их. При совпадении частоты инфракрасного излучения и частоты колебания молекулы осуществляется резонансное поглощение энергии и образуются полосы поглощения. Каждая полоса поглощения имеет свой набор характеристик – это длина волны λ (или частота колебания ν), интенсивность и форма. Каждую ИК-полосу поглощения можно охарактеризовать определённой формой на основании выражения:

$$k = f(A),$$

в котором k – величина коэффициента поглощения.

Метод инфракрасной спектроскопии (ИКС) для исследования веществ подразделяется на три основных этапа: 1 - подготовка образцов, 2 - регистрация спектра для каждого индивидуального образца, 3 – интерпретация полученного спектра. Каждый из этапов важен для получения целостной картины исследования спектральных характеристик вещества, так как на основании полученных спектров можно получить максимально полную информацию о каждом индивидуаль-

ном веществе – его свойствах и строении.

Задачи ИК-спектроскопии являются важными и многогранными, среди них наиболее важными можно выделить следующие: определение индивидуального вещества; определение качественного состава в смесях неорганических и органических соединений (качественный анализ); проведение количественного анализа для смеси соединений с определением количества каждого компонента и др. Соответственно, метод инфракрасной спектроскопии использует ИК-спектры поглощения, которые возникают при прохождении ИК-излучений через образцы исследуемых веществ.

Получение ИК-спектров для каждого индивидуального вещества позволяет без проведения математических и статистических расчётов по величинам спектральных пиков, являющихся индивидуальными для каждого вещества, определять в составе молекулы различных связей и функциональных групп и, соответственно, устанавливать строение молекул для каждого вещества.

Качественный и количественный анализ спектров излучения веществ предполагает использование для исследований только особо чистых компонентов. Интерпретация полученных спектров основана на сравнении полученных в эксперименте спектров с определёнными характеристиками с уже известными спектрами для каждого индивидуального вещества – эталоном, значения которого имеются в справочной литературе. Определение проводится на основании нескольких полос поглощения в спектре. При получении картины полного совпадения всех имеющихся в спектре полос можно утверждать, что в исследуемом образце точно присутствует конкретное вещество.

Автора [75] использовали метод ИК-спектроскопии с целью определения количественных характеристик смеси веществ, в которой присутствует несколько соединений. Данная методика является общепринятой, поскольку объединяет в себе сразу количественную и качественную оценку вещества. И интенсивности полос поглощения в спектрах, в соответствии с законом Бугера-Ламберта-Бера, зависят от концентрации соединения и соотношения в веществе концентраций этих соединений.

Согласно указанному выше закону, сущностью количественного анализа в ИК-спектроскопии является измерение интенсивности полос в спектрах поглощения каждого вещества. Данные измерения являются достаточно точными и согласуются с методиками, согласно которым первоначально строят графики зависимости интенсивности полос поглощения каждого соединения от его количественного содержания в смеси вещества.

В современной практике исследований преимущественно используются Фурье-спектрометры ИК-диапазона. Исходя из этого, в данном разделе мы кратко рассмотрим принципы работы Фурье-спектрометров, регистрацию ИК-спектров с применением Фурье-спектрометров, методы пробоподготовки и ряд других вопросов, посвящённых Фурье-спектрометрии [79]. В целом принципы работы Фурье-спектрометров ИК-диапазона являются относительно простыми. Однако электрические и механические устройства, необходимые для воспроизводства изменений поглощаемой энергии, то есть для максимальной точности регистрации спектров, являются довольно сложными.

Также нужно указать, что ИК-спектрометры по сравнению с спектрометрами, фиксирующими ультрафиолетовые излучения имеют некоторые различия. Так, они отличаются оптическими составляющими приборов. Известно, что в инфракрасных лучах прозрачность различных материалов также различна, исходя из этого в ИК-спектрометрии используют светоделители инфракрасного излучения, линзы, зеркала с вогнутыми и плоскими поверхностями, которые покрываются снаружи материалами, хорошо отражающими ИК-лучи (это алюминий, золото, медь, серебро, особенно сильными отражающими свойствами обладает фольга из этих элементов) [80].

В ИК-спектрометре находятся такие важные составные компоненты, как: источник излучения, щель, рассеивающие элементы, зеркала, приёмник излучения. В рамках нашего исследования кратко приведём основные принципы работы любых ИК-спектрометров. Излучение инфракрасного диапазона, полученное от специальных источников (например, в последние десятилетия – это различные лазеры) при прохождении сквозь изучаемое вещество подвергается спектральному

разложению под действием специальных дифракционных решёток и призм. Затем при спектральном разложении отдельные части спектра проходят через приёмник излучения – последовательно через фотоприёмник → болометр → радиационную термопару, где они усиливаются, и происходит их фиксация с помощью записывающих устройств. В современных ИК-спектрометрах в их конструкцию входит автоматическая регистрация спектров и их компьютерная обработка с выводом конечного результата по идентификации веществ.

Метод Фурье-спектроскопии основан на получении инфракрасных спектров в два этапа. На первом этапе происходит регистрация интерферограммы, то есть выходного светового потока, как функции разности хода входной волны, которая разделяется на несколько когерентных пучков. Затем спектр вычисляется по разности хода входной волны обратным преобразованием. На втором этапе происходит получение большого потока данных, которые необходимо математически обработать, именно поэтому метод Фурье-спектроскопии стал использоваться широко относительно с недавнего времени, примерно с середины прошлого столетия, когда появились компьютеры и возможность компьютерной обработки получаемых массивов данных. Однако методами Фурье-спектроскопии получить спектры сложно и поэтому исследования часто проводятся другими ИК-спектральными приборами, несмотря на точность и индивидуальность спектров, полученных Фурье-спектроскопией. Ниже приведём достоинства и отличительные характеристики Фурье-спектроскопии в сравнении с другими приборами по определению спектральных характеристик веществ:

- 1) Использование Фурье-спектрометров позволяет одновременно регистрировать весь спектр излучений.

- 2) Фурье-спектрометры имеют значительно большие входные отверстия в интерферометре по сравнению с другими спектральными приборами, в которых данный функционал представлен диспергирующими элементами одинакового разрешения, что позволяет Фурье-спектрометрам выигрывать в светосиле, соответственно, а) в Фурье-спектрометрах время регистрирования спектров значительно меньше; б) соотношение шум-сигнал также ниже; в) разрешение выше; г)

габариты меньше.

3) Также методы Фурье-спектроскопии позволяют более точно определять длину волны по сравнению с другими спектральными методами. Так, например, длину волны дифракционными методами определяю косвенно, а при использовании Фурье-спектрометров этот параметр определяется напрямую.

Для исследования веществ ИК-спектроскопическими методами предварительно проводят пробоподготовку, готовят образцы. При неправильной пробоподготовке или недостаточном содержании в образце определяемого вещества то даже при наличии самых современных спектрофотометров результат будет неудовлетворительный, а полученные спектры не информативными. Поэтому выбор методики пробоподготовки в зависимости от целей и объектов исследования должен быть предметом наибольшего внимания. Если правильно подобрана методика и пробообработка проводится в соответствии с ней, то результаты будут положительными. Методом ИК-спектроскопии можно исследовать практически все вещества, кроме металлов, причём нет необходимости учитывать их физическое состояние, молекулярную массу, растворимость, соотношение фаз, кристаллическую форму и другие характеристики [81-84].

В качестве наиболее часто используемой методики рассматривается методика, когда твёрдые образцы для исследования прессуются в виде таблеток. Данная методика прессования впервые разработана в 1952 году, её начали широко использовать в Германии и США, и в дальнейшем её в основном используют в ИК-спектроскопии при пробоподготовке образцов [83, 84].

Кратко рассмотрим метод прессования таблеток в ИК-спектроскопии. Испытуемое твёрдое вещество определённого небольшого количества тщательно растирают до получения порошка, добавляют галогенид щелочного металла и перемешивают, растирая в агатовой или сапфировой ступке. В качестве галогенида в основном используют KBr, который в данном случае выполняет функцию “наполнителя”. Полученную смесь твёрдого вещества и наполнителя прессуют в специальной форме, получая таблетки или диски, прессование проводят под большим давлением (~10-12 т/см) в течение 2-3 минут.

Чтобы концентрации исследуемого вещества можно было измерять и при этом они соответствовали диапазону измерений, необходимым условием является правильный выбор массы образца с исследуемым веществом. При недостаточной низкой массе вещества пики поглощения на спектрограмме будут малы и проявляться не чётко, при этом возникнут сложности в их количественном измерении и качественном определении, то есть полная картина будет искажена. Напротив, если масса исследуемого вещества (минерала) будет избыточной, при этом максимальные пики поглощения ИК-спектров также будут очень большими и, возможно, будут находиться за пределами измеряемых диапазонов, что также отрицательно повлияет на конечный результат.

Однако рассмотренная методика обусловлена прессованием образцов в таблетки в атмосферном воздухе и поэтому наряду с достоинствами также имеет некоторые недостатки. Спрессованное с наполнителем вещество в виде таблетки быстро мутнеет даже при хранении в сухой атмосфере без доступа влаги, это происходит из-за присутствия в спектрах полос поглощения углекислого газа и адсорбированной воды за счёт высокой гигроскопичности KBr, что также искажает спектральную картину.

Получение микротаблеток. В настоящее время разработаны и используются современные микропрессформы, с помощью которых прессуются таблетки малых диаметров от 0.5 до 1.5 мм, в них содержание наполнителя – KBr также очень незначительно и составляет <4 мг, в таблетке содержание исследуемого вещества достаточно в пределах <0,01 мг. Данная методика имеет много преимуществ по сравнению с другими методиками, позволяя при малых количествах исследуемых веществ получать качественные спектры и количественные данные. Также к достоинствам можно отнести использование настольных малогабаритных прессов, с помощью которых таблетки можно прессовать как автоматическим, так и ручным методом, прикладывая незначительные усилия.

После прессования получается прозрачная таблетка, в составе которой находится исследуемое вещество и наполнитель KBr. Таблетка закрепляется в специальный держатель, который вносится в пучок излучения спектрофотометра,

затем ИК-спектры поглощения регистрируют известными методами [83, 84].

В литературных источниках также имеются сведения о том, что КВг может поглощать воду не только из атмосферного воздуха. Даже при растирании вещества с бромистым калием в ИК-спектрах полученных таблеток отмечается значительное увеличение интенсивности полос поглощения воды. Также на интенсивность проявления этих полос влияние оказывает время растирания вещества с КВг, при увеличении времени растирания интенсивность полос также увеличивается. Но в современных Фурье-спектрометрах имеются в программном обеспечении специальные функции, которые вычитают фоновые значения (воздух, присутствующие пары воды, присутствующие другие вещества и др., которые находятся на линии падающего пучка излучения) из общих полученных значений интенсивности полос поглощения, что позволяет устранить имеющийся недостаток [85].

Таким образом, можно заключить, что метод изготовления таблеток прессованием имеет много преимуществ по сравнению с другими методами, хотя не лишён и некоторых недостатков, которые, однако, не снижают полной картины использования этого метода. Применением данного метода обеспечивается получение для всех известных твёрдых веществ ИК-спектров хорошего качества, зачастую другими методами невозможно получить настолько информативные ИК-спектры. Неслучайно поэтому все приведённые в большом количестве научных литературных источников ИК-спектры веществ получены методом таблетирования образцов с КВг.

Также необходимо отметить ещё одно важное преимущество метода по сравнению с другими - при исследовании вещества в ИК-спектре не проявляются полосы поглощения для растворителя, которые в других методах искажают общую картину определений. Отметим, что для КВ полосы поглощения не проявляются в спектре в диапазоне 2.0-25.0 мкм. Также для исследуемых таблеток в допустимых пределах находится и их светорассеяние. Также таблетки показывают явное преимущество по сравнению с суспензиями, поскольку в таблетке легко определяются такие параметры, как толщина слоя и концентрация, что для суспензии является очень проблематичным. Таким образом, метод таблетирования

является наиболее перспективным при количественных определениях составов исследуемых веществ.

В основном метод прессования таблеток с наполнителем бромистым калием используется для исследования следующих образцов: 1) которые не растворяются в обычно используемых растворителях; 2) являются аморфными или их кристаллическая структура является устойчивой; 3) в их составе отсутствуют ионы, способные к обмену [83].

В данном методе полученные спектральные данные записываются в виде зависимости длины волны излучения и коэффициента поглощения, то есть данные получают в виде двух величин, которые являются переменными – это фактор длины волны и фактор интенсивности поглощения. Получение наиболее правильных данных зависит от множества факторов, таких, как области исследования, условия проведения эксперимента, чистота исследуемого образца, также зависит от последующего применения полученных значений [85].

Используя вышеуказанные методы исследования, измерения основных параметров (интенсивности полос, толщины слоя, концентрации вещества) осуществляются в следующих единицах измерения: толщина слоя - в мм или см; концентрация – может измеряться в нескольких единицах – объёмных процентах, весовых процентах, моль/л, г/л, г/мл, мг/л и др.

Запись данных в ИК-спектрах обычно производится в единицах измерения – процент поглощения или процент пропускания. Кроме того, для характеристики спектров поглощения в ИК-спектроскопии применяют следующие величины:

- 1) длина волны максимального поглощения и интенсивность максимального поглощения;
- 2) длина волны минимального поглощения и интенсивность минимального поглощения;
- 3) длина волны перегиба кривой линии поглощения, и интенсивность данной величины.

Записи спектров при исследовании любых веществ регистрируются в диапазоне от 400 до 4000 см^{-1} , то есть во всех исследуемых диапазонах, позволяющих

увидеть все имеющиеся области ИК-поглощения в исследуемых образцах. Также для исследуемых веществ происходит регистрация обзорных спектров, в которых отмечаются характерные полосы ИК-поглощения, ответственные за качественный анализ веществ, также проявляются характерные полосы в диапазоне от 3200 до 3600 см⁻¹, характеризующие поглощение из состава присутствующей в образцах воды и ОН-групп. Таким образом, на основании поставленных задач для детального исследования выбирается та или иная область спектра.

Значительные трудности возникают при правильном и последовательном подходе к проблеме возникающих в сложных веществах классических колебаний. Исходя из этого, в настоящее время для интерпретации спектров на практике осуществляют достаточно удачный комплекс, включающий, как экспериментальные, так и теоретические методы. В изучении инфракрасных спектров веществ главной задачей являются их правильная интерпретация. Действительно, если частота соответствующих полос спектров и частота колебаний комплексных ионов и молекул зависит от их геометрического строения, сил взаимосвязей в молекулах, массы атомов, то интенсивность полос находится в зависимости от характера химических связей в молекулах.

Принцип интерпретации полученных полос спектров основан на сравнении в рассматриваемых молекулах или в группе отдельных атомов их определённых полос, которым характерны колебания определённой частоты, которые, в свою очередь, представлены в различной справочной литературе в качестве эталонов.

Существование собственных характерных частот для каждого вещества можно объяснить следующим образом. Колебания определенных групп атомов имеют слабые связи с колебаниями атомов в других частях молекул. Поэтому для этой группы атомов их частота колебания зависит только от индивидуальности их строения, причём на эту группу атомов окружающие атомы не оказывают значительного влияния. Поэтому для различных молекул, в составе которых находится данная группа атомов, спектральные характеристики также будут различными, но при этом в колебательном спектре молекул будут выявлены несколько одинаковых или близких частот.

В ИК-спектроскопии необходимо использовать чистые компоненты для получения информативных количественных и качественных спектральных характеристик исследуемых веществ. При сравнении полученных спектров со спектрами веществ (эталонными спектрами), в смеси веществ находят все полосы поглощения эталона. Когда в спектре анализируемого вещества обнаруживаются все полосы поглощения эталонного вещества, в этом случае предполагается, что данное вещество в образце присутствует [84].

В последние годы существует большое количество атласов и автоматизированных картотек спектров, согласно которым можно идентифицировать все вещества и соединения, если оно уже известно и для него имеется соответствующий спектр.

Применение ИК спектроскопии в микробиологии

ИК-спектроскопия с Фурье-преобразованием в настоящее время всё шире используется в микробиологии для детекции вегетативных клеток микроорганизмов, а также спор бактерий [85-88]. Установлено, что разные виды микроорганизмов характеризуются индивидуальными Фурье-спектрами [79]. Этот эффект обусловлен уникальным для каждого вида набором макромолекул (белков, липидов, углеводов, нуклеиновых кислот), что позволяет дифференцировать бактерии на разных таксономических уровнях - подвидах, сероварах и штаммах. Показано, что с помощью ИК-Фурье-спектроскопии можно дифференцировать штаммы одного рода бактерий с высокой точностью. Эффективность применения этого метода доказана при идентификации различных видов микроорганизмов, в том числе молочнокислых бактерий, дрожжей, патогенных бактерий, бацилл и др. микроорганизмов с достоверностью 93,2-97,1%. Это позволило получить информацию о структуре определённых фракций бактерий (клеточных стенок, цитоплазматического вещества, пептидогликана, тейхоевых кислот, ДНК) [61, 69-72]. Такая возможность обусловлена тем, что ИК-спектры поглощения характерных групп не зависят от каркаса всей молекулы и не меняются при переходе от одного соединения к другому [87, 88]. С помощью ИК-спектроскопии можно идентифицировать разнообразные функциональные группы: гидроксильные, карбонильные, кар-

боксильные, амина-, амидные и др., а также двойные и тройные углерод-углеродные связи, образование водородных связей [76-79].

2.3. Методы получения потока тепловых нейтронов

Бактерии облучали тепловыми нейтронами с использованием Pu-Be источника с энергией нейтронов в диапазоне 0.0-10.0 Мэв. Был разработан и сконструирован специальный контейнер для выделения тепловых нейтронов. На рисунке 8 показано расположение источника нейтронов и образца для облучения в блоке из парафина [89, 90].

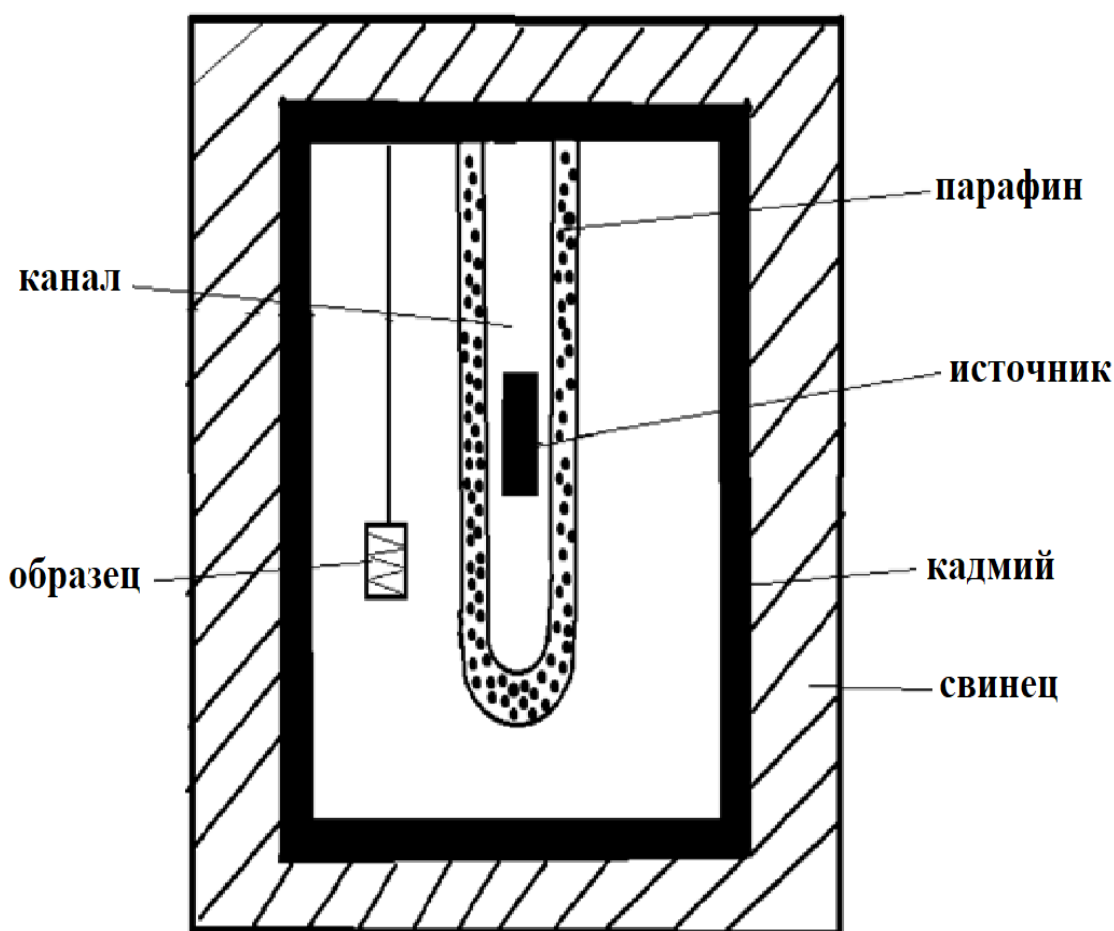


Рисунок 8 - Схема расположения образца и источника нейтронов в парафиновом блоке [89, 90].

Бак источников нейтронов выполнен из железа листового с толщиной 4 мм. Внутренняя часть бака заполнялась парафином. Источник на основе Pu-Be располагался в середине бака в специальном канале. Дополнительно источник поме-

щался внутрь цилиндрического держателя из пластмассы диаметром 2.7 см и высотой 4см. Размеры специального канала, в котором находился Pu-Be-источник, составляли: диаметр 3.7 см, высота 25 см. Этот канал являлся источником быстрых нейтронов, снаружи канал быстрых нейтронов покрывался парафиновым слоем, его толщина составляла 4.15 см. Также под парафиновым слоем располагался канал тепловых нейтронов с размерами: внутренний диаметр – 12.0 см, внешний диаметр – 18.5 см, ширина - 2.6 см с внешним диаметром. Таким образом, при прохождении через замедлитель (парафиновый слой) происходит превращение быстрых нейтронов в тепловые нейтроны. Следовательно, второй канал является каналом тепловых нейтронов. В баке всё оставшееся пространство также залито парафином. Снаружи бак представляет собой куб со сторонами 70 см.

Чтобы установить нейтронный источник в соответствующее положение в пространстве, пользовались специальным подъёмником, подъёмник позволял регулировать нейтронный источник с целью эффективного облучения образцов различных форм.

Среди большого числа различных методов обнаружения и измерения потоков тепловых нейтронов наиболее часто используют метод активации, который является достаточно удобным и простым [91]. Пусть в месте, где необходимо измерить поток тепловых нейтронов (f -нейтрон/см²·сек), помещается тонкий детектор, содержащий n атомов вещества с большим эффективным сечением захвата тепловых нейтронов σ см². В результате облучения тепловыми нейтронами в детекторе за одну секунду образуется N радиоактивных атомов:

$$N = fn \sigma \quad (2.1)$$

Скорость распада возникающих атомов искусственного радиоактивного изотопа определяется соотношением:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N_t \quad (2.2)$$

где: λ - постоянная распада искусственного радиоактивного изотопа;

N_t - число искусственных радиоактивных атомов, накопившихся в образце к моменту времени t .

Увеличение числа радиоактивных атомов в детекторе за время от t до $t+dt$

будет равно:

$$dN_t = Ndt - \lambda N_t dt. \quad (2.3)$$

Из выражения (3) можно определить число радиоактивных атомов N_t , накапливающихся в детекторе после облучения нейтронами в течение t сек:

$$N_t = \frac{N}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t}) = \frac{fn\sigma}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t}). \quad (2.4)$$

Активность облучаемого детектора A_t в момент t будет равна:

$$A_t = \lambda N_t = fn\sigma(1 - e^{-\lambda t}), \quad (2.5)$$

откуда плотность потока тепловых нейтронов определяется выражением:

$$f = \frac{A_t}{n\sigma(1 - e^{-\lambda t})} = \frac{A_t}{n\sigma\left(1 - e^{-\frac{0.693 t}{T_{1/2}}}\right)}. \quad (2.6)$$

Выражение (6) показывает, что величина нейтронного потока может быть определена путём измерения абсолютной активности тонкого детектора A_t в момент окончания облучения t . Сечение активации ядер детектора тепловыми нейтронами σ и число ядер в детекторе n должны быть известны. Выражение (6) упрощается в случае, когда время облучения детектора значительно больше периода полураспада искусственного радиоактивного изотопа ($T_{1/2}$) и вторым слагаемым в знаменателе можно пренебречь:

$$f = \frac{A_t}{n\sigma}. \quad (2.7)$$

Если измерение наведённой активности детектора производится спустя некоторое время Δt после момента окончания облучения детектора нейтронами t , то необходимо учесть уменьшение активности препарата вследствие радиоактивного распада.

Целью этой работы является измерение потока тепловых нейтронов от нейтронного источника на основе плутоний-бериллия. В качестве замедлителя нейтронов в данной методике использовали парафин. Активационными детекторами являлись серебряный и родиевый детекторы [92]. Полученные результаты измеренных нейтронных потоков в различной геометрии обобщены в таблице измерений потока нейтронов при различных геометриях облучения приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Величины потоков тепловых нейтронов (нейтрон/см²·с)

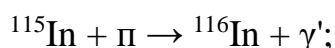
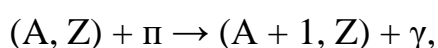
	Расстояние, см						Детектор
	0	5	10	15	20	25	
Источник на дне канала	3.46·10 ³	2.64·10 ³	2.4·10 ³	1.73·10 ³	1.41·10 ³	4.81·10 ²	Ag
	3.48·10 ³	2.29·10 ³	2.2·10 ³	1.91·10 ³	1.61·10 ³	4.12·10 ²	Rh
Источник в середине канала	2.59·10 ³	2.92·10 ³	3.55·10 ³	2.46·10 ³	2.41·10 ³	2.30·10 ³	Ag
	2.41·10 ³	2.81·10 ³	3.10·10 ³	2.91·10 ³	2.70·10 ³	2.21·10 ³	Rh

Таким образом, после проведения исследований по измерению потока тепловых нейтронов от нейтронного источника на основе плутоний-бериллия с использованием активационных серебряного и родиевого детекторов и различной геометрии расположения источника можно констатировать, что минимальные величины потоков тепловых нейтронов получены при расположении источника на дне канала на расстоянии 25 см при использовании серебряного детектора, эта величина составила $4.81 \cdot 10^2$ нейтрон/см²·с, при использовании родиевого детектора значения потока тепловых нейтронов при одинаковом расположении источника на дне канала несколько ниже и на расстоянии 25 см составляет $4.12 \cdot 10^2$ нейтрон/см²·с. Максимальные величины потоков тепловых нейтронов получены при геометрии расположения источника в середине канала: при использовании серебряного детектора данное значение составило $3.55 \cdot 10^3$, а при использовании родиевого детектора – $3.10 \cdot 10^3$ нейтрон/см²·с.

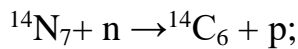
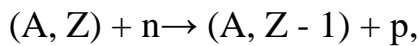
2.4. Ядерные реакции при взаимодействии нейтронов с лёгкими ядрами

Взаимодействие нейтронов с веществом происходит, в основном, благодаря их взаимодействию с атомами ядра. Попадая в вещество, нейтроны инициируют протекание следующих процессов:

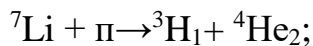
- радиационный захват (протекает при энергии (E_n) ниже 500 кэВ) [93]:



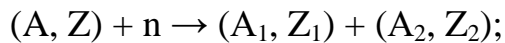
- реакции с образованием протонов (инициируются при энергиях в диапазоне от 500 кэВ до 10 МэВ):



- реакции с образованием α -частиц:



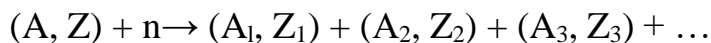
- реакции деления:



$$A_1 + A_2 = A + 1, Z_1 + Z_2 = Z,$$

$$\frac{A_1}{A_2} \approx \frac{2}{3};$$

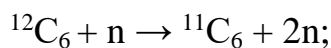
- реакции, в которых в конечном состоянии происходит образование нескольких частиц:



при условии

$$A_1 + A_2 + A_3 + \dots = A + 1, Z_1 + Z_2 + Z_3 + \dots = Z,$$

Например:



- рассеяние нейтронов неупругое $(A, Z) + n \rightarrow (A, Z) + n$;

- рассеяние нейтронов упругое $(A, Z) + n \rightarrow (A, Z) + n'$.

При упругом рассеянии нейтронов нейтроны непосредственно взаимодействуют с силовым полем, они не проникают в ядро (так называемое потенциальное рассеяние нейтронов), при резонансном упругом рассеянии отмечается проникновение нейтронов в ядра атомов. Если потенциальное рассеяние инициируется при любых энергиях нейтронов, то протекание резонансного рассеяния возможно в случаях, когда энергия нейтрона и энергия одного из ядерных уровней примерно одинаковы [94].

2.5. Выводы по второй главе

Изложенная в настоящей главе методика позволяет выращивать бактерии *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*. Приведена методика исследования спектральных характеристик бактерий с помощью ИК-спектрометров различных модификаций. Обсуждены возможные варианты протекания ядерных реакций при взаимодействии тепловых нейтронов с лёгкими ядрами. Приведённая методика облучения бактерий тепловыми нейтронами позволяет исследовать влияния малых потоков тепловых нейтронов на биологическую активность и спектральные характеристики этих бактерий.

ГЛАВА 3. ВЛИЯНИЕ МАЛЫХ ПОТОКОВ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ НА БИОЛОГИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ БАКТЕРИЙ *RHIZOBIUM PHASEOLI* IS TAAS-80 TJ И *BACILLUS MEGATERIUM* VAR. *PHOSPHATICUM*

3.1. Влияние малых потоков тепловых нейтронов на скорость роста бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*

В этом параграфе приводятся экспериментальные результаты исследования влияния малых потоков тепловых нейтронов на биологическую активность бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* [2-А, 3-А, 4-А, 5-А, 6-А]. В обзорной главе данной диссертации были приведены результаты исследования воздействия ионизирующих излучений на характеристики органических и неорганических веществ, при этом был обнаружен эффект “малых доз”. Согласно данному эффекту при небольших дозах радиационного излучения ионизирующего характера некоторые свойства материалов улучшаются. В основном это связано с изменениями электронных конфигураций атомов, которые входят в состав атомных кристаллических решёток полупроводниковых материалов и макромолекул в биологических системах.

Поскольку электронные конфигурации атомов в кристаллических решётках твёрдых тел и в компонентах биологических макромолекул не изменяются при воздействии на них тепловых нейтронов, вероятность изменений в структуре указанных объектов является пренебрежимо низкой. Однако в литературных источниках практически не встречается научных публикаций, посвящённых изучению механизмов воздействия малых потоков тепловых нейтронов (с энергией <1.0 эВ) на изменение свойств в указанных биологических средах.

При взаимодействии вещества с нейтронами ядра атомов, которые находятся в составе вещества захватывают эти нейтроны, то есть осуществляется радиационный захват нейтронов атомами вещества [93]. Соответственно, при взаимодействии атомов с нейтронами осуществляются упругие и неупругие рассеяния нейтронов в атомных ядрах. Исходя из этого, возможность протекания в биологических объектах структурных нейтронно-стимулированных превращений нахо-

дится в зависимости от сечения захвата нейтронов различными атомными ядрами вещества. Известно, что сечения захвата атомными ядрами тепловых нейтронов значительно выше по сравнению с сечением захвата нейтронов высоких энергий [94]. Поэтому представляет научный интерес исследование воздействия на характеристики биологических систем тепловых нейтронов. Также известным фактом является то, что во время полётов в верхних слоях атмосферы и в космическом пространстве на биологические объекты оказывает непрерывное воздействие тепловые нейтроны малых потоков. Так, воздействие космических излучений на атомы атмосферного слоя порождает природное явление - широкий атмосферный ливень (ШАЛ), всегда содержащий в своём объёме значительные количества тепловых нейтронов. Эти нейтроны оказывают влияние на биологические объекты, которые находятся на земной поверхности. Соответственно, значительную научную и практическую заинтересованность вызывает изучение эффектов, которые определяют взаимодействие биологических объектов и тепловых нейтронов.

Таким образом, в данном разделе определена цель исследования, заключающаяся в изучении воздействия тепловых нейтронов на скорость роста азот- и фосфорфиксирующих бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*, которые широко применяются в качестве составных частей при производстве микроудобрений.

Представители рода бактерий *Rhizobium* и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* обладают способностью аккумулировать атмосферный молекулярный азот, преобразовывать его в удобную форму для дальнейшего использования растениями [63, 64, 95]. В качестве материала для исследования выбраны вышеуказанные бактерии, поскольку в их составе имеется значительное содержание атомов азота. Для сравнения экспериментальных результатов данный эксперимент повторно проводился для азотофиксирующей бактерии *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*.

Бактерии *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* осуществлялось выращивались согласно стандартным методиками из клубеньков фасоли [96] и кукурузных рыльца. Азотфиксирующие клубеньки бо-

бовых обладают способностью фиксировать из атмосферного воздуха азот и фосфор, переводя его в усвояемые для растений формы, проявляют высокие симбиотические способности, кроме того эти штаммы бактерий оказывают стимулирующее действие на рост и развитие фасоли, повышают её урожайность [70, 72, 73]. После отбора образцов их облучали в потоке тепловых нейтронов с использованием плутониевого-бериллиевого источника (энергия источника Pu-Be составляла 0.0-10.0 МэВ), диапазон мощности потока тепловых нейтронов варьировали с в пределах от $1.8 \cdot 10^6$ до $1.3 \cdot 10^8$ нейтрон/см². Между источником и образцами находился слой парафина толщиной 5 см. Методические рекомендации по получению бактерий и по облучению их в потоке тепловых нейтронов подробно приведены в главе 2 данной диссертации.

Для каждого из опытов была проведена трехкратная повторность с целью получения более точных результатов. При облучении бактерий тепловыми нейтронами температура процесса составляла 28°C, бактерии облучались в течение от одного до 72 часов с фиксацией получаемых данных каждый час.

На рисунке 9 приведены фото чашек Петри с пересевом облучённых образцов бактерий с различными временами облучения и времени посева.

В таблицах 4 и 5 приведены результаты опытов, в которых исследовалась зависимость времени размножения бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* от длительности облучения тепловыми нейтронами. На рисунке 10 приводятся результаты изучения влияния величины потока тепловых нейтронов на время прорастания бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ. Для данного исследования использовался обычный (а) и полулогарифмический (б) масштаб. Показано, что наиболее оптимальным временем облучения является трёхчасовое облучение. Также необходимо отметить, что при стандартном режиме для полноценного роста бактерий необходимо 48 часов.



а

б

в

Рисунок 9 - Пересев облучённых образцов бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ с различными временами облучения и времени пересева; а – длительность облучения 1 час, время пересева 14 часов; б - длительность облучения 3 часа, время пересева 24 часа; в – длительность облучения 24 часа, время пересева 18 часов.

Таблица 4 - Зависимость времени размножения бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ от длительности облучения тепловыми нейтронами

№	Длительность облучения, ч	Поток облучения, нейтрон/см ²	№ опытов и время размножения, ч			Средний показатель, ч
			I	II	III	
0	-	-	49	47	48	48
1	1	$1,8 \cdot 10^6$	18	20	21	19,7
2	3	$5,4 \cdot 10^6$	8	12	10	10
3	8	$1,44 \cdot 10^7$	14	18	15	15,7
4	24	$4,32 \cdot 10^7$	21	20	16	19
5	48	$8,64 \cdot 10^7$	24	20	16	20
6	72	$1,3 \cdot 10^8$	Разрушение			

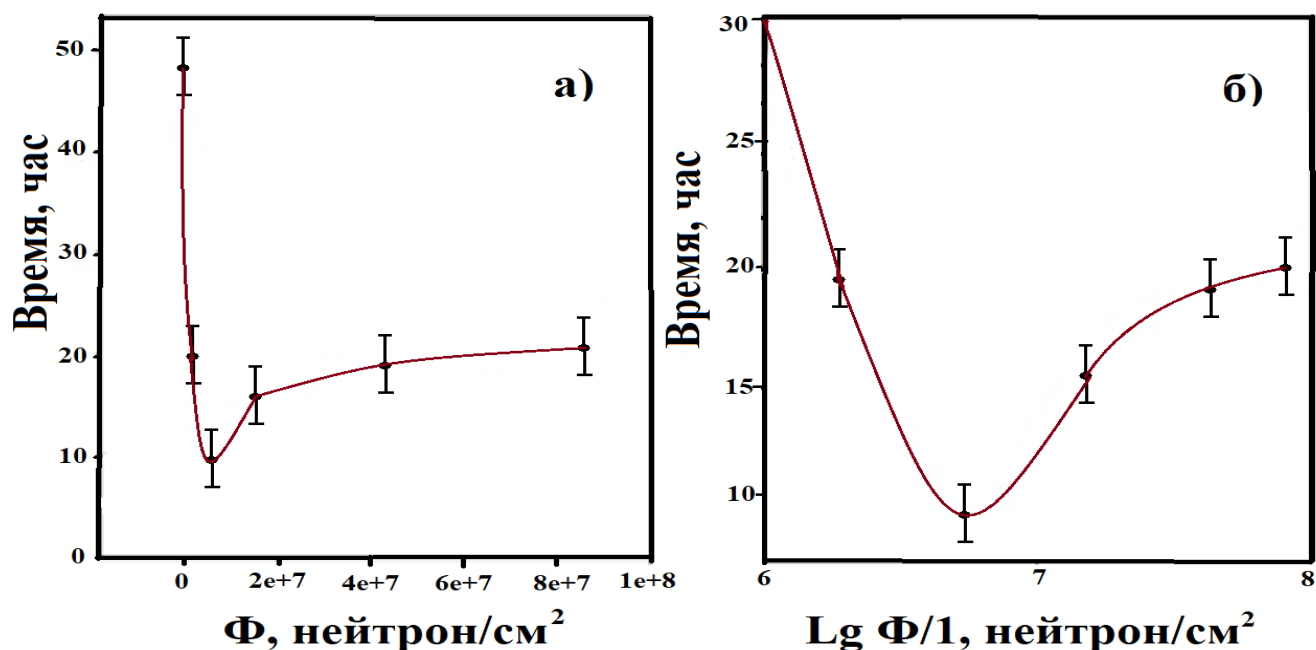


Рисунок 10 – Влияние величины потока тепловых нейтронов на время прорастания бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ: а – обычный масштаб; б - полулогарифмический масштаб.

Таблица 5 - Зависимость времени размножения бактерий *Vacillus megaterium* var. *phosphaticum* от длительности облучения тепловыми нейтронами

№	Длительность облучения, ч	Поток облучения, нейтрон/см ²	№ опытов и время размножения, ч			Средний показатель, ч
			I	II	III	
0	-	-	43	47	45	45
1	1	1,8·10 ⁶	18	20	11	16,3
2	3	5,4·10 ⁶	8	12	8	9,3
3	8	1,44·10 ⁷	12	12	12	12
4	24	4,32·10 ⁷	15	18	14	15,6
5	48	8,64·10 ⁷	19	20	12	17
6	72	1,3·10 ⁸	Разрушение			

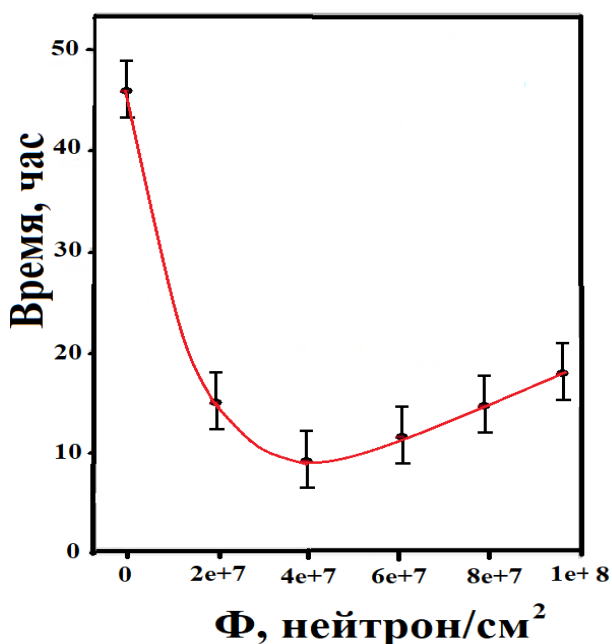


Рисунок 10.1 – Влияние величины потока тепловых нейтронов на время прорастания бактерий *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*.

Анализ экспериментальных данных показывают, что после трёхчасового облучения время прорастания бактерий сокращается примерно в 5-6 раз, а именно составляет 8-12 часов. В течение этого времени (3 часа) указанные бактерии облучались потоками тепловых нейтронов мощностью $5,4 \cdot 10^6$ нейтрон/см². Также необходимо констатировать, что изменение в 5-6 раз свойств биологических объектов под воздействием потока тепловых нейтронов обнаружено впервые, что определяет целенаправленный выбор объектов исследования.

В главе 2 были приведены возможные ядерные реакции под действием тепловых нейтронов при их взаимодействиях с лёгкими ядрами. Указывалось, что одним из возможных каналов ядерной реакции может быть реакция радиационного ядерного захвата тепловых нейтронов:



где: A – массовое число элемента;

Z – заряд элемента;

n – нейтрон;

γ – излучение.

Известно, что в органические вещества, в том числе различные бактерии, в основном содержат лёгкие ядра атомов. В составе бактерии *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ также в ядрах атомов азота входят лёгкие ядра. Вследствие ядерной реакции под действием тепловых нейтронов изотоп азота ${}_7\text{N}^{14}$ превращается в изотоп ${}_7\text{N}^{15}$ и реакция принимает следующий вид:



Для подтверждения этого предположения в данном разделе был проведён модельный эксперимент с простым биологическим объектом.

На основании полученных экспериментальных данных и их анализа можно констатировать, что приведённая выше ядерная реакция (3.2) является основным механизмом воздействия малых потоков тепловых нейтронов на биологические объекты, в данном случае на бактерии, данная реакция (3.2) вызывает у бактерий явление гормезиса. Показано, что роль изотопа N^{15} в процессе обмена вещества намного выше, чем N^{14} и это приводит к гормезису. Сечение радиационного захвата тепловых нейтронов ядрами атома N^{14} равно 1.88 барн. Также возможен ещё один вариант ядерной реакции с участием атомных ядер азота и тепловых нейтронов. Этот вариант определяется следующей ядерной реакцией:



В реакции (3.3) определена величина сечения захвата атомными ядрами изотопа N^{14} тепловых нейтронов, которая составила 1.75 барн. Преобразование атомного ядра N^{14} в атомное ядро C^{14} приведёт к ухудшению свойств обмена веществ в биологических средах. Также показано, что при малых потоках тепловых нейтронов вероятность протекания реакции (3.2) будет ниже по сравнению с реакцией (3.3). При увеличении потока тепловых нейтронов возрастает роль ядерной реакции (3.3). Однако увеличение мощности потока ядерной реакции (3.3) вызовет обратный эффект. Соответственно, эти две ядерные реакции (3.2) и (3.3) являются разнонаправленными и приводят к снижению до минимальных значений время прорастания бактерий, как это видно на рисунке 10.

Достоверность этих рассуждений подтверждается результатами работ [6, 8, 13], в которых проведено изучение ИК-спектров бактерий *Escherichia coli*, которые были облучены малыми потоками тепловых нейтронов. Авторами указанных работ получены данные, что основная трансформация в ИК-спектрах происходит с полосами, которые отвечают за валентные колебания С=О-групп и связанные колебания С=N-групп.

Соответственно, в этом разделе подтверждён эффект гормезиса, который проявляется при облучении малыми потоками тепловых нейтронов биологических объектов – бактерий видов *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *Phosphaticum*. Определено оптимальное время (3 часа), в течение которого происходит полное прорастание бактерий указанных видов при потоках тепловых нейтронов $5,4 \cdot 10^6$ нейтрон/см² и показано, что при облучении время прорастания бактерий сокращается примерно в 5-6 раз. Соответственно, одним из основных механизмов воздействия малых потоков тепловых нейтронов на биологические объекты, в данном случае на бактерии, является радиационный захват тепловых нейтронов атомными ядрами азота.

Бактерии, являясь более простыми по сравнению с другими биологическими системами, тем не менее содержат множество органических соединений: от сложной нуклеиновой кислоты до простых. Этим обуславливается сложность однозначной интерпретации полученных экспериментальных данных. Для качественной оценки влияния малых потоков тепловых нейтронов были проведены модельные эксперименты с гуминовой кислотой, которая является более простой, чем микроорганизмы.

3.2. Влияние потока тепловых нейтронов на биологическую активность гуминовых кислот

В настоящее время ширится спектр исследований, посвящённых влиянию радиационных и ядерных излучений на органические вещества и, особенно влияние на биологические системы и биологические объекты, что представляет научный и практический интерес. Данная заинтересованность объясняется тем, что в

сельскохозяйственной отрасли стали широко использовать ядерные и радиационные излучения, облучая ими различные биологические объекты [10-А]. Так, в частности, при обработке семян различных технических культур дозами облучения способствует их лучшему прорастанию, обработка продуктов сельского хозяйства позволяет продлить их срок хранения, снижает риск заражения различными вредителями и др. Как уже отмечалось, усилия многих исследователей направляются на исследование влияния ядерных и радиационных излучений с целью улучшить характеристики различных видов бактерий, которые являются составными частями микроудобрений, а также ускорить протекание различных биологических процессов в различных средах. Проведение данных исследований относится к научному разделу, изучающему ядерные биотехнологии.

Согласно результатам раздела 1 главы 3, при небольшом воздействии тепловых нейтронов на бактерий, свойства бактерий улучшаются. Воздействие излучения тепловых нейтронов на характеристики биологических объектов значительно отличается от других видов излучений, например, от рентгеновского, γ -излучения и радиационного излучения. При воздействии на вещество радиационного излучения изменения в веществе происходят на уровне атомов, в результате чего атомы ионизируются с появлением средних и тяжёлых ионов. Это можно объяснить тем, что нейтроны с точки зрения электрического заряда – это нейтральные элементарные частицы, которые легко вступают во взаимодействие с различными атомными ядрами, соответственно, проникают в атомные ядра. При этом атомные ядра осуществляют радиационный захват нейтронов в результате ядерной реакции, а также происходит превращение атомных ядер. Указанные типы взаимодействий протекают значительно быстрее и эффективнее (в десятки раз) с использованием в процессе облучения тепловых нейтронов [97-99].

Уже отмечалось ранее, что при проведении экспериментов по воздействию тепловых нейтронов малых потоков на биологические объекты и содержание в них различных веществ, правильный выбор биологического объекта является очень важным. Биологический объект должен соответствовать требованию, биологический объект должен обладать высокой чувствительностью потенциалов к

изменениям своей структуры на ядерном уровне. Исходя из этого, в данном разделе нами было исследовано влияние тепловых нейтронов малых потоков на микроудобрения и их биологические характеристики. В качестве объекта исследования была выбрана гуминовая кислота, которую облучали малыми потоками тепловых нейтронов [100, 101]. Большое количество исследований посвящено разработке альтернативных технологий улучшения биологической активности микроудобрений, и одним из наиболее перспективных объектов данных исследований являются гуминовые вещества и их производные.

Гуминовыми веществами назван большой реакционноспособный класс природных соединений, которые находятся в различных средах повсеместно – в составе органических веществ воздуха (как аэрозоли), почв и вод. Часто гуминовые вещества называют гуминовыми кислотами (ГК). Молекулы гуминовых кислот в своём составе содержат различные функциональные группы, которые представлены салицилатами, феноламинами, фталатами, хинонами, катехинами и др. Кроме этих функциональных групп в состав гуминовых кислот входят ароматические фрагменты, что в комплексе позволяет гуминовым кислотам участвовать в реакциях донорно-акцепторного и ионного взаимодействия, участвовать в образовании водородных связей. Благодаря указанным свойствам гуминовые кислоты обладают по отношению к металлам высокой реакционной способностью. Кроме того, используя указанные свойства, гуминовые кислоты проявляют способности накапливать и сохранять элементы питания в живых организмах, связывать радиоактивные и токсичные элементы в малоподвижные соединения. Также в биологических объектах за счёт гуминовых кислот осуществляются процессы миграции тяжёлых металлов, ГК несут ответственность за геохимические потоки тяжёлых металлов, контролируют их в окружающей природной среде, снижают нагрузки на природную среду со стороны токсичных тяжёлых металлов [102-104].

Также гуминовые вещества являются полидисперсными веществами с переменным составом, именно за их счёт происходит формирование органического почвенного слоя. По своему химическому строению гуминовые кислоты – это

ароматические гидроксополикислоты. В их структуре также отмечено присутствие пирокатехиновых и гидрохиноновых фрагментов, ответственных за восстановительные свойства каркасов гуминовых кислот. Имеющиеся в структуре гуминовых кислот пирокатехиновые и гидрохиноновые фрагменты участвуют, как реагенты, в реакциях прямого восстановления химических элементов класса актинидов. При восстановлении актиниды иммобилизуются на матрицах гуминовых веществ, изменённая матрица также представляет собой перспективный комплексообразующий агент для актинидов $тс$ валентностями 3 и 4 [94].

Были выполнены опыты по изучению влияния облучённой гуминовой кислоты на биологическую активность семян арахиса. Изучалось распускание корней семян арахиса и их озеленение. Опыты были выполнены следующим образом. Брали гуминовую кислоту в количестве 350 мл, навеску делили на две одинаковые порции – образца. Первый образец, вес которого составлял 175 мл, подвергался в течение трёх часов облучению тепловыми нейтронами, мощность потока нейтронов была равна $5.4 \cdot 10^6$ нейтрон/см². Вторым образцом не облучали. Далее оба образца смешивали со столовой водой (по 3 литра на каждый из образцов).

Полученным раствором орошали семена арахиса. Выбор арахиса был связан с тем, что данный вид растений имеет достаточно длительный период прорастания семян, поэтому имеется достаточная объективность наблюдения фаз прорастания в течение времени при условии, что семена арахиса поливались, как облучённым раствором гуминовых кислот, так и необлучённым раствором, который использовали в качестве эталонного образца [105, 106].

Каждый опыт был проведён в трёхкратной повторности. В две чашки Петри было помещено по 5 штук семян арахиса. Ежедневно семена арахиса в первой чашке Петри поливались облучённым раствором гуминовой кислоты в количестве 50 мл, семена арахиса во второй чашке Петри поливались обычным эталонным раствором гуминовой кислоты также взятом в количестве 50 мл, как и для первого образца. В течение первых 4-х дней изменений с семенами арахиса не происходило, на 5-й день семена выпустили корешки. Причём в первом образце с облучённым

ными семенами количество корешков было 5, а во втором образце с необлучёнными семенами – всего 2 корешка, также в этом образце даже через 13 дней после обработки необлучённым раствором гумусовой кислоты прорастание корешков семян арахиса составило из пяти штук семян всего 3. Результаты изучения влияния облучения раствора гуминовой кислоты на прорастание корней семян арахиса приводятся в таблице 6. На основании анализа данных таблицы 6 можно заключить, что полив семян облучённым раствором гуминовой кислоты благоприятно влияет на вегетацию корней арахиса – семена значительно раньше начинают выпускать корни по сравнению с образцами, которые поливались необлучённым раствором гуминовой кислоты [97].

Таблица 6 – Разница прорастания корней семян арахиса при их поливе раствором гуминовой кислоты

Дни	Число проросших корней семян, политых:	
	облучённым раствором ($5,4 \cdot 10^6$ нейтрон/см ²)	необлучённым раствором
1	-	-
2	-	-
3	-	-
4	-	-
5	5	2
6	5	3
7	5	3
8	5	3
9	5	3
10	5	3
11	5	3
12	5	3
13	5	3

После проращивания семян арахиса в чашках Петри через 2 недели они были посажены в горшки с землёй до полного прорастания и созревания семян. В данном опыте также первый образец поливался облучённым раствором гуминовой кислоты в количестве 50 мл, семена арахиса во втором горшке поливались обычным эталонным раствором гуминовой кислоты. После посадки в горшки в течение пяти дней с ними не происходило изменений, на 6-й день семена проросли зелёными ростками. Результаты изучения влияния облучения раствора гуминовой кислоты на озеленение семян арахиса приводится в таблице 7. На основании анализа данных таблицы 7 можно заключить, что полив семян облучённым раствором гуминовой кислоты благоприятно влияет на вегетацию семян арахиса – семена значительно раньше начинают выпускать стебли с зелёной массой по сравнению с образцами, которые поливались необлучённым раствором гуминовой кислоты. В частности, через 6 дней в обоих образцах наблюдался рост зелёной массы семян арахиса, озеленение составило для облучённых семян – 1.5 см, для необлучённых – 1 см. При дальнейшем поливе через 13 дней стало видно, что семена, поливаемые облучённым раствором гуминовой кислоты, показали более значительный рост по сравнению с семенами, поливаемыми необлучённым раствором гуминовой кислоты – эти величины составили 9.0 см и 3.5 см, соответственно.

Таблица 7 – Влияние полива облучённым и необлучённым раствором гуминовой кислоты на озеленение семян арахиса

Дни	Озеленение семян арахиса, см	
	при поливе облучённым раствором ($5,4 \cdot 10^6$ нейтрон/см ²)	при поливе необлучённым раствором
1	-	-
2	-	-
3	-	-

4	-	-
5	-	-
6	1,5	1
7	2	1,5
8	3	2
9	4	2,5
10	5	3
11	6	3,5
12	8	3,5
13	9	3,5

Следующим этапом нашего исследования было изучение прорастания семян арахиса в песке. Методика изучения была аналогичной предыдущим опытам. В опыте были использованы две пластмассовые ёмкости одинакового объёма, в каждую из которых поместили по 1 кг песка и высадили в песок по 9 семян арахиса. Ежедневно семена в обеих ёмкостях поливали растворами гуминовой кислоты – первый образец поливали облучённым (мощностью $5,4 \cdot 10^6$ нейтрон/см²) раствором гуминовой кислоты, второй образец поливался необлучённым раствором гуминовой кислоты. В первые 4 дня семена оставались без изменений, не прорастая. На 5-й день у семян, которые поливались облучённым раствором, прорастание семян составило 4 см, при этом для необлучённых семян прорастание было отмечено только на 6-й день и составило всего 3 см. Рост зелёной массы арахиса для облучённых и необлучённых семян начался на 8-й день, составляя 2 и 1 см, соответственно. Видимые результаты в эксперименте были получены на 17-й день, когда рост зелёной массы арахиса для облучённых и необлучённых семян составил 20 и 15 см, соответственно. Полученные экспериментальные данные были обобщены в таблице 8 и рисунке 11.

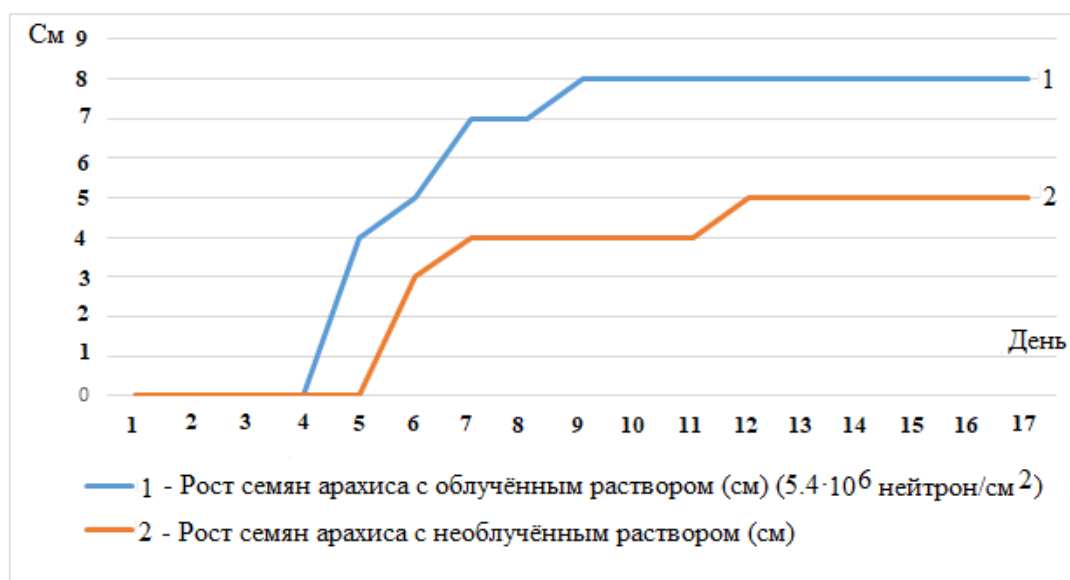


Рисунок 11 - Зависимость озеленения семян арахиса от полива растворов гуминовой кислоты (1 – облучённый раствор мощностью $5,4 \cdot 10^6$ нейтрон/см², 2 – необлучённый раствор).

Таблица 8 - Зависимость прорастания семян арахиса и роста зелёной массы арахиса от полива растворами гуминовой кислоты

Дни	Рост семян арахиса, шт		Рост зелёной массы арахиса, см	
	полив облученным раствором ($5,4 \cdot 10^6$ нейтрон/см ²)	полив необлучённым раствором	полив облученным раствором ($5,4 \cdot 10^6$ нейтрон/см ²)	полив необлучённым раствором
1	-	-	-	-
2	-	-	-	-
3	-	-	-	-
4	-	-	-	-
5	4	-	-	-
6	5	3	-	-
7	7	4	-	-
8	7	4	2	1

9	8	4	2,5	2
10	8	4	3	2,5
11	8	4	4	3
12	8	5	5	4
13	8	5	6	5
14	8	5	10	8
15	8	5	13	9
16	8	5	15	11
17	8	5	20	15

Соответственно после анализа полученных результатов можно констатировать, что при облучении гуминовой кислоты тепловыми нейтронами малых потоков ($5,4 \cdot 10^6$ нейтрон/см²) и поливе её растворами семян арахиса для последних значительно сокращается время прорастания и быстрее происходит озеленение. Таким образом, обобщая в целом результаты данного эксперимента, показано, что при облучении тепловыми нейтронами указанных величин для семян арахиса значительно увеличивается их биологическая активность [107-124].

3.3. Выводы по третьей главе

Таким образом, обобщая результаты экспериментальных исследований, приведённых в данной главе диссертационной работы, можно сделать выводы, что основным механизмом, согласно которому осуществляется воздействие на биологические объекты малых потоков тепловых нейтронов, является ядерная реакция, в которой участвуют лёгкие атомные ядра, данная реакция также инициирует явление гормезиса. Явление гормезиса отмечено для основных объектов исследования - бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*, которое происходит при их облучении тепловыми нейтронами [8, 13]. Определено, что время прорастания бактерий при инициировании явления гормезиса уменьшается в 5-6 раз при потоках тепловых нейтронов, составляющих $5,4 \cdot 10^6$ нейтрон/см².

Также важным механизмом, согласно которому осуществляется воздействие малых потоков тепловых нейтронов на биологические объекты и их свойства, является реакция захвата тепловых нейтронов атомными ядрами азота. В процессе исследования установлено, что облучение тепловых нейтронов малых потоков ($5,4 \cdot 10^6$ нейтрон/см²) растворов гуминовой кислоты значительно сокращает продолжительность прорастания семян арахиса. Соответственно, можно утверждать, что указанные величины потока тепловых нейтронов усиливают биологическую активность семян арахиса, стимулируют их ростовые процессы. По нашему мнению, усиление биологической активности происходит при протекании ядерной реакции - в результате радиационного захвата тепловых нейтронов атомными ядрами азота состава гуминовой кислоты, при этом происходит образование атомного ядра углерода.

ГЛАВА 4. ИК-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАЛЫХ ПОТОКОВ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ НА СВОЙСТВА БАКТЕРИЙ *RHIZOBIUM PHASEOLI* IS TAAS-80 TJ И *BACILLUS MEGATERIUM* VAR. *PHOSPHATICUM*

4.1. Изучение ИК-спектров бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*

Данный раздел посвящён результатам экспериментальных исследований ИК-спектров бактерий видов *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* и их анализу [8-А, 9-А].

Как было отмечено в разделе 2.2, ИК-спектроскопия (инфракрасная спектроскопия) является раздел спектроскопии, включающий получение, изучение, расшифровку и идентификацию ИК-спектров. Основная функция ИК-спектроскопии – это исследование молекулярных спектров отражения, поглощения и испускания, поскольку в большинство вращательных и колебательных спектров для различных молекул фиксируются в ИК-области поглощения и отражения.

Одним из обязательных условий для получения точных количественных результатов можно назвать правильную выборку на ИК-спектрах аналитических полос, по которым в дальнейшем будут идентифицироваться исследуемые вещества. Аналитические полосы в ИК-спектре анализируемого вещества не должны находиться вплотную или близко друг к другу или к другим полосам в образце, то есть эффект перекрытия полос является нежелательным условием в определениях, что может отрицательно повлиять на точность результатов [125].

На основании экспериментальных исследований значительного количества молекул, которые имеют в своём составе аналогичные функциональные группы, показано, что этими функциональными группами энергия поглощается в узком диапазоне частот спектра, и не зависит от изменений, которые могут происходить в других частях молекулы. Эти частоты названы групповыми или характеристичными частотами [80, 81]. Примерами характеристичных частот можно назвать ко-

лебания следующих функциональных групп: NO₂-, NH₂-, C=O-, C=C-, N-H-, CH₂-, CH₃-, C-H-, O-H-, P=O-, P-O-P- и других [126]. Происхождение характеристичных частот обуславливается небольшой определённой группой атомов, которая вызывает данные колебания, при этом не учитываются другие колебания в молекуле, так как их вклад в данные колебания незначителен, хотя в каждом из колебаний происходит изменение величины углов между связями и сами длины связей. Соответственно, для каждого из органических индивидуальных веществ или смеси веществ имеется свой неповторимый индивидуальный ИК-спектр, который после получения можно интерпретировать качественно и количественно.

Известно, что биологическая эффективность бактерий зависит от их физико-химических характеристик и их молекулярной структуры. Поэтому начальным этапом нашего диссертационного исследования являлось определение молекулярной структуры бактерий ИК-спектроскопическим методом. ИК-спектры исследуемых объектов были измерены на инфракрасном спектрофотометре марки "IRAffinity-1" с Фурье-преобразованием, обладающем высокой чувствительностью, диапазон частот был очень широким, составлял от 4000 до 400 см⁻¹, образцы для определений готовили согласно методике прессования с наполнителем KBr [83, 84, 127].

С целью определения физических механизмов протекания возможных ядерных реакций, которые при воздействии тепловых нейтронов малых потоков с бактериями могут приводить к явлению гормезиса, нами в рамках диссертационного исследования были получены и исследованы ИК-спектры некоторых видов бактерий [128]. Для исследований были выбраны виды бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*, для которых были изучены их спектральные характеристики. Выбор данных видов бактерий был обусловлен возможностью использования этих видов в качестве эффективных микроудобрений.

Бактерии *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* при вступлении в симбиоз с растениями обладают способностью фиксации из атмосферного воздуха молекулярного фосфора и азота. Для нашего

эксперимента важным фактором выбора этих видов бактерий явилось наличие в выбранных нами видах бактерий значительных количеств атомарного азота и фосфора.

Выращивание бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* осуществлялось из клубеньков рыльцев кукурузы и фасоли согласно известным методикам [129]. Штаммы выбранных видов бактерий обладают высокими симбиотическими способностями, активной фиксации атмосферных фосфора и азота, также они оказывают стимулирующее действие на рост и развитие растений, повышают их урожайность.

На рисунке 12 в качестве примера приводится ИК-спектр бактерии *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ.

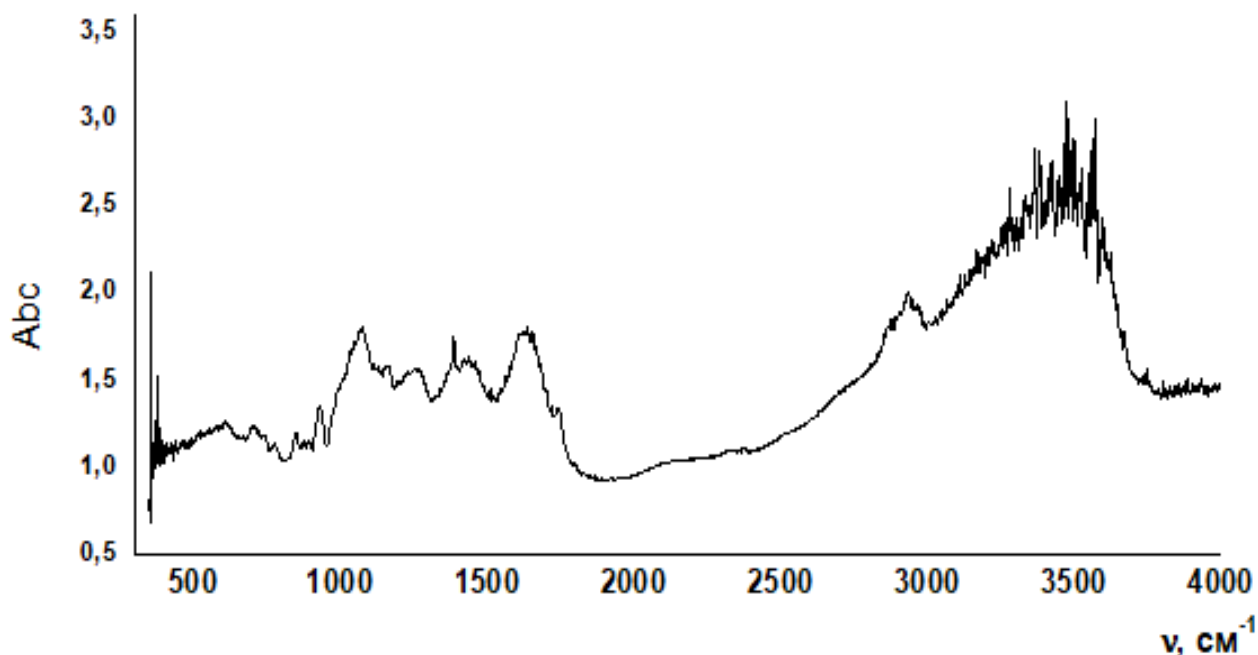


Рисунок 12 - ИК-спектр, снятый для бактерий вида *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ.

Как видно из рисунка 12, в спектральной области от 4000 до 400 cm^{-1} отмечается значительное количество полос с различными формами и интенсивностями, что позволяет предположить, что в составе рассмотренных бактерий присутствуют различные функциональные группы. На основании ИК-спектра, приведённого на рисунке 12, нами проведено обобщение и анализ данного спектра с

определением индивидуальных полос поглощения и на их основании определением функциональных групп.

Таблица 9 – Определение функциональных групп согласно частотам, полученным в ИК-спектре бактерий вида *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ

Частота, см ⁻¹	Отнесение полос
3430	валентные колебания ОН-групп, связанные водородными связями
2960	антисимметричные валентные колебания С-Н-связи метильной группы ($\nu_{as}CH_3$)
2936	антисимметричные валентные колебания С-Н-связи метиленовых групп (CH_2) ($\nu_{as}CH_2$)
2891	симметричные валентные колебания С-Н-связи метильной группы (ν_sCH_3)
2860	симметричные валентные колебания С-Н-связи метиленовых групп (CH_2) (ν_sCH_2)
1730	валентные колебания карбонильных групп ($\nu C=O$)
1645	скелетные колебания ароматических структур, валентные колебания сопряженных углеродных двойных связей С=С и т.д.
1460	асимметричные деформационные колебания С-Н-связи в метиленовых группах (CH_2) (δ_sCH_2)
1425	асимметричные деформационные колебания С-Н-связи в метиленовых группах (CH_2) (δ_sCH_2)
1384	симметричные деформационные колебания С-Н-связи в метильной группе (δ_sCH_3)
1260	(ν_{c-o}) спиртов, сложных эфиров и (δ_{o-h}) связей спиртов и фенолов
1225	(ν_{c-o}) спиртов, сложных эфиров и (δ_{o-h}) связей спиртов и фенолов
1157	
1127	валентные колебания С-О-связей углеродов, спиртов, циклических и алифатических эфиров
1065	
930	вверное колебание N-H-групп
890	
870	
846	
771	маятниковые колебания (CH_2) n-фрагментов с $n \geq 4$
730	
702	валентные колебания, относящиеся к С-S-связи
605	валентные колебания S-S-связей

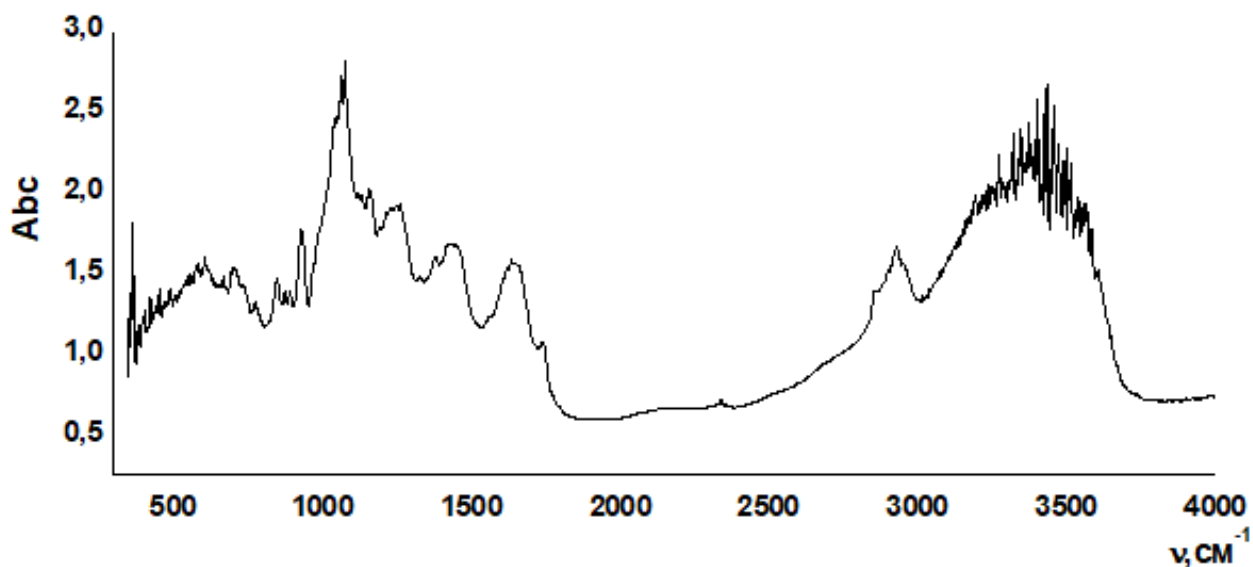


Рисунок 13 - ИК-спектр исходных бактерий *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*.

В ИК-спектре исходной бактерии *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* в области 3700-3000 cm^{-1} наблюдается широкая полоса поглощения с максимумом при 3300 cm^{-1} , относящаяся к колебаниям ОН-групп. В области 3000-2800 cm^{-1} наблюдается острая полоса 2929 cm^{-1} , с высокочастотной стороны этой полосы наблюдается острый перегиб при 2854 cm^{-1} . В области 1750-750 cm^{-1} наблюдаются полоса при 1739 cm^{-1} , также широкая полоса при 1600 cm^{-1} с выделенными выступами при 1633 и 1622 cm^{-1} , широкая полоса в области 1435 cm^{-1} , чёткая полоса в области 1382 cm^{-1} , а также полосы в области 1250 cm^{-1} с выступом при 1213 cm^{-1} , полосы 1084, 929, 844, 773 и 705 cm^{-1} и широкая полоса в области 600-400 cm^{-1} .

Сравнение ИК-спектров исследуемых бактерий (рисунки 12 и 13) показало, что основные интенсивные полосы присутствуют в ИК-спектрах обеих бактерий. Различия наблюдаются в некотором слабом сдвиге максимумов полос по частоте, а также в интенсивности полос. Например, в ИК -спектре *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* (рисунок 13) слабая полоса, относящаяся к колебаниям С=О-групп проявляется в области 1740 cm^{-1} , тогда как в спектре азотфиксирующих бактерий (рисунок 12) эта полоса проявляется в области 1730 cm^{-1} . Интенсивность группы полос в области 1500-1000 cm^{-1} в спектре бактерии *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80

TJ (рисунок 12) ниже, чем интенсивность широкой полосы при 1645 см^{-1} , тогда как в спектре *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* (рисунок 13) интенсивность рассматриваемых полос намного выше интенсивности полосы 1645 см^{-1} . В спектре бактерии *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ (рисунок 12) интенсивность полосы 1384 см^{-1} выше интенсивности полосы 1425 см^{-1} , а в спектре бактерий *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* (рисунок 13) интенсивность полосы 1384 см^{-1} ниже интенсивности полосы 1425 см^{-1} [106, 107].

Различные колебания С-Н-связи метильной группы (CH_3) в ИК-спектре исследованных нами бактерий проявляются в полосах поглощения 2960 , 2891 и 1384 см^{-1} (рисунок 12 и таблица 9). Полосы 2960 и 2891 см^{-1} перекрываются с другими близлежащими полосами, что затрудняет использовать изменения интенсивности этих полос при внешних воздействиях. Полоса 1384 см^{-1} находится на низкочастотном крыле группы полос при 1400 см^{-1} . Полоса 1384 см^{-1} достаточно интенсивная, узкая и чёткая, что позволяет получить конкретные результаты при измерении её интенсивности.

Полоса 1384 см^{-1} относится к симметричным деформационным колебаниям С-Н-связи в метильной группе (CH_3). Рост оптической плотности полосы 1384 см^{-1} связан с увеличением концентрации метильных групп в изотопе C^{14} , то есть групп C^{14}H_3 , обусловленных ядерными реакциями типа (3.3).

Можно предположить, что при облучении тепловыми нейтронами одновременно протекает свободно радикальная реакция превращения метильной группы (CH_3) в другие, из-за потери водорода или других причин. В последствие наблюдается уменьшение интенсивности полосы 1384 см^{-1} .

Предположено, что наблюдаемые графики изменения оптической полосы при 1384 см^{-1} от потока тепловых нейтронов связаны с конкуренцией двух параллельных реакций (3.3) и вторичной свободно радикальной реакции уменьшения метильной группы (C^{14}H_3).

Чтобы количественно определить в ИК-спектрах интенсивность полос поглощения, а также относительную концентрацию функциональных групп в составе высокомолекулярных соединений, пользуются величинами относительной оп-

тической плотности, так как в молекуле существует взаимосвязь между высокой интенсивностью полос поглощения и высокой концентрацией функциональных групп.

В данном исследовании по полученным ИК-спектрам представлена относительная количественная оценка, характеризующая концентрацию функциональных групп, оценка даётся согласно соотношению оптических плотностей полос поглощения (ОППП), характеризующих кислородсодержащие функциональные группы (ν_{OH} - при 3400 см^{-1} , $\nu_{\text{C=O}}$ - при 1720 см^{-1} , $\nu_{\text{C-O}}$, C-O-C-групп при 1225 см^{-1} , $\nu_{\text{C-O}}$ – при 1035 см^{-1}) и оптических плотностей полос поглощения, которые характеризуют алифатические (2920 см^{-1}) и ароматические (1610 см^{-1}) структурные фрагменты. Обобщённые результаты данного исследования приводятся в таблице 10.

Как видно из результатов, приведённых в таблице 10, отношение оптических плотностей полос поглощения (ОППП), соответствующих алифатическим фрагментам структуры к ароматическим ($D_{\text{алкил}2936}/D_{\text{C=C } 1645}$) является меньшим единицы, что позволяет судить о том, ароматические фрагменты являются преобладающими по сравнению с алкильными фрагментами. Также показано, что полученное значение $D_{\text{O-H}3430}/D_{\text{C=C}1645}$ является больше, чем единица, то есть в исследуемой структуре находятся значительные концентрации гидроксильных групп. Также можно констатировать о преобладании гидроксильных групп по сравнению с алкильными, так как соотношение: $D_{\text{O-H}3430}/D_{\text{Салк}2936}$ является большим, чем единица. Согласно соотношению, $D_{\text{C=O}1730}/D_{\text{Салк}2936}$ делается заключение, что содержание алкильных заместителей больше, чем содержание карбоксильных групп, так как это соотношение <1 .

Из ИК-спектров бактерий *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* (рисунок 13) видно, что здесь также наблюдается преобладание гидроксильных фрагментов над ароматическими и алкильными фрагментами. Тогда как содержание ароматических и алкильных фрагментов почти равное.

Таблица 10 - Отношение оптических полос поглощения ОППП (D)

Отношение оптических полос поглощения ОППП (D)	Значение
D_{3430}/D_{1635}	1.13
D_{1730}/D_{1645}	0.75
D_{1225}/D_{1645}	0.9
D_{1065}/D_{1645}	1.11
D_{2936}/D_{1645}	0.84
D_{3430}/D_{2936}	1.34
D_{1730}/D_{2936}	0.89
D_{1225}/D_{2936}	1.06
D_{1065}/D_{2936}	1.31
D_{1065}/D_{1730}	1.47
D_{1645}/D_{2936}	1.18

Таким образом, с помощью ИК-спектроскопических методов для бактерий видов *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* нами определены их полосы поглощения с основными характеристичными максимумами. Наблюдаемые характеристичные пики подтверждают присутствие алифатических и ароматических цепей в бактериях, то есть эти два вида бактерий являются двучленными. Кроме того, в бактериях находится значительно большее количество карбонильных и гидроксильных групп по сравнению с алифатическими и ароматическими группами. Для бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ наблюдается преобладание ароматических составляющих над алкильными, тогда как для бактерий *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* эти составляющие почти равны.

4.2. Влияние малых потоков тепловых нейтронов на ИК-спектры бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*

Данный раздел выносит на обсуждение экспериментальные результаты, которые получены при изучении воздействия тепловых нейтронов малых потоков на спектральные характеристики бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* и возможные механизмы ядерных реакций, приводящие к этим изменениям [1-А,7-А, 8-А]. Известным фактом является тот факт, что в отличие от излучений ионизирующего характера, взаимодействие вещества с нейтронами происходит с участием радиационного захвата, когда в веществе происходит захват нейтронов атомными ядрами состава вещества [73]. Также в атомных ядрах могут протекать процессы упругих и неупругих рассеяний нейтронов. Исходя из этого, в биологических объектах возможность структурных нейтронно-стимулированных превращений связана с сечениями захвата нейтронов различными атомными ядрами в веществе. Результаты изучения воздействия тепловых нейтронов на характеристики биологических объектов приводятся в ряде научных работ [8-10], но в целом данная проблема требует детальной разработки и детальных исследований.

В качестве объектов исследования нами были выбраны бактерии, выбор обосновывался их относительно простыми молекулярными структурами, в главе 3 изучены характеристики и их изменение для бактерий видов *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*, которые происходят под воздействием на бактерии тепловых нейтронов, опытным путём показано усиление биологической активности этих бактерий, а также положительное влияние определённых потоков тепловых нейтронов на их выживаемость (эффект гормезиса).

С целью определения физических механизмов протекания возможных ядерных реакций, которые при воздействии тепловых нейтронов малых потоков с бактериями могут приводить к явлению гормезиса, нами в данном разделе исследованы ИК-спектры этих биологических объектов. Изучено воздействие тепловых нейтронов малых потоков на спектральные характеристики бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*, кото-

рые являются азот- и фосфорфиксирующими бактериями и применяются в качестве микроудобрений в сельском хозяйстве [129-135].

На рисунке 14 в качестве примера показан ИК-спектр бактерий вида *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ, облучённых малым потоком тепловых нейтронов.

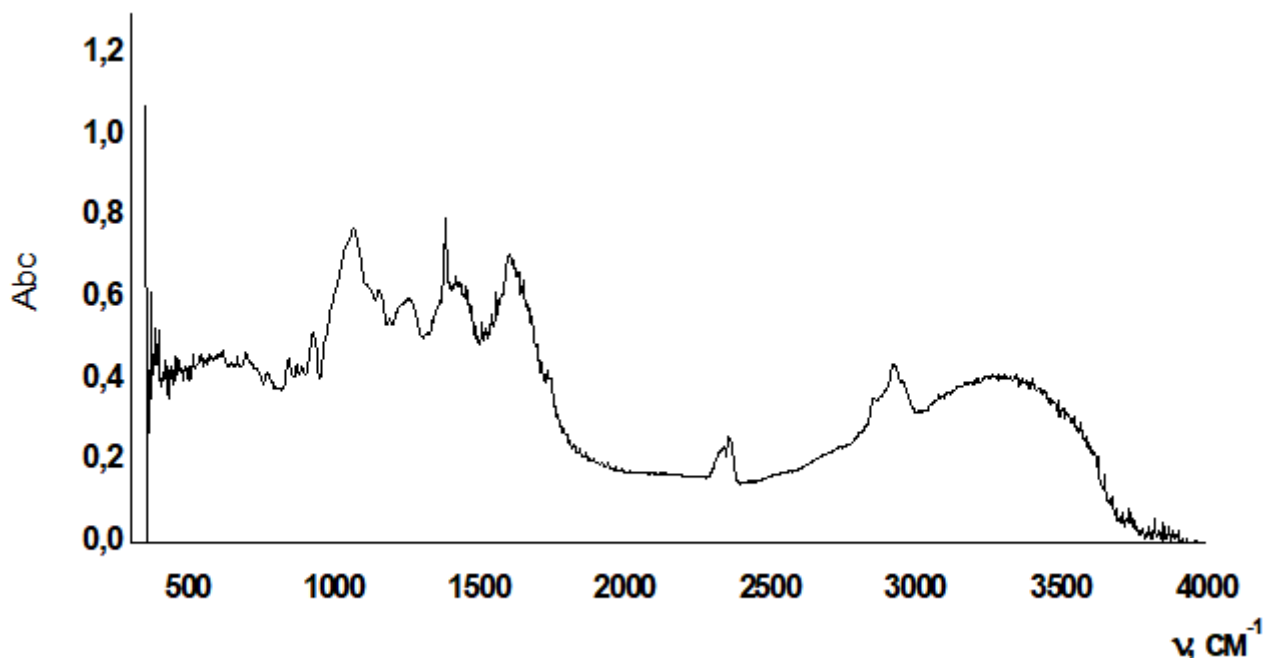


Рисунок 14 - ИК-спектр бактерий вида *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ, облучённые тепловыми нейтронами при потоке $5.4 \cdot 10^6$ нейтрон/см².

В ИК-спектре бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ после облучения интенсивность группы полос при 2900 см^{-1} становится выше, чем интенсивность широкой полосы 3200 см^{-1} . Наблюдается существенное увеличение интенсивности резкой полосы 1384 см^{-1} по сравнению с интенсивности широкой полосы 1400 см^{-1} . В области $1250-400 \text{ см}^{-1}$ существенных изменений не наблюдается.

Сравнительный анализ ИК-спектров *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ до облучения (рисунок 12) и после облучения (рисунок 14) потоком нейтронов в течении 3-х часов при потоке $5,4 \cdot 10^6$ нейтрон/см² показал, что если в спектре необлучённых бактерий (рисунок 12) интенсивность широкой полосы в области 3340 см^{-1} выше, чем интенсивность группы полос при 2920 см^{-1} , то после облучения интенсивность группы полос при 2920 см^{-1} становится выше интенсивности полосы

3340 cm^{-1} . Интенсивность всех полос в области 1800-900 cm^{-1} становится выше интенсивности полос поглощения 3340 cm^{-1} .

В пределах этой области спектра интенсивность группы полос при 1050 cm^{-1} повышается по сравнению с интенсивности группы полос при 1600 cm^{-1} . После облучения заметно повышается интенсивность полосы поглощения 1384 cm^{-1} .

Таким образом, из качественного анализа ИК-спектров, представленных на рисунках 12 и 14, можно заключить, что облучение фиксирующих азот бактерий вида *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ малыми потоками нейтронов не заменяет количественное соотношение ароматических и алкильных составляющих. После облучения содержание гидроксильных групп становится меньше алкильных фрагментов, но существенно снижается по отношению к ароматическим группам.

На рисунке 15 приведён ИК-спектр бактерий вида *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*, облучённые тепловыми нейтронами при потоке $5.4 \cdot 10^6$ нейтрон/ cm^2 .

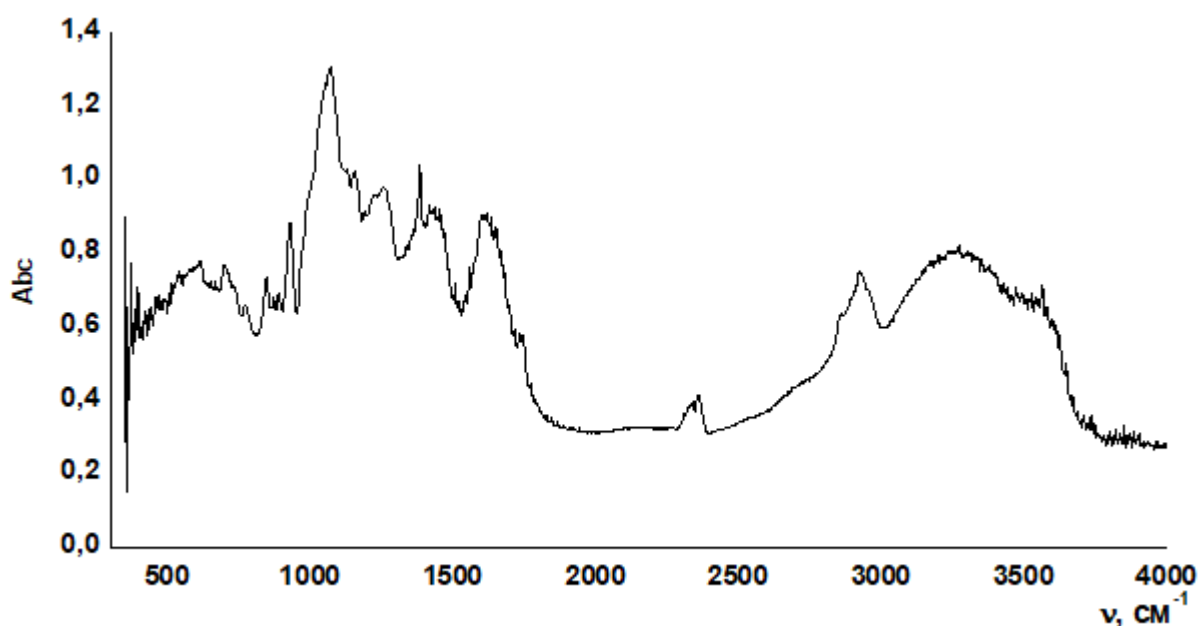


Рисунок 15 - ИК-спектр бактерий вида *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*, облучённых тепловыми нейтронами при потоке $5.4 \cdot 10^6$ нейтрон/ cm^2 .

В ИК-спектре облучённых образцов с высокочастотной области широкой полосы 3300 cm^{-1} наблюдается плато в районе 3550 cm^{-1} . Наблюдается слабое увеличение интенсивности группы полос при 2929 cm^{-1} . Наблюдается асимметричное

расширение полосы 1600 см^{-1} со стороны высоких частот. Резкое увеличение интенсивности полосы 1384 см^{-1} по сравнению с интенсивностью широкой полосы 1435 см^{-1} . В области $1200\text{-}400\text{ см}^{-1}$ существенных изменений не наблюдается.

На рисунках 16 и 17 в качестве примера приводятся ИК-спектры бактерий видов *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* после облучения их тепловыми нейтронами при потоках $5.4 \cdot 10^6$ нейтрон/см².

Сравнительный анализ ИК-полос поглощения при облучении малым потоком тепловых нейтронов (рисунок 15) с ИК-спектром бактерий *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*, облучённых потоком тепловых нейтронов $24 \cdot 10^6$ нейтрон/см² (рисунок 17) показывает, что облучение приводит к чёткому проявлению заметного выступа в низкочастотной области широкой полосы 3340 см^{-1} в области 3500 см^{-1} , к уменьшению интенсивности широкой полосы 3340 см^{-1} , к повышению интенсивности группы полос в области $1800\text{-}1200\text{ см}^{-1}$ по отношению к интенсивности полосы 3340 см^{-1} . Наблюдается заметное увеличение оптической плотности поглощения при 1384 см^{-1} .

Таким образом качественный анализ ИК-спектров бактерий видов *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* до и после облучения малыми потоками тепловых нейтронов приводит к следующим изменениям: содержание ароматических групп становится больше, чем алифатических. После облучения содержание гидроксильных групп становится сравнимым с содержанием алкильных фрагментов, но заметно снижается по отношению к ароматическим группам.

При сравнении исходных ИК-спектров бактерий с ИК-спектрами облучёнными тепловыми нейтронами бактерий при малых потоках наблюдается заметное повышение интенсивности полосы поглощения при 1384 см^{-1} . При дальнейшем увеличении облучения интенсивность этой полосы снижается. В качестве иллюстрации сказанного на рисунках 16 и 17 приведены ИК-спектры изученных нами бактерий после облучения тепловыми нейтронами при потоках $5.4 \cdot 10^6$ нейтрон/см² в области частот 1384 см^{-1} .

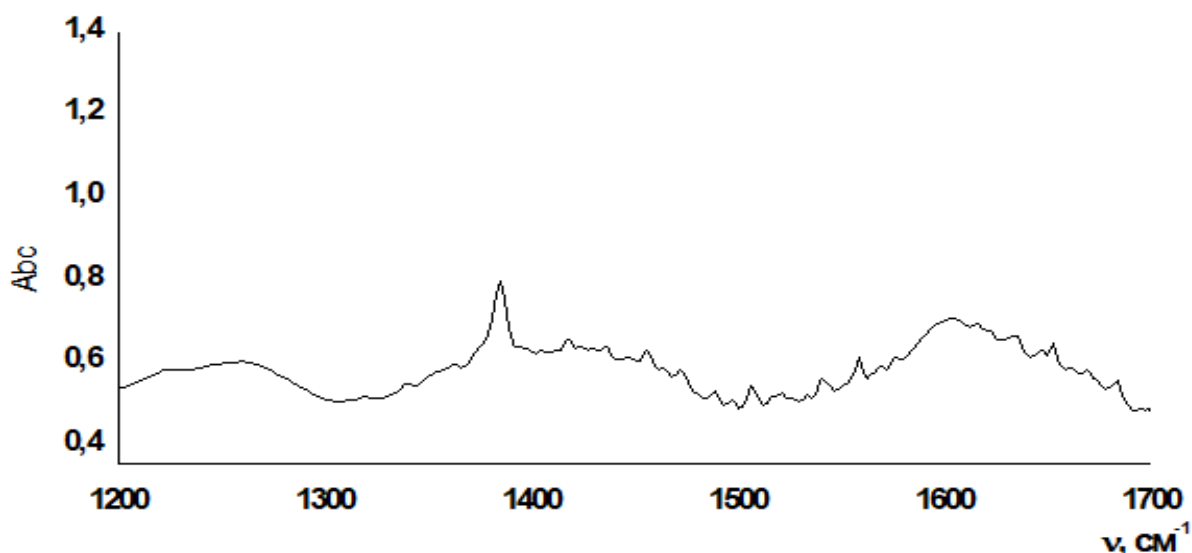


Рисунок 16 - ИК-спектр бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ после облучения их тепловыми нейтронами при потоках $5.4 \cdot 10^6$ нейтрон/см² для области частот 1384 см⁻¹.

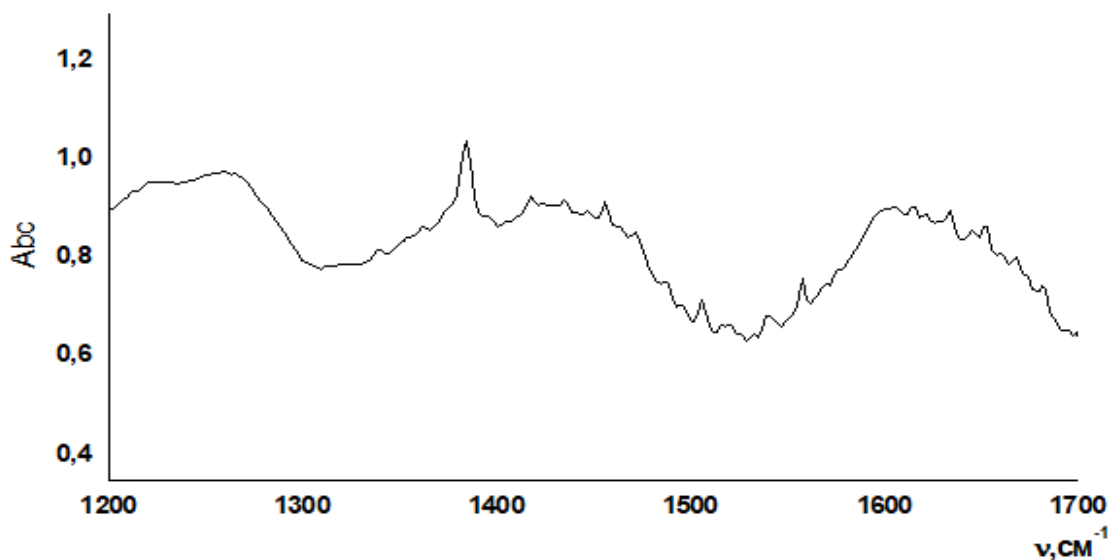


Рисунок 17 - ИК-спектр бактерий *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*, облученные тепловыми нейтронами при потоках $5.4 \cdot 10^6$ нейтрон/см² для области частот 1384 см⁻¹.

Исследована зависимость оптической плотности полосы при 1384 см⁻¹, которая ответственна за деформационные колебания δСН-группы в ИК-спектрах бактерий видов *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ (рисунок 18) и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* (рисунок 19) от величин потоков тепловых нейтронов.

На основании сравнительного анализа ИК-спектров на рисунках 18 и 19 можно утверждать, что оптическая плотность полосы при 1384 см^{-1} для обоих видов бактерий увеличивается при определённых потоках тепловых нейтронов. Эта оптическая плотность данной полосы для обеих бактерий увеличивается, и далее эта зависимость после прохождения через максимум снова начинает снижаться. Как уже отмечалось в главе 3, в этом случае происходит увеличение биологической активности исследуемых бактерий.

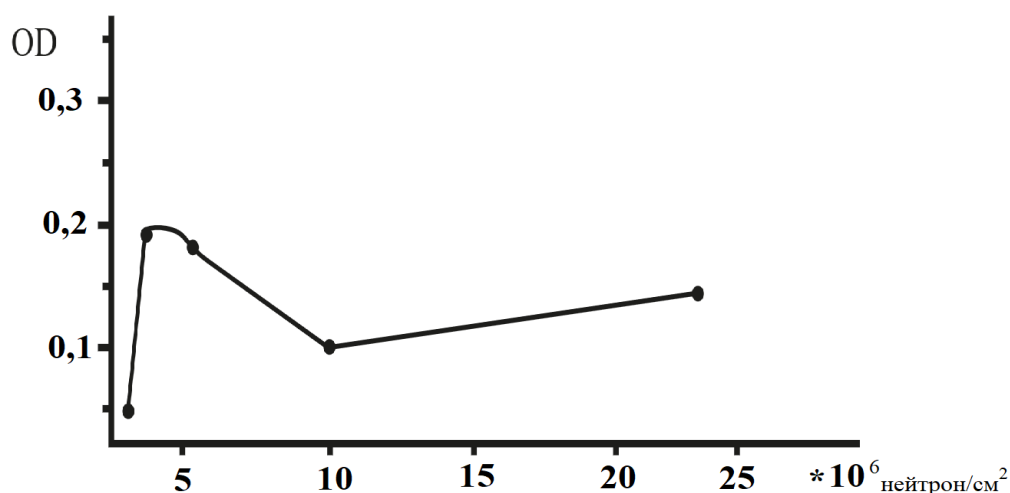


Рисунок 18 – Влияние величины потока тепловых нейтронов на изменение оптической плотности полосы поглощения 1384 см^{-1} в ИК-спектре *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ.

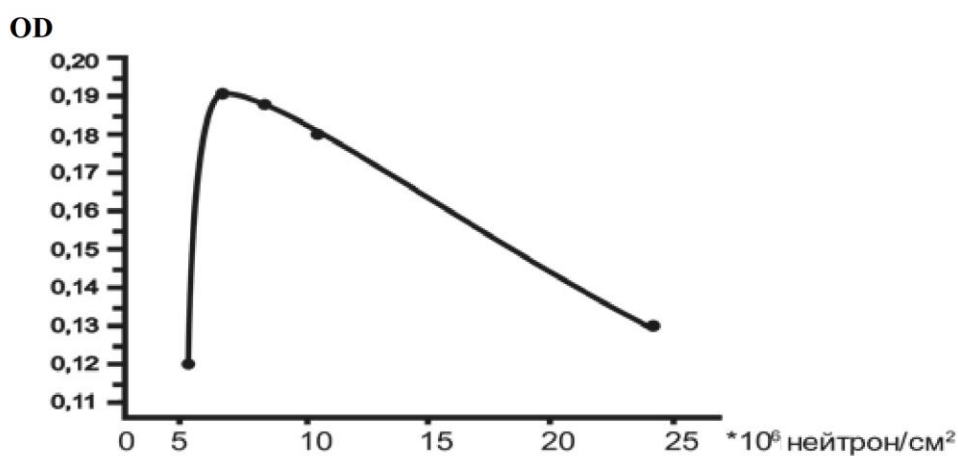


Рисунок 19 - Влияние величины потока тепловых нейтронов на изменение оптической плотности полосы поглощения 1384 см^{-1} в ИК-спектре *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*.

Таким образом, на основании результатов, полученных в данном разделе, можно констатировать о наличии корреляции между повышением биологической активности и увеличением значений оптических плотностей отдельных полос поглощения в ИК-спектрах бактерий видов *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* после облучения их слабыми потоками тепловых нейтронов. Данная зависимость указывает на протекание ядерной реакции с радиационным захватом тепловых нейтронов $^{14}_7\text{N}(n, p)^{14}_6\text{C}$, что приводит к снижению содержания атомных ядер азота и увеличению за счёт этого содержания атомных ядер углерода. Исходя из этого, представляется перспективным искусственным путём увеличить содержание в биологических объектах атомов углерода и, тем самым увеличить биологическую активность исследуемых объектов - бактерий. Особенно отметим, что в работе [11] при облучении семян некоторых растений тепловыми нейтронами было замечено, что частота некоторых полос ИК-спектра смещается. В данном исследовании этот эффект не наблюдается. Ввиду того, что семена растений и бактерий, являясь сложными биологическими объектами и имея общность, тем не менее, частично отличаются по составу и строению и, следовательно, возможное количество свободных радикалов, образующихся при облучении в семенах, отличается от количества свободных радикалов, образующихся в бактериях. Смещение частот полос в ИК-спектре облучённых семян, по-видимому, связано с изменением свойств этих радикалов на ядерном уровне.

4.3. Выводы по четвёртой главе

Таким образом, с помощью ИК-спектроскопических методов для бактерий видов *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* определены их полосы поглощения с основными характеристичными максимумами. Наблюдаемые характеристичные пики подтверждают присутствие алифатических и ароматических цепей в бактериях, то есть эти два вида бактерий являются двучленными.

Согласно экспериментальным результатам данной главы, можно заключить, что в ИК-спектре бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ ОППП соответствующих алифатических фрагментов структуры к ароматическим ($D_{\text{алкил}2936}/D_{\text{C=C}1645}$) является <1 , то есть ароматические фрагменты являются преобладающими по сравнению с алкильными фрагментами. Полученное значение $D_{\text{O-H}3430}/D_{\text{C=C}1645}$ является >1 , соответственно, то есть в исследуемой структуре находятся значительные концентрации гидроксильных групп. Отмечено преобладание гидроксильных групп по сравнению с алкильными, так как соотношение: $D_{\text{O-H}3430}/D_{\text{Салк}2936}$ является >1 . Согласно соотношению, $D_{\text{C=O}1730}/D_{\text{Салк}2936}$ делается заключение, что содержание алкильных заместителей больше, чем содержание карбоксильных групп, так как это соотношение <1 .

Для бактерий вида *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ карбонильные и гидроксильные группы преобладают над алифатическими и ароматическими группами, при этом ароматических групп больше, чем алифатических.

В ИК-спектре бактерий *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* также наблюдается преобладание гидроксильных фрагментов над ароматическими и алкильными фрагментами. Тогда как ароматические и алкильные фрагменты почти равны.

Таким образом, методом ИК-спектроскопии установлено, что в исследованных нами бактериях карбонильных и гидроксильных групп намного больше, чем алифатических и ароматических групп. Для бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ наблюдается преобладание ароматической составляющей над алкильными, тогда как для бактерий *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* эти составляющие почти равны.

Изучено влияние облучения малым потоком тепловых нейтронов на ИК-спектры бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*.

Установлено, что облучение бактерий вида *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80, которые являются азотфиксирующими, тепловыми нейтронами малых потоков не изменяет количественное соотношение ароматических и алкильных составляющих

щих. После облучения содержание гидроксильных групп становится меньше алкильных фрагментов, но существенно снижается по отношению к ароматическим группам.

Установлено, что облучение бактерий *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* малым потоком тепловых нейтронов приводит к следующим изменениям: содержание ароматических групп становится больше, чем алифатических. После облучения содержание гидроксильных групп становится сравнимым с содержанием алкильных фрагментов, но заметно снижается по отношению к ароматическим группам.

В ИК-спектре бактерий, облучённых тепловыми нейтронами малых потоков, наблюдается заметное повышение интенсивности полосы поглощения 1384 см^{-1} . При дальнейшем увеличении облучения интенсивность этой полосы снижается.

Отмечается корреляция между повышением биологической активности и увеличением значений оптических плотностей полосы поглощения при 1384 см^{-1} в ИК- спектрах бактерий видов *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* после облучения их слабыми потоками тепловых нейтронов.

Изменение оптической плотности полосы поглощения при 1384 см^{-1} указывает на протекание ядерной реакции с радиационным захватом тепловых нейтронов ${}^{14}_7\text{N}(n, p){}^{14}_6\text{C}$, что приводит к снижению содержания атомных ядер азота и увеличению за счёт этого содержания атомных ядер углерода. Исходя из этого, представляется перспективным искусственным путём увеличить содержание в биологических объектах атомов углерода и, тем самым увеличить биологическую активность исследуемых объектов - бактерий.

ВЫВОДЫ

Основные научные результаты диссертации:

В диссертации достигнута основная цель, заключающаяся в исследовании влияния малых потоков тепловых нейтронов на биологическую активность и спектральные характеристик биологических объектов на примере бактерий. В данной работе экспериментально показано, что основным механизмом, согласно которому осуществляется воздействие на биологические объекты малых потоков тепловых нейтронов, является ядерная реакция, в которой участвуют лёгкие атомные ядра, данная реакция также инициирует явление гормезиса. Явление гормезиса также проявляется при облучении малыми потоками тепловых нейтронов бактерий видов *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*. Определено, что время прорастания бактерий при инициировании явления гормезиса уменьшается в 5-6 раз при потоках тепловых нейтронов, составляющих $5,4 \cdot 10^6$ нейтрон/см².

С помощью ИК-спектроскопических методов для бактерий видов *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* определены их полосы поглощения с основными характеристичными максимумами.

Отмечается корреляция между повышением биологической активности и увеличением значений оптических плотностей полосы поглощения при 1384 см^{-1} в ИК- спектрах бактерий видов *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* после облучения их слабыми потоками тепловых нейтронов. Изменение оптической плотности полосы поглощения при 1384 см^{-1} указывает на протекание ядерной реакции с радиационным захватом тепловых нейтронов $^{14}_7\text{N}(n, p)^{14}_6\text{C}$, что приводит к снижению содержания атомных ядер азота и увеличению за счёт этого содержания атомных ядер углерода. Исходя из этого, представляется перспективным искусственным путём увеличить содержание в биологических объектах атомов углерода и, тем самым увеличить биологическую активность исследуемых объектов - бактерий.

В данной диссертационной работе исследования экспериментального характера выполнены полностью и предлагаются следующие новые научные результаты:

1. Освоена методика выращивания бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и разработана методика выращивания бактерий *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* [1-А, 5-А].

2. Установлено, что при облучении бактерий видов *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* тепловыми нейтронами малого потока наблюдается эффект “нейтронного гормезиса”. Время прорастания бактерий при потоках тепловых нейтронов $5,4 \cdot 10^6$ нейтрон/см² уменьшается в 5-6 раз [2-А, 5-А, 7-А, 8-А].

3. Экспериментально доказано сокращение времени прорастания семян арахиса при обработке их раствором гуминовой кислоты, которая облучена малым потоком тепловых нейтронов $5,4 \cdot 10^6$ нейтрон/см² [4-А].

4. В ИК-спектрах бактерий видов *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* для полос поглощения определены их основные характеристичные максимумы. Наблюдаемые характеристичные пики подтверждают присутствие алифатических и ароматических цепей в бактериях, то есть эти два вида бактерий являются двучленными. Установлено, что в исследованных нами бактериях карбонильных и гидроксильных групп намного больше, чем алифатических и ароматических групп. Для бактерий *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ наблюдается преобладание ароматической составляющей над алкильными, тогда как для бактерий *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* эти составляющие почти равны.

5. Показано что облучение изученных бактерий видов *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* малыми потоками тепловых нейтронов приводит к изменению интенсивности основных ИК-полос поглощения. Наблюдается заметное уменьшение гидроксильных групп по сравнению с ароматическими и алкильными фрагментами.

6. Показано, что оптическая плотность полосы поглощения при 1384 см^{-1} от продолжительности облучения, возрастая в начале облучения, далее уменьшается.

7. Отмечается корреляция между повышением биологической активности и увеличением значений оптических плотностей полосы поглощения при 1384 см^{-1} в ИК- спектрах бактерий видов *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* после облучения их малыми потоками тепловых нейтронов. Изменение оптической плотности полосы поглощения при 1384 см^{-1} указывает на протекание ядерной реакции с радиационным захватом тепловых нейтронов $^{14}_7\text{N}(n, p)^{14}_6\text{C}$, что приводит к снижению содержания атомных ядер азота и увеличению за счёт этого содержания атомных ядер углерода. Искусственное увеличение содержания атомных ядер углерода увеличит биологическую активность исследуемых объектов - бактерий [1-А, 2-А, 3-А, 7-А, 8-А, 10-А].

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ

На примере изменения характеристик бактерий видов *Rhizobium phaseoli* IS TAAS-80 TJ и *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*, облучённых тепловыми нейтронами, предложен новый способ изучения влияния малых потоков тепловых нейтронов на свойства биологических объектов, который приведёт к разработке новых способов использования достижений ядерной биотехнологии для улучшения качества микроудобрений.

Полученные в работе экспериментальные результаты, а также обнаруженный эффект “нейтронного гормезиса” найдут применение в ядерной биотехнологии производства микроудобрений, и могут быть использованы для увеличения быстродействия удобрений, содержащих органические вещества для дальнейшего их применения в технологии гарантированного производства сельхозпродуктов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мамонтов, А. П. Эффект малых доз ионизирующего излучения / А. П. Мамонтов, И. П. Чернов. - Томск: Дельтаплан, 2009. – С. 288.
2. Махсудов, Б.И. Влияние тепловых нейтронов на излучательные характеристики InGaAsP/AlGaAs-гетеролазеров / Б. И. Махсудов // Квантовая электроника. – 2015. – Т. 45. - № 3. – С. 216-217.
3. Кузин, А. М. Радиоактивность среды обитания как необходимый фактор нормального существования и развития растений / А. М. Кузин // Физиология растений. – 1998. – Т. 45. - № 3. – С. 472-474.
4. Мухин, К. Н. Экспериментальная ядерная физика / К. Н. Мухин. – М.: Атомиздат, 1974. – 366 с.
5. Tanaka K. Effects of ^{252}Cf Neutrons, Transmitted through an Iron Block on Human Lymphocyte Chromosome / K. Tanaka, M. Hoshi, S. Sawada, N. Kamada // Intern. J. Radiat. Biol. - 1994. - V. 66. - P. 391-396.
6. Жижина, Г. П. Структурные превращения макромолекул ДНК в водно-солевом растворе и выживаемость бактерий *Escherichia coli* в ультраслабом поле термализованных нейтронов / Г. П. Жижина, А. Г. Липсон, И. А. Гагина [и др.] // Доклады Российской академии наук. – 2010. - Т. 431. - № 1. - С. 123-128.
7. Василенко, И. Я. Радиация. Источники. Нормирование облучения / И. Я. Василенко // Природа. – 2001. – № 4. – С. 10-16.
8. Кузин, А. М. Проблема малых доз и идеи гормезиса в радиобиологии / А. М. Кузин // Радиобиология. –1991. – Т. 31. - Вып. 1. – С. 16-21.
9. Кузин, А. М. Возможные механизмы участия природного радиационного фона (ПРФ) в стимуляции деления клеток / А. М. Кузин // Радиационная биология. Радиозэкология. – 1994. – Т. 34. – С. 398-401.
10. Luchkey, T. D. Hormesis with Ionizing Radiation / T. D. Luchkey. - Boca Raton: CRC Press Inc., 1980. – 169 p.
11. Кузин, А. М. Идеи радиационного гормезиса в атомном веке / А. М. Кузин. - М.: Наука, 1995. - 158 с.

12. Kauffman, J. M. Radiation hormesis: demonstrated, deconstructed, denied, dismissed, and some implications for public policy / J. M. Kauffman // *J. of Scient. Exploration.* – 2003. - Vol. 17. - № 3. - P. 389-407.
13. Ивановский, Ю. А. Радиационный гормезис. Благоприятны ли малые дозы ионизирующей радиации / Ю. А. Ивановский // *Вестник ДВО РАН.* – 2006. - № 6. – С. 86-91.
14. Ивановский, Ю. А. Радиационный гормезис, радиационная стимуляция или гиперфункциональный эффект ионизирующего облучения / Ю. А. Ивановский // *Радиобиология.* - 1993. - Т. 33. - № 2. – С. 760-763.
15. Ивановский, Ю. А. Эффект аномального роста «под лучом» и радиочувствительность морской красной водоросли *Gracilariall* / Ю. А. Ивановский, В. Н. Кулепанов, Л. Н. Лесникова [и др.] // *Радиобиология.* - 1986. - Т. 26. - № 1. – С. 95-99.
16. Кузин, А.М. Идеи радиационного гормезиса в атомном веке / А. М. Кузин. – М.: Наука, 1995. - 158 с.
17. Pollycove, M. Biologic response to low doses of ionizing radiation: detriment versus hormesis. Part 2. Dose response of cells and tissues / M. Pollycove, L. E. Feinendegen // *Journal of Nuclear Medicine.* - 2001. - V. 42. - №. 9. - P. 26.
18. Abbat, J. D. Epidemiological studies in three corporations covering the Canadian nuclear fuel cycle; Biological effects of low level radiation / J. D. Abbat, T. R. Hamilton, J. L. Weeks. - Vienna, IAEA, 1983. - P. 351.
19. Петин, В. Г. Некоторые эффекты радиационного гормезиса бактериальных и дрожжевых клеток / В. Г. Петин, И. И. Морозов, Н. М. Кабакова, Т. А. Горшкова // *Радиационная биология. Радиоэкология.* - 2003. – Т. 43. - № 6. – С. 176-178.
20. Tokarskaya, Z. B. Multifactorial analysis of lung cancer dose –response relationships for workers at the Mayak Nuclear Enterprise / Z. B. Tokarskaya, N. D. Okladnikova, Z. D. Belyaeva, E. G. Drozhko // *Health Physics.* - 1997. - Vol. 73. -№ 6. - P. 899-905.

21. Yamada, S. Anti-tumor effect of low dose total (or half) body irradiation and changes of the functional subset of peripheral blood lymphocytes in non-Hodgkin's lymphoma patients after TBI (HBI) / S. Yamada, K. Nemoto, Y. Ogawa [et al.] // Low Dose Irradiation and Biological Defense Mechanisms. Amsterdam: Experta.
22. Бурлакова, Е. Б. Новые аспекты закономерностей действия низкоинтенсивного облучения в малых дозах / Е. Б. Бурлакова, А. Н. Голощапов, Г. П. Жижина, А. А. Конрадов // Радиационная биология. Радиоэкология. - 1999. - Т. 39. - № 1. - С. 26-33.
23. Pollycove, M. Radiation-induced versus endogenous DNA damage: Possible effect of inducible protective responses in mitigating endogenous damage / M. Pollycove, L. E. Feinendegen // Human and Experimental Toxicology. - 2003. - Vol. 22. - № 6. - P. 290-306.
24. Prasad, K. N. Health risks of low dose ionizing radiation in humans: A review / K. N. Prasad, W. C. Cole, G. M. Hasse // Experiment. Biology and Medicine. - 2004. - Vol. 229. - № 2. - P. 378-382.
25. Miller, A. B. Mortality from breast cancer after irradiation during fluoroscopic examination in patients being treated for tuberculosis / A. B. Miller, G. R. Howe, G. J. Sherman [et al.] // Nation. England J. of Medicine. - 1989. - Vol. 321. - P. 1285-1289.
26. Махсудов, Б. И. Влияние гамма-облучения на излучательные характеристики лазерных гетероструктур / Б. И. Махсудов // Квантовая электроника. – 2012. - Т. 42. - № 8. – С. 745-746.
27. Биленко, Д. И. Влияние гамма-излучения малых доз на электрофизические свойства мезопористого кремния / Д. И. Биленко, В. В. Галушка, Э. А. Жаркова [и др.] // Письма в журнал технической физики. - 2017. - Т. 43. – Вып. 3. - С. 57-64.
28. Чурюкин, Р. С. Влияние облучения (^{60}Co) семян ячменя на развитие растений на ранних этапах онтогенеза / Р. С. Чурюкин, С. А. Гераськин // Радиация и риск. - 2013. - Т. 22. - № 3. - С. 80-92.

29. Лаханова, К. М. Действие различных доз рентгеновских и гамма-лучей на солодку уральскую / К. М. Лаханова, М. У. Сарсембаева // Успехи современного естествознания. – 2015. – № 6. – С. 119-122.
30. Махсудов, Б. И. Влияние комптоновского рассеяния гамма-излучения на излучательные характеристики лазерных гетероструктур / Б. И. Махсудов // Национальная конференция «Современные проблемы физики конденсированного состояния», посвящённая 70-летию профессора Т. Б. Бобоева. – Душанбе, 2012. – С. 49-50.
31. Гордеев, И. В. Справочник по ядерно-физическим константам для расчёта реакторов / И. В. Гордеев, Д. А. Кардашев, А. В. Малышев. - М.: Атомиздат, 1960. – 278 с.
32. Махсудов, Б. И. Детектор нейтронов на основе InGaAsP/AlGaAs-гетеролазеров / Б. И. Махсудов // Доклады АН Республики Таджикистан. - 2014. - Т. 57. - № 8. – С. 666-670.
33. Махсудов, Б. И. Прочностные свойства нейтрино-облученных эпитаксиальных плёнок Cd-Te / Б. И. Махсудов, А. Т. Акбарова, Д. И. Бринкевич [и др.] // Журнал Белорусского гос. ун-та. Физика. - 2018. - № 1. - С. 73-79.
34. Бринкевич, Д. И. Физико-механические свойства эпитаксиальных слоев GaP / Д. И. Бринкевич, Н. В. Вабищевич, С. А. Вабищевич // Вестник Полоцкого университета. Серия Фундаментальные науки. - 2010. - № 9. - С. 92-97.
35. Бринкевич, Д. И. Склерометрический метод измерения микротвёрдости плёнок фоторезиста на кремнии / Д. И. Бринкевич, В. С. Просолович, Ю. Н. Янковский [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2016. - Т. 7. - № 1. - С. 77-84.
36. Концевой, Ю. А. Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур / Ю. А. Концевой, Ю. М. Литвинов, Э. А. Фаттахов. - М.: Радио и связь, 1982. - С. 240.

37. Головчук, В. И. Модификация оптических свойств полиэтилентерефталата облучением тепловыми нейтронами / В. И. Головчук, Ю. А. Бумай, М.Г. Лукашевич [и др.] // Международная конференция «Перспективы развития физического науки», посвящённая памяти и 80-летию Заслуженного деятеля науки и техники Республики Таджикистан, члена-корреспондента АН РТ, доктора физико-математических наук, профессора Ф. Х. Хакимова. – Душанбе, 2017. - С. 33-36.
38. Кривов, М. А., Потахова, Г. И., Рыбкина, Л. П. // Известия вузов. Физика. - 1966. - Вып. 1. - С. 190-191.
39. Доморяд, И. А. Действие радиоактивного излучения на вещества / И. А. Доморяд. - Ташкент: ФАН, 1970. - С. 27-29.
40. Сирота, Н. Н., Курилович, Н. Ф., Березина, Г. М. // Доклады АН БССР. - 1975. - Т. XIX. - № 10. - С. 880-882.
41. Глинчук, К. Д. Влияние облучения быстрыми нейтронами на фотолюминесценцию кристаллов N-GAAS(Те) / К. Д. Глинчук, А. В. Прохорович // Физика и техника полупроводников. - 1997. - Т. 31. № 5. - С. 533-535.
42. Coates, R., Mitchell, E.W.J. // Advances in Physics. - 1975. - V. 24. - № 5. - P. 593-644.
43. Кладько, В. П. О влиянии легирующей примеси на процесс формирования разупорядоченных областей в GaAs при облучении быстрыми нейтронами / В. П. Кладько, С. В. Пляцко // Физика и техника полупроводников. - 1998. - Т. 32. - № 3. - С. 261-263.
44. Джибути, З. В. Влияние нейтронного облучения на экситонное поглощение в арсениде галлия / З. В. Джибути, Н. Д. Долидзе, Б. Е. Цеквава, Г. Л. Эристави // Письма в Журнал технической физики. - 2003. - Т. 29. - № 13. - С. 26-30.
45. Аблова, М. С. Методы испытания на микротвёрдость. Приборы / М. С. Аблова. - М.: Наука, 1965. - С. 237-244.

46. Коршунов, Ф. П. Радиационные эффекты в технологии полупроводниковых материалов и приборов / Ф. П. Коршунов, Ю. В. Богатырев, С. Б. Ластовский // http://www.physics.by/e107_files/mono/book_pdf/st_16.pdf
47. Азарко, И. И. Влияние нейтронного облучения малыми дозами на физические свойства кристаллов алмаза / И. И. Азарко, А. Г. Дутов, Е. И. Козлова [и др.] // IV Международная конференция «Взаимодействие излучения с твёрдым телом». – 2001. - С. 234-236.
48. Nadolinny, V. A., Yelisseyev, A. P., Baker, J. M. [et al.] // *Diamond and Related Materials*. - 2000. - № 9. - P. 883-886.
49. Morelli, D. T., Perry, T. A., Farmer, J. W. // *J. Phys.Rev.* - 1993. – В. 47. - № 1. - P. 131-139.
50. Чистяков, Ю. Д. Чистяков, Ю. Д. Методы исследования инжекционных свойств невыпрямляющих контактов / Ю. Д. Чистяков, А. П. Достанко, В.В. Баранов // *Обзоры по электронной технике. Серия «Полупроводниковые приборы»*. - Вып. 7. - М.: ЦНИИ «Электроника», 1974.
51. Пат. № 5328 (Республика Узбекистан). Способ изготовления кремниевых ограничителей напряжения / А. Ф. Муратов, А. З. Рахматов, А. А. Меркулов, И. Р. Исмоилов; Оpubл. в бюлл. № 3 от 30.09.1994.
52. Кушниренко, В. В. Воздействие импульсов прямого тока на время жизни неосновных носителей заряда в р-п-диоде / В. В. Кушниренко, Г. Н. Нинидзе П. С. Павлюк [и др.] // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. - 2007. - № 1.
53. National Council on Radiation Protection and Measurements: Radiation protection Guidance for Activities in Low-Earth Orbit, NCRP Rept. № 132. - Bethesda (Maryland), NCRP, 2000.
54. Zhang, W. Relative Biological Effectiveness of Fission Neutrons for Producing Micronuclei in the Root-tip Cells of Onion Seedlings after Irradiation as Dry Seeds / W. Zhang, S. Endo, M. Ishikawa [et al.] // *J. Radiat. Res.* - 2002. - V. 43. - P. 397-403.

55. Kal, H. B. Effectiveness of Cf 252-neutrons at low dose rates / H. B. Kal // *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* – 1982. – V. 8. – P. 1549-1554.
56. Britten, R. A. Biological factors influencing the RBE of neutrons: Implications for their past, present and future use in radiotherapy / R. A. Britten, L. J. Peters, D. Murray / *J. Radiat. Res.* – 2001. – V. 156. – P. 125-135.
57. Evans, H. J. The relative biological efficiency of single doses of fast neutrons and gamma-rays on *Vicia faba* roots and the effect of oxygen. Part II. Chromosome damage: the production of micronuclei / H. J. Evans, G. J. Neary, F. S. Williamson // *Int. J. Radiat. Biol.* – 1959. – V. 3. – P. 216-229.
58. Cebulska-Wasilewska, A. Relative biological efficiency for the induction of various gene mutations in normal and enriched with 10B *Tradescantia* cells by neutrons from ²⁵²Cf source / A. Cebulska-Wasilewska, K. Schneider, J. K. Kim // *J. Mutat. Res.* - 2001. - V. 474. - P. 57-70.
59. Ходжаев, Т. А. Изучение механизма влияния тепловых нейтронов на процесс прорастания и всхожесть семян кукурузы методом ИК-спектроскопии / Т. А. Ходжаев, Н. У. Муллоев, Б. И. Махсудов // *Вестник Таджикского национального университета.* - 2015. - № 1/5 (188). - С. 113-117.
60. Пат. № ТЈ 487 (Республика Таджикистан). Способ повышения коэффициента действия азотных удобрений / Т. А. Ходжаев, Н. У. Муллоев, Б. И. Махсудов; от 10.06.2016.
61. Липсон, А. Г. Структурная трансформация макромолекул ДНК при облучении в слабом поле термализованных нейтронов / А. Г. Липсон, Г. П. Жижина, Е. Б. Бурлакова [и др.] // *Биофизика.* – 2007. - Т. 52. - № 5. - С. 830-837.
62. Алиев, С. А. Азотфиксация и физиологическая активность органического вещества почв / С. А. Алиев. – Новосибирск: Наука, 1988. - 144 с.
63. Александрова, И. В. Органическое вещество почвы и азотное питание растений / И. В. Александрова // *Почвоведение.* – 1977. - № 5. - С. 31-37.

64. Терещенко, Н. Н. Бактериальные удобрения: проблемы и перспективы применения / Н. Н. Терещенко // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. - 2007. - № 7. - С. 14-20.
65. Баймиев, А. Х. Современная систематика клубеньковых растений / А. Х. Баймиев, Р. С. Гуменко, Р. Т. Матниязов [и др] // Юиомика. – 2013. – Т. 5. - № 3-4. – С.136-157.
66. Шильникова, В. К. Приживаемость клубеньковых бактерий в ризосфере клевера в начальные этапы инфицирования / В. К. Шильникова // Известия ТСХА. – 1975. – В. 6. - С. 19-28.
67. Шильникова, В. К. Эффективность инокуляции семян гороха при обработке растений синтетическими регуляторами роста / В. К. Шильникова, О. Г. Волобуева, Г.П. Гурьев // Известия ТСХА. – 1992. – В. 1. – С. 85-91.
68. Шильникова, В. К. Симбиотическая активность и урожайность растений гороха под влиянием синтетических регуляторов роста / В. К. Шильникова, О. Г. Волобуева, Г. П. Гурьев // IV Всесоюзная конференция «Микроорганизмы в сельском хозяйстве»: Сб. тезисов докладов. - Пушкино, 1992. – С. 212-213.
69. Волобуева, О. Г. Использование биопрепаратов и регуляторов роста в повышении эффективности бобово-ризобиального симбиоза / О. Г. Волобуева // Доклады ТСХА. – 2010. - Вып. 282. – Ч. 1. - С. 707-710.
70. Волобуева, О. Г. Взаимодействие биологически активных веществ ризобий с эндогенными фитогормонами бобовых растений / О. Г. Волобуева // Всероссийский симпозиум с международным участием «Биологически активные вещества микроорганизмов. Прошлое, настоящее, будущее»: Тезисы материалов. - М.: Изд-во МГУ, 2011. – С. 25.
71. Волобуева, О. Г. Эффективность инокуляции семян гороха разных сортов при обработке агростимулином / О. Г. Волобуева // Учёные записки Орловского государственного университета. – 2013. - № 3 (53). – С. 153-158.

72. Волобуева, О. Г. Роль ростовых веществ в формировании бобово-ризобиального симбиоза / О. Г. Волобуева // Продукционный процесс растений и его регуляция: Сборник статей. – Орел, 2014. – С. 275-278.
73. Терещенко, Н. И. Биодобreenня на основе микроорганизмов: Учебное пособие. - Томск: Томский государственный университет, 2003. - 60 с.
74. Пахомова, В. М. Научно-методические основы биотехнологий в растениеводстве / В. М. Пахомова, А. И. Даминова. - Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2018. - 344 с. Шифр ЦНСБ 19-94.
75. Бойчинова, Е. С. Инфракрасная спектроскопия / Е. С. Бойчинова, Е. Д. Брынзова, А. А. Мохов [и др.]. - Л., 1975. - 145 с.
76. Ахманова, М. В. Инфракрасные спектры поглощения минералов / М. В. Ахманова // Успехи химии. - 1959. - Т. 28. - № 3. - С. 311 - 324.
77. Сеткина, О. Н. Инфракрасные спектры минералов и их практическое применение / О. Н. Сеткина// Записки Всесоюзного минералогического общества. - 1959. - Т. 88. - Вып. 1. - С. 39 - 47.
78. Steward, E. G. Fourier Optics An Introduction / E. G. Steward. – London, 1983. - P. 6.
79. Bell, R. J. Introductory Fourier Transform Spectroscopy Introductory / R. J. Bell // Academic Press, 1975. - 380 p.
80. Keller, W. D. Infrared spectra of some rock-forming minerals / W.D. Keller, J. H. Spotts, D. L. Biggs // Amer. J. Science. - 1952. – V. 250. - P. 453-471.
81. Huang, C. K. Infrared study of the carbonate minerals / C. K. Huang, P. F. Kerr // American Mineralogist. - 1960. - V. 45. - № 3-4. - P. 311 - 324.
82. Tuddenham, W. H. Infrared techniques in identification and measurement of minerals / W. H. Tuddenham, R. J. P. Lion // Analytical Chemistry. - 1961. - V. 32. - № 11. - P. 1630-1634.
83. Коровкин, М.В. Инфракрасная спектроскопия карбонатных пород и минералов: Учебное пособие / М. В. Коровкин, Л. Г. Ананьева. – Томск: Томский политехнический университет, 2016. – 75 с.

84. Hunt, J. M. Infrared absorption spectra of mineral and other inorganic compounds / J. M. Hunt, M. P. Wisherd, L.C. Bonham // *Analytical Chemistry*. - 1950. - Vol. 22. - № 12. - P. 1478-1497.
85. Федотов, А. П. О влиянии таблетирования с бромидом калия на инфракрасные спектры поглощения индометацина / А. П. Федотов, Т. П. Шахтшнейдер, Ю. А. Часалов, Е. В. Суров / *Химико-фармацевтический журнал*. - 2009. - Т. 43. - № 1. - С. 50-52.
86. Preisner, O. Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy in bacteriology: towards a reference method for bacteria discrimination / O. Preisner, J. A. Lopes, R. Guiomar [et al.] // *J. Anal. Bioanal. Chem.* – 2007. - № 387 (5). – С. 1739-1748.
87. Sergeychuk, M. G. IR-spectroscopy in identification bacteria of Bacillus: Manuscript candidate degree thesis by speciality biological sciences / M. G. Sergeychuk. – Kiev, 1980. – 24 p.
88. Rodriguez-Saona, L. E. Detection and identification of bacteria in a juice matrix with Fourier transform-near infrared spectroscopy and multivariate analysis / L. E. Rodriguez-Saona, F. M. Khambaty, F. S. Fry [et al.] // *J. Food Prot.* – 2004. - № 67 (11). – P. 2555-2559.
89. Бак, М. А. Измерение потока тепловых нейтронов по одновременной активации двух различных детекторов / М. А. Бак, Ю. Ф. Романов // *Атомная энергия*. - 1969. – Т. 26. – Вып. 6. – С. 550-552.
90. Стогов, Ю. В. Основы нейтронной физики: Учебное пособие / Ю. В. Стогов. - М.: МИФИ, 2008. – 204 с.
91. Маслов, И. А. Справочник по нейтронному активационному анализу / И. А. Маслов, В. А. Лукницкий. - Л., 1971. - 312 с.
92. Баранова, А. А. Радиационная биофизика: Лабораторный практикум / А. А. Баранова. - Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2018. - 100 с.
93. Беланова, Т. С. Радиационный захват нейтронов: Справочник / Т. С. Беланова, А. В. Игнатюк, А. Б. Пашенко, В. И. Пляскин. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 248 с.

94. Степанов, Ю. М. Экспериментальные методы ядерной физики. Часть 1: Учебное пособие / Ю. М. Степанов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 370 с.
95. Каримова, Е. Р. Изучение влияния биопрепарата клубеньковых бактерий *Rhizobium* на бобовые и злаковые культуры / Е. П. Каримова, Г. Г. Худайгулов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». - 2018. - Т. 6. - № 2. - С. 52-57.
96. Лобанов, А. Н. Продукция экзополисахаридов бактериями *Rhizobium leguminosarum* при периодическом культивировании / А. Н. Лобанов, Т. В. Полюдова // Биомика. – 2020. – Т. 12. - № 2. – С. 224-231.
97. Горовая, А. И. Роль физиологически активных гуминовых кислот в адаптации растений к действию ионизирующей радиации и пестицидов / Гуминовые кислоты в биосфере / А. И. Горовая. – М.: Наука, 1993. - С. 144-149.
98. Уланов, Н. Н. Возможности использования окисленных углей и гуминовых кислот в сельском хозяйстве / Гуминовые кислоты в биосфере / Н.Н. Уланов. – М.: Наука, 1993. - С. 157-161.
99. Вишнякова, Л. В. Применение гуминовых стимуляторов роста растений при выращивании овощей в защищённом грунте / Л. В. Вишнякова, С. Н. Дуброва, Р. Х. Аляутдинова // Кокс и химия. - 1985. - № 12. - С. 40-41.
100. Helm, D. Elaboration of a procedure for identification of bacteria using Fourier-transform IR spectral libraries: a stepwise correlation approach / D. Helm, H. Labischinski, D. Naumann // J. Microbiol. Methods. - 1991. – V. 14. – P. 127.
101. Helm, D. Classification and identification of bacteria by Fourier-transform infrared spectroscopy / D. Helm, H. Labischinski, G. Schallehn, D. Naumann // J. Gen. Microbiol. - 1991. – V. 137. – P. 69-79.
102. Vershigora, A. E. IR-spectra of certain substances and chemical fraction of *Staphylococcus* / A. E. Vershigora, A. A. Averkiev, E. U. Paster [et al.] // Microbiol. J. - Ukrainian. – 1981. - № 43 (4). – P. 482-486.

103. Utkin, D. V. Application methods for spectroscopy and identification pathogens biological agents / D. V. Utkin, V. E. Kuklev, D. V. Erohyn, N. A. Osina // Especially problems hazardous infection. - Russian. – 2011. - № 108. – P. 68-71.
104. Roy, A. A. Growth peculiarities and properties of *Bacillus subtilis* IMV B-7023 cell surface in the medium with glycerophosphate / A. A. Roy, A. S. Gordienko, I. K. Kurdish / Microbiol. J. - Ukrainian. – 2009. - № 71(2). – P. 63-68.
105. Гарбуз, С. А. Подбор оптимальной питательной среды для гомогенного, периодического культивирования *Azotobacter chroococcum* / С. А. Гарбуз, В. Е. Кoryтова // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 12 (54). – Ч. 1. – С. 12-14.
106. Шпольский, Э. В. Атомная физика / Э. В. Шпольский. – М.: Наука, 1974. – Т. 1. – 575 с.
107. Салимов, К. Х. Штамм бактерий *Rhizobiumis* TAAS-80 TJ для приготовления бактериального удобрения / К. Х. Салимов, Ф. Наджмизода // Международная конференция и форум изобретателей Республики Таджикистан. – Душанбе, 2019. - С .139-140.
108. Орлов, Д. С. Гумусовые кислоты почв / Д. С. Орлов. - М.: Изд-во МГУ, 1974. - 334 с.
109. Орлов, Д. С. Влияние молекулярных параметров гуминовых кислот на их физиологическую активность / Д. С. Орлов, В. В. Демин, Ю. А. Загородняя // Почвоведение. - 1997. - № 6. - С. 843-845.
110. Орлов, Д. С. Кинетическая теория гумификации и схема вероятного строения гуминовых кислот / Д. С. Орлов // Научные доклады высшей школы. Биологические науки. - 1977. - № 9. - С. 5-16.
111. Орлов, Д. С. Теоретические и прикладные проблемы химии гумусовых веществ / Д. С. Орлов // Итоги науки и техники ВИНТИ. Почвы и агрохимия. - 1979. - № 2. - С. 58-132.

112. Орлов, Д. С. Практикум по химии гумуса / Д. С. Орлов, Л. А. Гришина. - М.: МГУ, 1981. - 272 с.
113. Орлов, Д. С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации / Д. С. Орлов. - М.: Изд-во МГУ, 1990. - 325 с.
114. Ковалевский, Д. В. Исследование структуры гумусовых кислот методами спектроскопии ЯМР ^1H и ^{13}C : дис. ... канд. хим. наук / Д. В. Ковалевский. - М., 1998. - 140 с.
115. Драгунов, С. С. Химическая природа гуминовых кислот / Гуминовые удобрения. Теория и практика их применения. - Ч. II / С. С. Драгунов. - Киев, 1962. - С. 11-22.
116. Кухаренко, Т. А. О молекулярной структуре гуминовых кислот / Т. А. Кухаренко // Гуминовые кислоты в биосфере. - 1993. - № 4. - С. 27-36.
117. Мистерски, В. Исследование некоторых физико-химических свойств гуминовых кислот / В. Мистерски, В. Логинов // Почвоведение. - 1959. - № 2. - С. 39-51.
118. Комиссаров, И. Д. Структурная схема и моделирование макромолекул гуминовых кислот / И.Д. Комиссаров, Л. Ф. Логинов // Труды Тюменского СХИ. - 1970. - Т. 14. - С. 131.
119. Козарь, Д. Г. Влияние предпосевной обработки семян подсолнечника физиологически активными веществами на качество посевного материала / Гуминовые удобрения. Теория и практика их применения / Д. Г. Козарь. - Днепропетровск, 1973. - Т.4. - С. 139-146.
120. Гуминский, С. Механизм и условия физиологического действия гумусовых веществ на растительный организм / С. Гуминский // Почвоведение. - 1957. - № 12. - С. 12.
121. Гагарин, С. Г. Корреляция физиологической активности и физико-химических свойств гуминовых препаратов / С. Г. Гагарин, И.Н. Екатеринина, Р. Х. Аляутдинова // Почвоведение. - 1991. - № 3. - С. 38-43.

122. Александрова, И. В. Об использовании гумусовых веществ микроорганизмами / И. В. Александрова // Почвоведение. - 1953. - № 6. - С. 680-686.
123. Александрова, Л. Н. Органическое вещество почвы и процессы его трансформации / Л. Н. Александрова. – Л.: Наука, 1980. - 287 с.
124. Бирюков, М. В. Биологическое действие гуминовых кислот и его пространственная локализация в почве: автореф. дис. ... канд. биол. Наук / М. В. Бирюков. - М., 2006. - 24 с.
125. Кросс, А. Введение в практическую инфракрасную спектроскопию / А. Кросс. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1961. – 110 с.
126. Солнцева, Л. С. Методы и приёмы ИК-спектроскопии, применяемые при количественном анализе минеральных объектов / Л. С. Солнцева, Е. В. Лихонина, Б. П. Солнцев. – М.: Недра, 1971. - 216 с.
127. Плюси́на, И. И. Инфракрасные спектры минералов / И. И. Плюси́на. - М.: Изд-во МГУ, 1977. – 175 с.
128. Смит, А. Прикладная ИК-спектроскопия / А. Смит. – М.: Мир, 1982. – 328 с.
129. Добровольская, Т. Г. Методы выделения и идентификации почвенных бактерий / Т. Г. Добровольская, И. Н. Скворцова, Л. В. Лысак. - М.: Изд-во МГУ, 1989. - 71 с.
130. Додзин, М. Е. О возможности управления численностью клубеньковых бактерий в почве / М. Е. Додзин, Л. М. Полянская // Вестник Московского университета. Серия Почвоведение. - 1986. - № 4. – С. 69-71.
131. Скворцова, И. Н. Методы идентификации и выделения почвенных бактерий рода *Bacillus* / И. Н. Скворцова. - М. Изд-во МГУ, 1981. - 77 с.
132. Скворцова, И. Н. Идентификация почвенных бактерий рода *Bacillus*. – Ч. 1 / И. Н. Скворцова. - М.: МГУ, 1983. – 43 с.
133. Скворцова, И. Н. Идентификация почвенных бактерий рода *Bacillus*. – Ч. 2 / И. Н. Скворцова. - М.: МГУ, 1984. – 24 с.

134. Скрыбин, Г. К. Использование микроорганизмов в органическом синтезе / Г. К. Скрыбин, Л. А. Головлева. - М.: Наука, 1976. - 336 с.
135. Young, J. M. Probable synonymy of the nitrogen-fixing genus *Azotobacter* and the genus *Pseudomonas* / J. M. Young, D.-C. Park // *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. - 2007. - № 57. - С. 2894-2901.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в научных журналах, рекомендованных ВАК при Президенте Республики Таджикистан

[1-А]. **Нигораи, З.** Эффекты при взаимодействии малых потоков тепловых нейтронов с веществом / Б. И. Махсудов, З. Нигораи // *Вестник ТНУ. Серия естественных наук*. - 2020. - № 1. - С. 94-106.

[2-А]. **Нигораи, З.** Влияние малых потоков тепловых нейтронов на скорость роста бактерий *Rhizobium IS TAAS-80 TJ* / Б. И. Махсудов, К. Х. Салимов, З. Нигораи // *Доклады НАН Таджикистана*. - 2020. - Т. 63. - № 11-12. - С. 723-726.

[3-А]. **Нигораи, З.** Влияние малых потоков тепловых нейтронов на ИК-спектр бактерий *Rhizobium Phaseoli IS TAAS-80 TJ* и *Bacillus megaterium var. Phoosphaticum* / Б. И. Махсудов, Н. У. Муллоев, З. Нигораи // *Доклады НАН Таджикистана*. - 2021. - Т. 64. - № 7-8. - С. 406-412.

[4-А]. **Нигораи, З.** Влияние тепловых нейтронов на биологическую активность гуминовых кислот / З. Нигораи // *Кишоварз - Теоретический и научно-практический журнал «Земледелие»*. - 2021. - Т. 93. - № 4. - С. 20-24.

Публикации в материалах научных конференций

[5-А]. **Нигораи, З.** Влияние тепловых нейтронов на свойства бактерий *Rhizobium Phaseoli IS TAAS-80 TJ* / Б. И. Махсудов, К. Х. Салимов, З. Нигораи // *Республиканская научно-практическая конференция «Математическое и компьютерное моделирование физических процессов»*. – Душанбе, 2019. - С.108-110.

[6-А]. **Нигораи, З.** Влияние малых потоков тепловых нейтронов на ИК-спектр бактерий *Rhizobium IS TAAS-80 TJ* / Б. И. Махсудов, З. Нигораи // Республиканская научно-практическая конференция «Современные проблемы физики конденсированного состояния и ядерной физики», посвящённая «Двадцатилетию изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования». – Душанбе, 2020. - С. 215-218.

[7-А]. **Нигораи З.** Сравнительный анализ влияния малых потоков тепловых нейтронов на свойства бактерий *Phaseoli* и *Phosphaticum* / Б. И. Махсудов, З. Нигораи // Республиканская научно-теоретическая конференция профессорско-преподавательского состава и сотрудников ТНУ, посвящённая «20-Летию изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования (2020-2040 годы)», 2020. - Т. 1. - С. 64.

[8-А]. **Нигораи, З.** Сравнительное изучение влияния малых потоков тепловых нейтронов на скорости активации бактерий *Rhizobium IS TAAS-80TJ* и *Phosphospatium* / Б. И. Махсудов, З. Нигораи // Международная научно-практическая конференция «Проблемы и перспективы физики, техники и технологии полупроводников» в честь объявления 2020-2040 гг. «Двадцатилетием изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования». – Худжанд: Изд-во Нури маърифат, 2021. - С. 144.

[9-А]. **Нигораи, З.** Влияние малых потоков тепловых нейтронов на ИК-спектр бактерий *Rhizobium phaseoli IS TAAS-80TJ* и *Phosphaticum* / Б. И. Махсудов, Н. У. Муллоев, З. Нигораи // Симпозиум физиков Таджикистана, посвящённый 85-летию академика Р. Марупова. – Душанбе, 2021. - С. 68-72.

[10-А]. **Нигораи, З.** ИК-спектроскопическое исследование бактерий / Б. И. Махсудов, Н. У. Муллоев, З. Нигораи // Республиканская научно-теоретическая конференция профессорско-преподавательского состава и сотрудников ТНУ, посвящённой «20-Летию изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования» (2020-2040). – Душанбе, 2021. - Т. 1. - С. 155-157.