



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет»

Факультет прикладной математики и механики  
Направление 12.03.03 Фотоника и оптоинформатика  
Профиль Волоконная оптика  
Кафедра Общая физика

Зав. кафедрой общей физики  
доктор физ.-мат. наук, доцент

\_\_\_\_\_ А.В. Перминов  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
на соискание академической степени бакалавра

На тему Изучение влияния на растения света с различными параметрами

Студент \_\_\_\_\_ М. В. Глазова

**Состав ВКР:**

1. Пояснительная записка на 63 стр.

Руководитель ВКР, д. ф.-м.н.

\_\_\_\_\_ А.В. Перминов

Пермь 2020 г.

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет»**

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ  
«УТВЕРЖДАЮ»  
Зав. кафедрой  
доктор физ.-мат. наук, доцент

\_\_\_\_\_ А.В. Перминов  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

**З А Д А Н И Е**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы бакалавра**

Фамилия, И.О. \_\_\_\_\_ Глазова Мария Владимировна \_\_\_\_\_  
Факультет прикладной математики и механики \_\_\_\_\_ Группа ФОР-16 \_\_\_\_\_  
Начало выполнения работы 18.05.2020 \_\_\_\_\_  
Контрольные сроки просмотра работы кафедрой \_\_\_\_\_ 22.06.2020 \_\_\_\_\_  
Защита работы на заседании ГЭК 23.06.2020 \_\_\_\_\_

1. Наименование темы: **ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ НА РАСТЕНИЯ СВЕТА С РАЗЛИЧНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ.**

2. Целевая установка и исходные данные к работе.

Изучение основных характеристик излучения. Изучение полученных экспериментальных данных в статьях А.В. Будаговского. Сбор экспериментальной установки для проведения экспериментов по облучению плодов зерновых культур. Сравнительный анализ полученных данных.

3. Содержание пояснительной записки:

Введение

1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

- 1.1 Влияние длины волны излучения на растения. Криптохромы и фитохромы
- 1.2 Инфракрасное излучение
- 1.3 Дистанционное межклеточное взаимодействие и лазерное облучение
- 1.4 Влияние плотности мощности и длительности воздействия на рост растений
- 1.5 Влияние степени когерентности на рост и развитие растений
- 1.6 Биоритмы

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТА

3. МЕТОДИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

- 3.1 Исследование влияния излучения He-Ne лазера на зерновые культуры

3.2 Исследование влияния излучения He-Ne лазера на зёрна льна при помощи усовершенствованной экспериментальной установки (с рассеивающей линзой)

3.3 Исследование влияния излучения Yb лазера на зерновые культуры

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

4. Перечень графического материала:

- Описание He-Ne и Yb лазеров;
- Схема экспериментального рабочего места для проведения экспериментов по облучению зёрен;
- Таблицы с экспериментальными данными;
- Экспериментальные графики.

5. Основная литература:

- А.В. Будаговский, Н.В. Соловых, О.Н. Будаговская. Реакция растительных организмов на воздействие квазимонохроматического света с различными длительностью, интенсивностью и длиной волны. – Квантовый электроник, 2015, 45, №4, с. 345 – 350
- А. В. Будаговский. Дистанционное межклеточное взаимодействие. – М.: НПЛЦ «Техника», 2004. – 104 с.
- А.В. Будаговский, Н.В. Соловых, О.Н. Будаговская. Реакция растительных организмов на воздействие квазимонохроматического света с различными длительностью, интенсивностью и длиной волны. – Квантовый электроник, 2015, 45, №4, с. 345 – 350
- А. В. Будаговский. О способности клеток различать когерентность оптического излучения. – Квантовая электроника, 2005, т. 35, №4, с. 369-374.
- А. В. Будаговский. Фоторегуляторное действие когерентного света. – Плодоводство и ягодоводство России, 2012, т. 33, с. 53-60.

Руководитель выпускной квалификационной работы бакалавра

Зав. кафедрой ОФ, доктор физ.-мат. наук, доцент \_\_\_\_\_ А.В. Перминов  
(должность, уч. степень, подпись)

Задание получил \_\_\_\_\_ М.В. Глазова  
(дата и подпись студента)

## РЕФЕРАТ

М.В. Глазова. Изучение влияния на растения света с различными параметрами. Выпускная квалификационная работа бакалавра по направлению 12.03.03 – «Фотоника и оптоинформатика», профиль «Волоконная оптика». Пермь: ПНИПУ, 2020. – 55 с.

Выпускная квалификационная работа бакалавра посвящена изучению влияния излучения на зерновые культуры в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Полученные данные исследования необходимы для дальнейшей разработки оборудования, улучшающего урожайность зерновых культур, при помощи досветки на всех этапах развития растений. Исследованы параметры лазерного излучения, которые наилучшим образом влияют на рост и развитие растений.

Библ.: 6 назв., табл. 19, рис. 25.

*Ключевые слова и словосочетания:* агрофизика, лазерное облучение, функциональная активность, действие света на растения, межклеточное взаимодействие, когерентное излучение, ростовые реакции, фитохромный процесс, криптохромный процесс, плотность мощности излучения, длительность воздействия на растения.

## Содержание

ВВЕДЕНИЕ .....	6
1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР .....	8
1.1 Влияние света различных длин волн на растения. Криптохромы и фитохромы.....	8
1.2 Инфракрасное излучение ближнего диапазона и его влияние на растения .....	12
1.3 Дистанционное межклеточное взаимодействие и лазерное облучение.....	16
1.4 Влияние плотности мощности и длительности воздействия на рост растений.....	18
1.5 Влияние степени когерентности на рост и развитие растений .....	20
1.6 Биоритмы.....	26
2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТА. ....	30
3. МЕТОДИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ .....	34
3.1 Исследование влияния излучения He-Ne лазера на зерновые культуры....	34
3.2 Исследование влияния излучения He-Ne лазера на зёрна льна при помощи усовершенствованной экспериментальной установки (с рассеивающей линзой).....	44
3.3 Исследование влияния излучения Yb лазера на зерновые культуры.....	52
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	60
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	61

## ВВЕДЕНИЕ

В наши дни фотоника – это приоритетное направление развития науки и техники во всех ведущих странах мира, так как она – ключевой элемент в решении многочисленных задач. Фотоника проникает во все сферы деятельности, что приводит к разработке новых технологий создания оптических материалов, открытия новых оптических явлений. Но, несмотря на это, значительный прогресс в развитии и использовании фотоники можно наблюдать последние несколько лет [1].

Живая материя в природе давно использует солнечную энергию, обеспечивая жизнедеятельность биологических объектов.

Свет – важнейший фактор для фотосинтеза и развития живых организмов. Свет оказывает влияние на рост, развитие, плодоношение, морфологию (фотоморфогенез), направление роста (фототропизм) и даже стрессоустойчивость растений. Управляя параметрами и характеристиками света, существует возможность оказывать влияние на вышеперечисленные качества растений.

Основными характеристиками света, определяющими влияние на развитие биологических организмов, являются: спектральный состав, интенсивность, когерентность, изменение спектрального состава в соответствии с суточной и сезонной динамикой. Всё это необходимо учитывать при подборе источников искусственного излучения для живых организмов. Именно агробιοфотоника изучает взаимодействие света и биообъектов.

Агробιοфотоника является направлением с применением светодиодных технологий, поскольку в светодиодной светотехнике накоплен огромный опыт разработки различных облучателей и источников излучения [2].

Цель настоящей работы состояла в исследовании влияния света на зерновые культуры (пшеница, овёс, лён) со следующими контролируруемыми параметрами:

- спектр излучения
- интенсивность излучения
- плотность мощности излучения
- когерентность
- длительность воздействия

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- Анализ научной литературы по заданной тематике
- Сбор экспериментальной установки для облучения зёрен
- Облучение зёрен излучением с разной длительностью
- Обработка результатов эксперимента на основе научной литературы

На начальном этапе работы будут проведены эксперименты по облучению зёрен когерентным источником излучения (гелий-неоновым лазером с длиной волны 632.8 нм). Далее будет проведён сравнительный анализ полученных результатов. Если результаты эксперимента будут коррелировать с результатами экспериментов А.В. Будаговского, описанных в статье [3], то следующим этапом будет облучение зёрен излучением с инфракрасным спектром (ИК) с использованием иттербиевого (Yb) лазера.

Научная новизна работы заключается в том, что при облучении ИК излучением вся энергия, выделяемая в этом процессе тратится на теплоту (нагревание), но при этом на рост и развитие растений влияет полный спектр излучения от ультрафиолета до инфракрасного.

## **1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР**

### **1.1 Влияние света различных длин волн на растения. Криптохромы и фитохромы.**

В начале XX века уже начали проводить исследования влияния различных частей спектра на развитие и рост растений. В последние десятилетия изучение этого вопроса набирает обороты, в связи с развитием светодиодной индустрии

Свет для растений - это не только источник энергии. Различное влияние света с разным спектральным составом на биообъекты - экспериментально подтвержденный факт.

Выяснилось, что на растения так или иначе влияют все части спектра. Так, например, ультрафиолет (200 - 315 нм) – вредит растениям, может быть причиной увядания, однако ультрафиолет на длине волны 315 – 380 нм, при коротком воздействии положительно влияет на растения, вызывая рост, цветение и плодоношение многих видов растений. Процесс поглощения хлорофиллом начинается в видимом спектре на длине волны 380 – 400 нм, на длине волны 430 – 480 нм наблюдается первый пик поглощения хлорофиллом, что оказывает сильное влияние на фотосинтез. Хлорофилл – пигмент, центральная молекула, где начинается процесс превращения солнечной энергии в энергию химических соединений. У высших зелёных растений различают хлорофиллы а (имеет сине-зелёный оттенок) и хлорофилл b (жёлто-зелёный оттенок). В молекуле хлорофилла а во втором пиррольном кольце содержится метильная группа, а в молекуле хлорофилла b в том же кольце содержится альдегидная группа [4]. Молекула хлорофилла избирательно поглощает кванты света, максимумы поглощения наблюдаются в красном и сине-фиолетовом участке спектра (рис. 1).



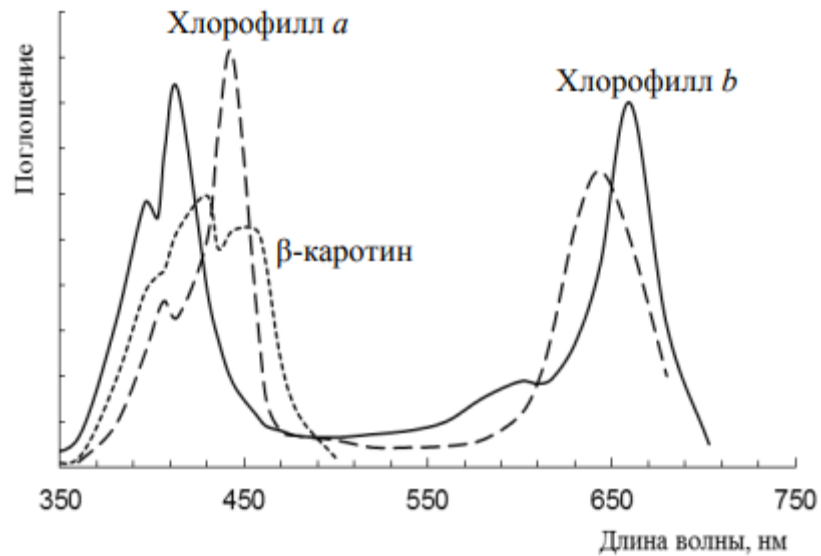


Рис. 1 – Спектры поглощения молекулы хлорофилла

Согласно принципу Паули, электроны невозбуждённой молекулы хлорофилла находятся в основном синглетном состоянии  $S_0$ . Поглощая квант света, молекула хлорофилла переходит в возбуждённое состояние, а её электроны переходят на более высокий энергетический уровень – это называется синглетным возбуждением состояния и обозначается  $S^*$ . Квант красного света переводит электрон на уровень  $S_1^*$ , а квант синего света, обладая большей энергией, переводит электрон на уровень  $S_2^*$  (рис. 2)

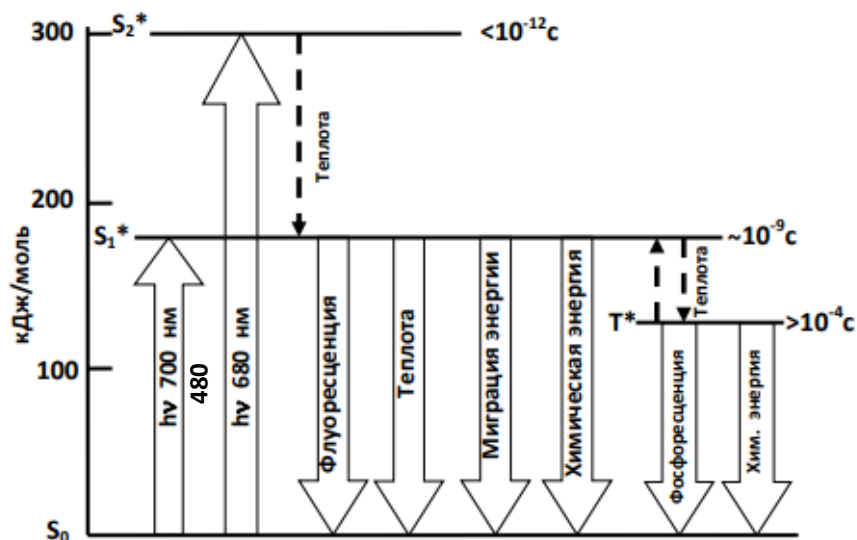


Рис. 2 – Энергетические уровни молекулы хлорофилла

Так как возбуждённая молекула хлорофилла стремится вернуться в основное состояние, в силу своей нестабильности, то полученный избыток энергии может выделиться в виде тепла, испустить квант света (флуоресценцировать - светиться), или быть использованным в фотохимической работе [5].

Излучение, относящееся к зелёному, жёлтому и оранжевому спектрам (500 – 610 нм) слабо влияют на растения. Второй пик поглощения хлорофиллом находится в красном спектре (610 – 720 нм), что оказывает сильное влияние на фотосинтез, стимулирует цветение и плодоношение. Следующая часть спектра (инфракрасное излучение, далее ИК) слабо влияет на растения, в некоторых случаях наблюдается всхожесть и цветение (дальний красный спектр), так как вся энергия, поглощаемая на этом уровне, преобразуется в тепло (рис. 3) [6].

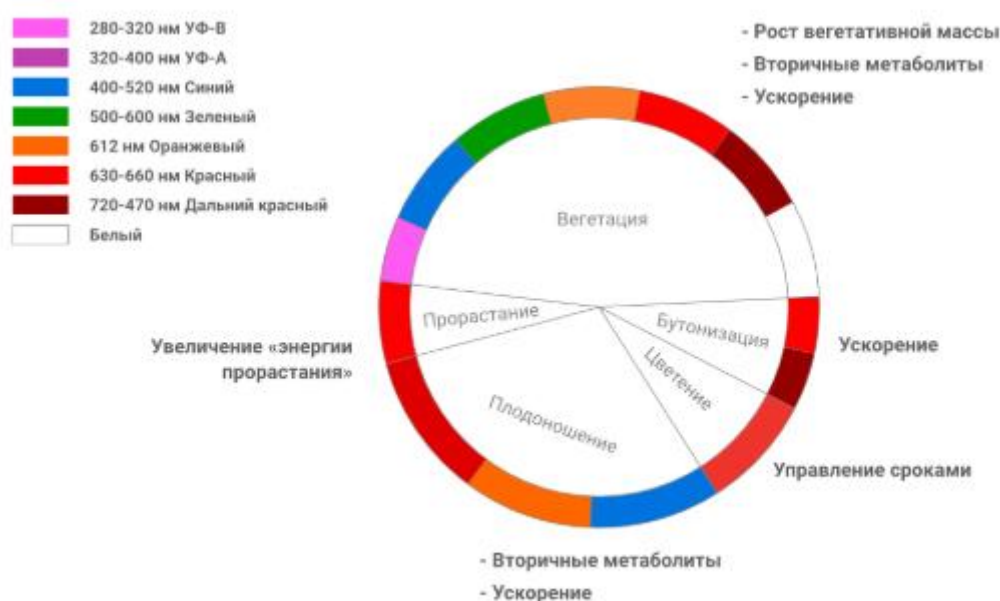


Рис. 3 - Влияние света с различными длинами волн на жизненный цикл растения

Криптохромы и фитохромы – классы светочувствительных белков, которые позволяют воспринимать синий и ультрафиолетовый свет (криптохромы), красный и дальний красный (фитохромы).

Фитохром – (состоит из двух частей: хромофора, который поглощает свет и белковой основы) белок, который содержит билиновый хромофор – жёлчный пигмент. Фитохром может находиться в двух состояниях: в активном и пассивном, и в соответствии с этим, он может либо запускать, либо блокировать различные физиологические процессы.

Фитохром играет важную роль в процессе цветения и роста семян, так же он помогает устанавливать циркадные ритмы – циклические колебания биологических процессов, регулирует размер, форму, количество листьев и синтез хлорофилла. В активном состоянии фитохром имеет максимум поглощения на  $\lambda = 730_{нм}$ , а в пассивном на  $\lambda = 660_{нм}$ . Обе эти формы могут легко переходить друг в друга [7].

Криптохром – этот белок играет главную роль на изменение направления роста органов растения – фототропизм. Рецептор, благодаря которому при облучении синим светом идёт усиление ряда физиологических реакций у растений. Криптохромы воспринимают сигнал в диапазоне от синего до ультрафиолетового (УФ) излучения. В составе молекулы этого рецептора есть два хромофора – флавиновой и птериновой природы. В светлое время суток в хромофоре идёт реакция переноса электрона. Она меняет конформацию рецептора, запуская сигнальный каскад [8]. При освещении листьев синим светом – увеличивается апертура устьиц – образование эпидермиса растений, что ведёт к росту листьев, раскрытию части эмбриона в семени растения – семядолей, а так же в циркадных ритмах.

## 1.2 Инфракрасное излучение ближнего диапазона и его влияние на растения

Инфракрасное излучение – это поток материальных частиц, которые обладают волновыми и квантовыми свойствами. Длина волны ИК излучения лежит в диапазоне от 0.74 – 2000 мкм. ИК диапазон условно подразделяют на:

- ближний (0.74 – 2.5 мкм)
- средний (2.5 – 50 мкм)
- дальний (50 – 2000 мкм)

ИК излучение называют тепловым, в связи с тем, что такое излучение воспринимается как ощущение тепла. ИК лучи хорошо поглощаются водой.

Биологическое воздействие ИК излучение определяется нагревом тканей. Повышение температуры стимулирует деятельность клеток, тем самым ускоряя их размножение и процессы обмена (рис. 4).

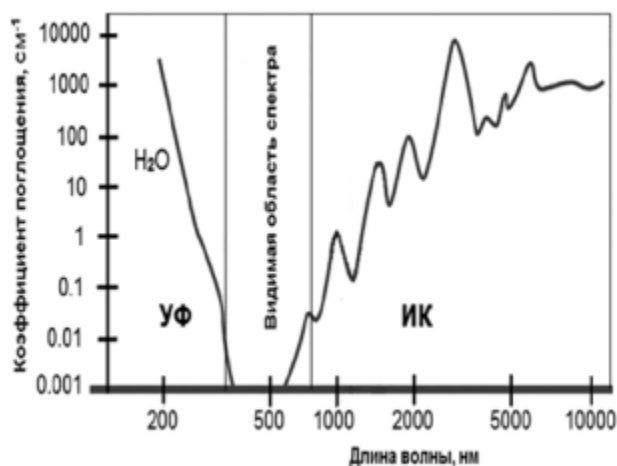


Рис. 4 – Спектр поглощения воды на различных диапазонах длин волн

Из всего спектра человеческий глаз способен улавливать излучение в узком диапазоне видимого света. Разные длины волн видимого излучения человеческий глаз воспринимает как разные цвета. Отправляясь в длинноволновую область спектра, мы попадаем в диапазон ИК излучения. Ближнее ИК излучение хоть и не

воспринимается сетчаткой глаза, но физических отличий от видимого излучения не имеет. С увеличением длины волны атмосфера становится прозрачной для ИК излучения. Это связано с колебательно-вращательными полосами поглощения молекул. Каждая молекула имеет свой набор энергий, которые могут запасаться в виде колебательных и вращательных движений. В свою очередь инфракрасное имеет такие свойства, как:

1. Проходит через некоторые непрозрачные тела;
2. Производит химическое действие на фотопластинки;
3. Поглощаясь веществом, нагревает его;
4. Вызывает внутренний фотоэффект у германия;
5. Нельзя увидеть органами чувств, в отличие от видимого излучения;
6. Способно к явлениям интерференции и дифракции. [9]

Спектры ИК излучения могут быть:

1. Линейчатыми (атомные);
2. Непрерывными (конденсированные среды);
3. Полосатыми (молекулярные среды)

Некоторые вещества, прозрачные для видимого излучения, непрозрачны для ИК излучения, например слой воды в несколько сантиметров. А вот пластинки из Ge и Si в сравнении с видимым излучением, прозрачны для ИК излучения определённых длин волн. Отражательная способность металлов в ИК излучении значительно выше, нежели в видимом.

При прохождении ИК излучения через атмосферу, оно ослабляется вследствие рассеяния и поглощения молекулами воздуха (азот, кислород). Молекулы  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $O_3$ , избирательно поглощают ИК излучение (рис. 5) [10,11].

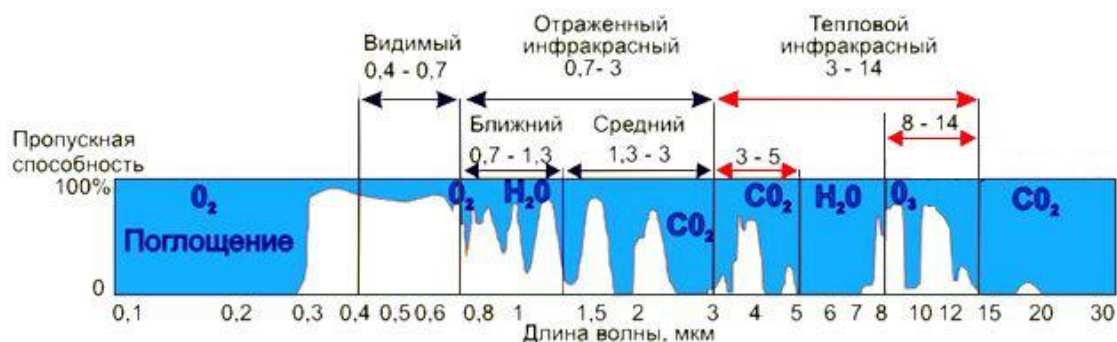


Рис. 5 - Спектр поглощения ИК излучения молекулами H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>

В дальнейшем, при упоминании ИК излучения, будет иметься в виду ближний ИК диапазон длин волн от 700нм до, максимум, 2000нм. Кроме того, будет иметься в виду когерентное (относительно естественного света) излучение со спектральной шириной в единицы и десятки нанометров.

В статье А.В. Будаговского [3] проводился эксперимент по облучению зёрен пшеницы полупроводниковым лазером на длине волны 850 нм. В результате чего, он пришёл к выводу, что наблюдается линейная зависимость коэффициента стимуляции от длительности облучения, однако эксперимент не подтвердил, что в более длинноволновой области, где поглощение излучения цитозолем выше, стимуляционный эффект усиливается.

В свою очередь, Волончук С.К. основываясь на отечественных и зарубежных работах, привёл теоретическое обоснование воздействия ИК излучения на материал для интенсификации внутреннего тепло-массообмена в процессе сушки. Было замечено, что малая мощность ИК излучения при росте длительности облучения увеличивает производительность испарения влаги [12].

Анализируя статьи на тему воздействия ИК излучения на рост и развитие растений, можно прийти к выводу, что данная тема изучена в малом объёме. Как таковой информации и экспериментов, подтверждающих развитие растений при облучении, не наблюдается. Однако тезисно выделено, что ИК излучение

приводит к локальному нагреву молекул воды в растении и появлению отклика, в виде стимуляции процесса деления клетки, влияющее на развитие растения.

### **1.3 Дистанционное межклеточное взаимодействие и лазерное облучение**

Как и все живые организмы на планете, клетки растений обладают возможностью дистанционного взаимодействия между собой. Впервые нехимическое дистанционное межклеточное взаимодействие (ДМВ) было обнаружено А. Г. Гуревичем, который проводил опыт с корешками лука. В результате, было сделано предположение о регуляторной роли оптического диапазона излучения в процессе деления клеток. Далее, рядом научных деятелей так же были проведены исследования в этой области. В 1989 году Чернов и Якобенчук исследовали предпосевную лазерную обработку семян. Из результатов, был сделан вывод, что после облучения семян, во время их «отлёжки», возникает вторичное излучение с достаточно высокой степенью статистической упорядоченности, которое спровоцировано когерентной накачкой. Позднее, В. П. Казначеев и его сотрудники проводили исследование с «зеркальным цитопатическим эффектом», благодаря которым, был выявлен механизм ДМВ. По мнению авторов, механизм связан с клеточной генерацией электромагнитного излучения. Во всех проведённых исследованиях был подтверждён факт существования ДМВ, а его поле является низкоинтенсивным излучением оптической спектральной области. Нехимическая природа ДМВ подтверждается экспериментами, где были устранены или скомпенсированы дистанционные передачи химических сигналов [13].

Таким образом, кратковременное воздействие лазерного излучения при определённых условиях на растения повышает эффективность дистанционного межклеточного взаимодействия [14].

В своих работах Т.Й. Кару [15, 16] описывает фоторегуляторное действие лазерного (квазимонохроматического) излучения в координатах «доза-эффект», а реакции, наблюдаемые в этом процессе, обозначают как дозозависимые, на основании того, что величина биологического эффекта изменчива в зависимости



от различных доз. Сама доза облучения определяется как произведение мощности воздействия излучения на его длительность.

## 1.4 Влияние плотности мощности и длительности воздействия на рост растений

В научных трудах, А. В. Будаговский произвёл оценку влияния длительности облучения и плотности мощности на реакции биосистем, используя высококогерентное излучение (гелий-неоновый лазер с длиной волны 632,8 нм). Эксперимент по исследованию влияния плотности мощности излучения проводился на пыльце вишни, так как именно она даёт быстрый ответный отклик. Для облучения использовали матрицу содержащую 11 вариантов плотности мощности (0.5, 1 – 10 Вт/м<sup>2</sup>) и 9 вариантов длительности воздействия излучения (0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 12, 16, 24 мин). Оценка проводилась исходя из доли проросших пылевых зёрен облученной группы в зависимости от контрольной. Было обнаружено, что зависимость прорастания зёрен от длительности облучения имеет многоэкстремальную форму, практически неизменную в изучаемом диапазоне плотностей мощности (рис. 6). При увеличении интенсивности светового потока экстремумы смещались в область с меньшей длительностью облучения

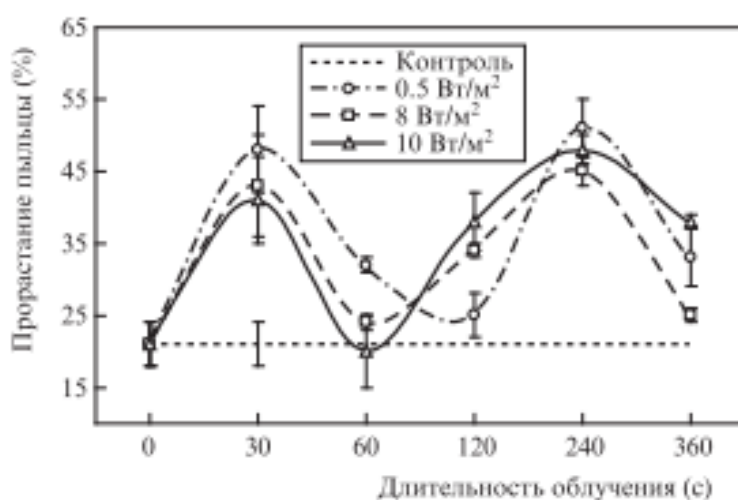


Рис. 6- Зависимость прорастания зёрен пылевых от длительности облучения с различными плотностями мощности

Однако, при фиксации длительности облучения, при любом увеличении плотности мощности, было слабое влияние на изменение оценочного признака. Несмотря на это пренебрегать величиной плотности мощности нельзя. Данный вывод был сделан исходя из результатов облучения пыльцы, когда доза интенсивности увеличилась в 16 раз (рис. 6). Такое варьирование приводило к появлению новых экстремумов и к смещению пиков стимуляции.

Эксперимент по исследованию влияния длительности облучения проводили на семенах ячменя при помощи гелий-неонового лазера. Среднюю плотность мощности выбирали  $0.25 \text{ Вт/м}^2$ , а длительности облучения были 0.05, 0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 12, 16, 24, 32, 48, 64, 120, 240 с. В результате, наблюдалась многомодальная (имеющая много экстремумов) зависимость прорастания от длительности облучения (рис. 7). При фиксации плотности мощности излучения одинаковый фотоиндуцированный эффект был получен при длительности облучения 0.5, 6, 12, 64 и 240 с, при которых энергия прорастания достигла 66-67% [17].

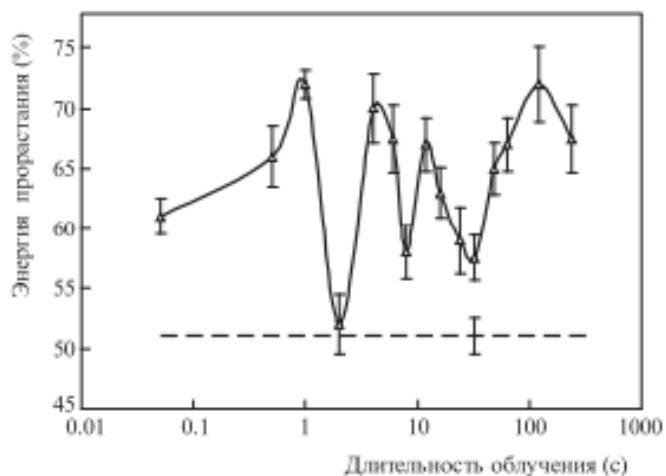


Рис. 7 – Зависимость прорастания ячменя от длительности облучения при постоянной плотности мощности =  $0.25 \text{ Вт/м}^2$ . Пунктиром обозначены результаты контрольной группы

## 1.5 Влияние степени когерентности на рост и развитие растений

Когерентность – согласованность колебательных или волновых процессов во времени, которая проявляется при их сложении. Таким образом, можно утверждать, что в различных точках пространства волны осцилляцией происходят синхронно (разность фаз между этими точками не зависит от времени) [18].

Когерентность может быть временной и пространственной. При рассмотрении спектра излучения реальных источников наблюдается ограниченность использования монохроматической идеализации, что вынуждает изучить характер интерференционных явлений в квазимонохроматическом свете. Интерференционные полосы наиболее отчетливо видны при условии, когда длины путей обеих интерферирующих волн одинаковы. А увеличение оптической разности хода сначала приводит к ухудшению контрастности полос, а далее к их исчезновению. Введение определения оптической разности хода тождественно задержке одной из волн по времени, а способность колебаний к интерференции после разделения исходной волны, и последующего соединения исходной волны, называется временной когерентностью. Максимальная разность хода, при которой возможна интерференция, называется длиной когерентности излучения, а время на прохождение длины когерентности называется временем когерентности [19].

$$\tau_{\text{ког}} = \frac{\ell_{\text{ког}}}{c} \quad (1)$$

Условие временной когерентности световых колебаний:

$$\Delta < \ell_{\text{ког}} = c\tau_{\text{ког}} \quad (2)$$

Понятие временной когерентности связано с не строгой монохроматичностью интерферирующих волн. Это следует из того факта, что ширина спектральной линии любого источника света конечна. Такое излучение можно рассматривать как совокупность некоррелированных между собой отдельных монохроматических волн, частоты которых заполняют интервал  $\delta\omega$ ,

малый в сравнении со средней частотой спектральной линии  $\omega$ . Каждая квазимонохроматическая волна создаёт свою картину полос при сложении в интерферометре. Если разность хода интерферирующих волн малая, положение полос в картинах одинаково, следовательно полосы видны отчетливо. При увеличении разности хода в связи с различием длинам волн, происходит смещение полос относительно друг друга, что ведёт к размытию общей картины. Оценивая разность хода складываемых волн, когда происходит исчезновение интерференционных полос, получаем связь ширины спектра и времени когерентности:

$$\tau_{\text{ког}} \approx \frac{2\pi}{\delta\omega} = \frac{1}{\delta\nu} = \frac{\lambda^2}{c\delta\lambda}, \quad (3)$$

а для длины когерентности получаем:

$$\ell_{\text{ког}} = c\tau_{\text{ког}} = \frac{c}{\delta\nu} = \frac{\lambda^2}{\delta\lambda}, \quad (4)$$

где  $\lambda, \nu$  длина и частота волны,  $c$  - скорость света [20, 21].

При описании интерференционных явлений первичный источник предполагается точечным, но реальные источники имеют конечные размеры. При увеличении размера источника ухудшается контрастность интерференционных полос и даже приводит к их полному исчезновению.

Пусть имеется источник  $S$ , состоящий из двух точечных источников  $S_1$  и  $S_2$  и он виден под углом  $\varphi$  из точки, где происходит деление лучей исходной волны. На рис. 8 показан источник и щель, через которую проходит свет, угол  $\varphi$  мал. Из-за конечных размеров источника свет имеет разброс по волновым векторам  $\bar{k}$ , после первой щели свет падает на две щели, от которых далее можно наблюдать интерференцию. В таком случае, максимумы от разных  $\bar{k}$  будут расположены в разных местах, из-за разброса по волновым векторам (рис. 8).

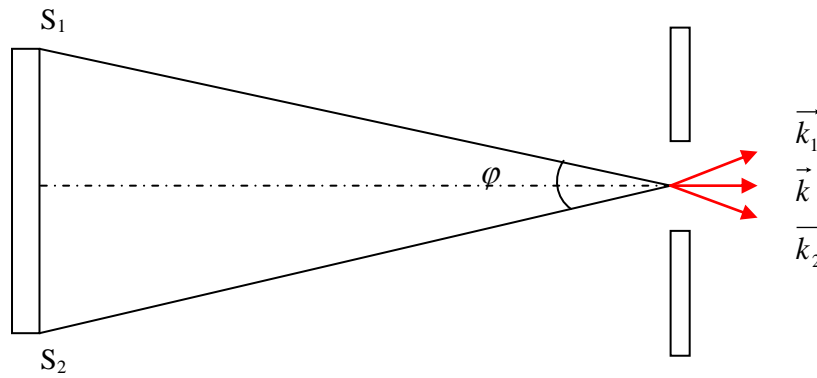


Рис. 8 – Протяжённый источник, все участки которого излучают волны

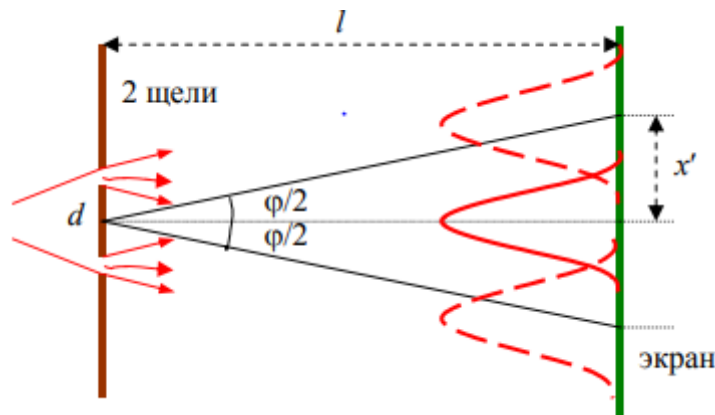


Рис. 9 – Интерференционная картина монохроматического излучения, прошедшего через две щели

Пусть  $x$  – расстояние между максимумами (рис. 9), если оно значительно меньше ширины интерференционной полосы, то интерференция видна на экране. Если  $x \sim \Delta x$ , то максимум накладывается на минимум и интерференция не видна. Таким образом, условие для интерференции имеет форму:

$$x \leq \Delta x \text{ или } l \cdot \frac{\varphi}{2} \leq l \cdot \frac{\lambda}{d}, \quad (5)$$

тогда для угла разделения получаем:

$$\varphi \leq \frac{\lambda}{d} \quad (6)$$

Следовательно, чтобы улучшить условия интерференции нужно:

$$d < \frac{\lambda}{\varphi} \quad (7)$$

Если расстояние между точками на волновой поверхности меньше  $d$  они когерентны, следовательно, радиус когерентности:

$$\rho_{\text{ког}} \sim \frac{\lambda}{\varphi} \quad (8)$$

Таким образом, для получения интерференционной картины от двух источников недостаточно чтобы эти источники состояли из когерентных во времени точечных источников. Два источника, размеры и расположение которых позволяют наблюдать интерференционную картину, называют пространственно когерентными [22].

Было доказано, что при фотосинтезе работают квантовые эффекты. Энергия поглощенного фотона, которая порождает электронное возбуждение, находящееся вдали от реакционного центра (далее РЦ), достаточно быстро передаётся в РЦ фотосистемы. Данный процесс работает за счет квантовой когерентности промежуточных возбуждений. Перед фотосистемой появляется задача по передаче электронного возбуждения от точки поглощения кванта света к точке передачи энергии в РЦ. Первоначальное возбуждение делокализуется, одновременно идёт по нескольким путям, и в конце вновь собирается в единое возбуждение на нужной молекуле [23, 24].

В своих трудах А. В. Будаговский сделал выводы, которые характерны для выполнения биорегуляторных функций слабых световых сигналов:

1. Клетки генерируют когерентные фотоны;
2. Клетки различают когерентность света;
3. В биоструктурах распространение когерентных волн происходит без потери статистической упорядоченности.

В первом случае проводили эксперимент с кровью человека, выступающей в роли индуктора, и семенами редиса, выступающего в роли детектора. О результатах межклеточного взаимодействия судили по длине проростков, подверженных эксперименту, и контрольной группы. В каналах дистанционного межклеточного взаимодействия, где стохастический фазовый экран снижал пространственную когерентность, наблюдалась меньшая величина реакции биодетектора, нежели в канале, где фазовый экран был упорядочен.

Второй вывод был сделан на основе эксперимента, где участвовала динамическая система «хозяин-паразит». В качестве системы использовали плоды яблони, на поверхности которых находились споры патогенных грибов. Плоды подвергали кратковременному воздействию когерентного излучения, используя гелий – неоновый лазер, и излучению с низкой когерентностью с помощью лампы накаливания. Энергетические параметры обоих источников были одинаковыми. Критерием оценки считали наличие видимых симптомов поражения грибковым заболеванием.

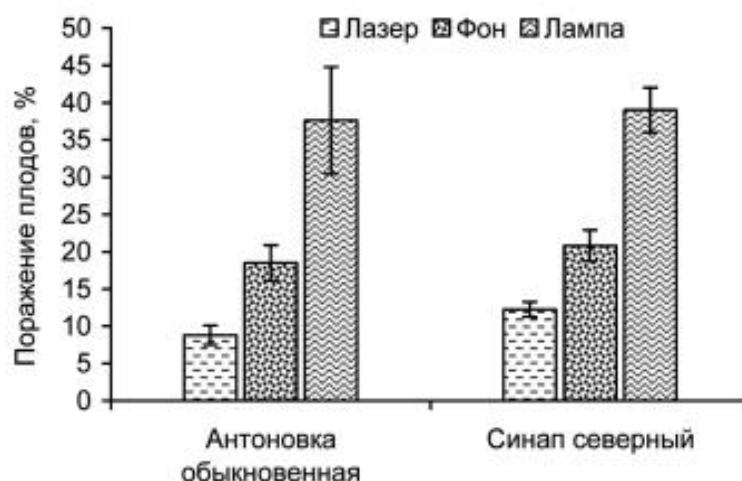


Рис. 10 – Реакция системы «хозяин-паразит» после облучения с разной степенью когерентности

Из эксперимента (рис. 10), было выявлено, что свет лампы накаливания стимулирует только мелкие клетки паразита, что вызывает больший масштаб поражения плодов, в отличие от контрольной группы. В свою очередь лазерное



излучение, наоборот, активизирует иммунные клетки «хозяина» - в данном случае плодов яблони, что приводит к подавлению патогенной инфекции [25]

Третий вывод был сделан в результате проведения исследования по измерению степени пространственной когерентности зондирующего лазерного пучка (ЗЛП), который рассеивается тканью плодов с различной толщиной: в первом случае – яблоком, во втором – огурцом (рис. 11)

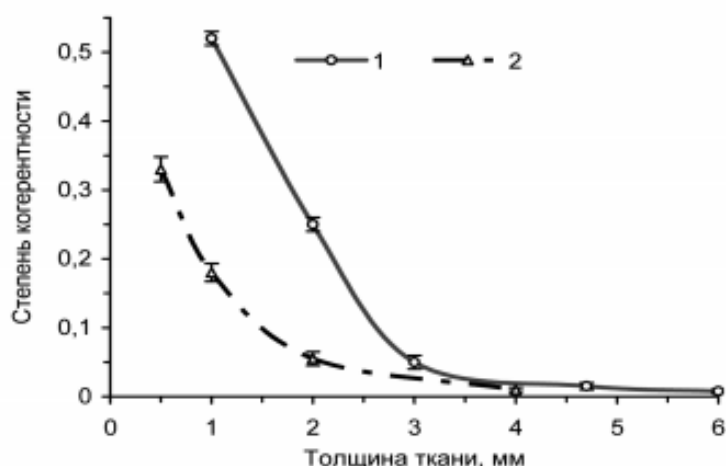


Рис. 11 – Изменение степени когерентности ЗЛП, рассеянного тканью: 1 – яблок, 2- огурцов

Исследования показали, что реакция клеток зависит от статистической упорядоченности излучения, действующего на них [25]. То есть, для клеток растений физиологически значимыми являются как временная, так и пространственная когерентность. То есть фотоиндуцированная реакция сильнее выражается тогда, когда в большом объёме клеток имеет место корреляция фаз фотонов [26].

Свойство реакции живых организмов на когерентность лежит в основе лазерной стимуляции и является перспективным направлением в разработке лазерных агробιοтехнологий.

## 1.6 Биоритмы

Биологические ритмы - периодически повторяющиеся изменения характера и интенсивности биологических процессов и явлений. Биологические уровни делятся на физиологические и экологические, последние по длительности совпадают с каким-либо естественным ритмом окружающей среды. Биологические ритмы описаны на всех уровнях, начиная от простейших биологических реакций в клетке и заканчивая сложными поведенческими реакциями. Следовательно, живой организм – это совокупность многочисленных ритмов с различными характеристиками.

Центральное место среди ритмических процессов занимает циркадный ритм. Понятие циркадианного (околосуточного) ритма введено Халбергом в 1959 году. Он является видоизменением суточного ритма с периодом 24 часа, протекает в постоянных условиях и принадлежит к свободно текущим ритмам. Это ритмы с не навязанным внешними условиями периодом. Они обусловлены свойствами самого организма. Период циркадных ритмов длится у растений 23-28 часов, у животных 23-25 часов. Так как организмы находятся в среде с циклическими изменениями её условий, ритмы организмов становятся суточными.

Так же, от земного суточного ритма зависит обмен веществ в растениях – поглощение днём углекислоты и отдача в ночное время суток кислорода.

Установлена зависимость суточной периодики, присущей растениям, от фазы их развития. В коре молодых побегов яблони был выявлен суточный ритм содержания биологически активного вещества флоридзина, характеристики которого менялись соответственно фазам цветения, интенсивного роста побегов и т. д. Одно из наиболее интересных проявлений биологического измерения времени — суточная периодичность открывания и закрывания цветков у растений.

Растения «просыпаются» и «засыпают» в определённое время суток, к примеру, цикорий расправляет цветки в 4 часа утра, одуванчик в 6 часов утра, а вот «засыпает» одуванчик в 12 часов дня, а шиповник в 20 часов вечера.

Зависимость цветения растения от отношения светлой части суток к тёмной (фотопериод), называется фотопериодизмом. Данное явление было открыто в 1920 году американскими учеными В. Гарнером и Г. Алардом, при исследовании цветения табака. В соответствии с этим были выделены следующие группы растений:

- Короткодневные растения (далее КДР) – по мере сокращения фотопериода (соотношения дня к ночи) с 14-16 до 8-12 часов, ускоряется переход к фазе цветения (соя, кукуруза).
- Длиннодневные растения (далее ДДР) – по мере увеличения фотопериода с 10-12 до 16-18 часов, ускоряется переход к фазе цветения, а при непрерывном освещении, процесс цветения наступает еще быстрее (пшеница, горчица, овёс).
- Нейтральнодневные растения (далее НДР) – не зависят от продолжительности соотношения светлых и тёмных суток (фасоль, томат).
- Длиннокороткодневные (далее ДКДР) – для перехода к фазе цветения требуют воздействие длинного дня, а далее короткого (цветут осенью: космея, астра).

Короткодлиннодневные (далее КДКР) – для перехода к фазе цветения требуют сначала воздействия короткого дня, а затем длинного (цветут летом: пеларгония, колокольчик) [27].

Восприятие продолжительности светлых и тёмных суток происходит в листовой пластине. В своих опытах с исследованием цветения хризантемы крупноцветковой М.Х. Чайлахян установил, что в условиях выращивания на длинном 16-часовом дне хризантема вегетирует (А), при 8-часовом дне,

хризантема цветёт (Б), у растений третьей группы на КД находились только верхушки побегов, из чего следовало, что хризантема вегетировала (В), а у растений четвёртой группы на коротком дне находились только листья, а остальное на длинном дне, откуда следовало цветение хризантемы (рис. 12).

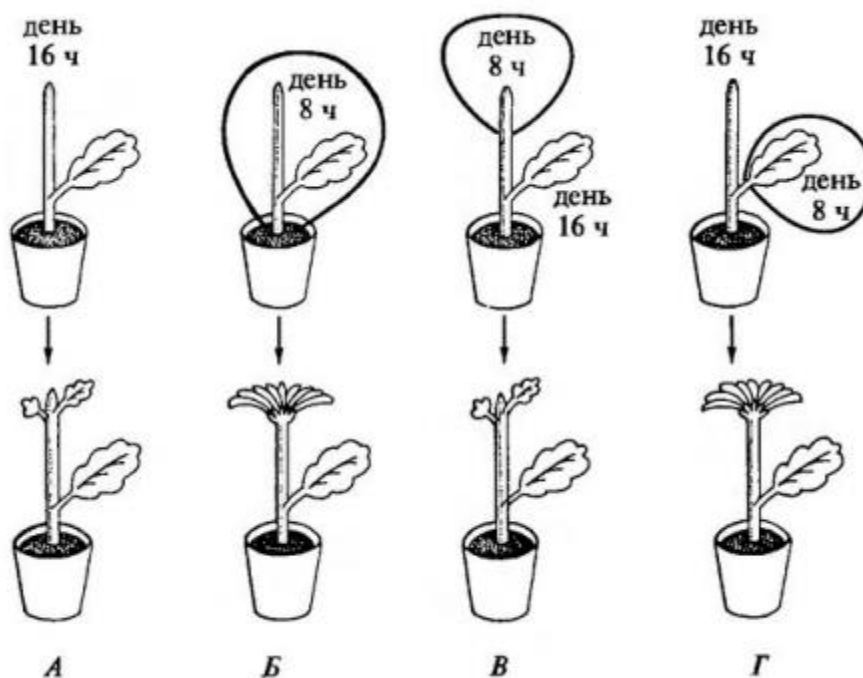


Рис. 12 – Роль листьев в восприятии длины дня

Далее были проведены опыты на абиссинской капусте - длиннопериодном растении. Было выявлено, что растение цветёт на длинном дне, чего нельзя сказать о коротком дне.

За воздействие фотопериода на растение отвечает ближайшая к листу точка роста, которая воспринимает это при помощи фоторецепторных систем: фитохромной и криптохромной, где фитохромная система – основной фоторецептор в фотопериодической реакции.

Помимо цветения, фотопериодизм влияет на формирования органов размножения и листопад [28].

Подытоживая, можно сказать, что свет и темноту у растений воспринимает каждая клетка. Фитохром под действием изменения спектрального состава солнечного света на восходе заряжается положительно, и теряет положительный заряд при закате солнца. Передача возбуждения от пигмента к плазме клеток происходит при участии ацетилхолина, который служит переносчиком возбуждения в нервной системе животных. С помощью фитохрома клетки растений могут, как бы отсчитывать «светлое» и «темное» время. Установлено, что у растений есть 13 физиолого-биохимических процессов, протекающих в их организме с определенным ритмом, т. е. с размеренным чередованием усиления и ослабления.

## 2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТА.

Целью настоящей работы является исследование влияния света с такими параметрами как: спектр излучения, интенсивность излучения, плотность мощности излучения, степень когерентности, на зерновые культуры (пшеница, овёс, лён, горох).

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- Анализ научной литературы по заданной тематике
- Сбор экспериментальной установки для облучения зёрен
- Облучение зёрен излучением с разной длительностью
- Обработка результатов эксперимента на основе научной литературы

В ходе выполнения работы была собрана установка (рис. 13), включающая в себя:

1. - лазер (He-Ne),
2. - держатель зеркала,
3. - зеркало,
4. - контейнеры с подготовленными зёрнами,
5. - стол для проведения эксперимента.

Когерентный пучок света направлялся на зеркало, после чего излучение попадало на исследуемый образец. Значение плотности мощности излучения брали исходя из исследований А.В. Будаговского [17]  $1.0 \text{ Вт/м}^2$ . Для достижения данной плотности мощности измеряли диаметр пятна, далее считали его площадь, а затем, разделив суммарную мощность на площадь, получали нужное значение плотности мощности излучения.

$$P = \frac{W}{S} \quad (9)$$

В каждом эксперименте использовали 4 контейнера с одним и тем же образцом зерна. В первый контейнер помещались 50 зёрен контрольного образца, которые не подвергались облучению. Остальные образцы в контейнерах подвергались облучению длительностью 1, 3 и 5 минут. После облучения зерна накрывали листами бумаги, для того, чтобы отгородить их от общения между контейнерами с образцами, подверженными облучению с разной дозой излучения.

Характеристики окружающей среды не измеряли, в виду того, что результаты эксперимента с гелий-неоновым лазером (на длине волны 632.8 нм) нужно было подтвердить исходя из статей А.В. Будаговского, где исследовали только влияние интенсивности, длительности и длины волны излучения.



Рис. 13 – Схема первоначальной экспериментальной установки

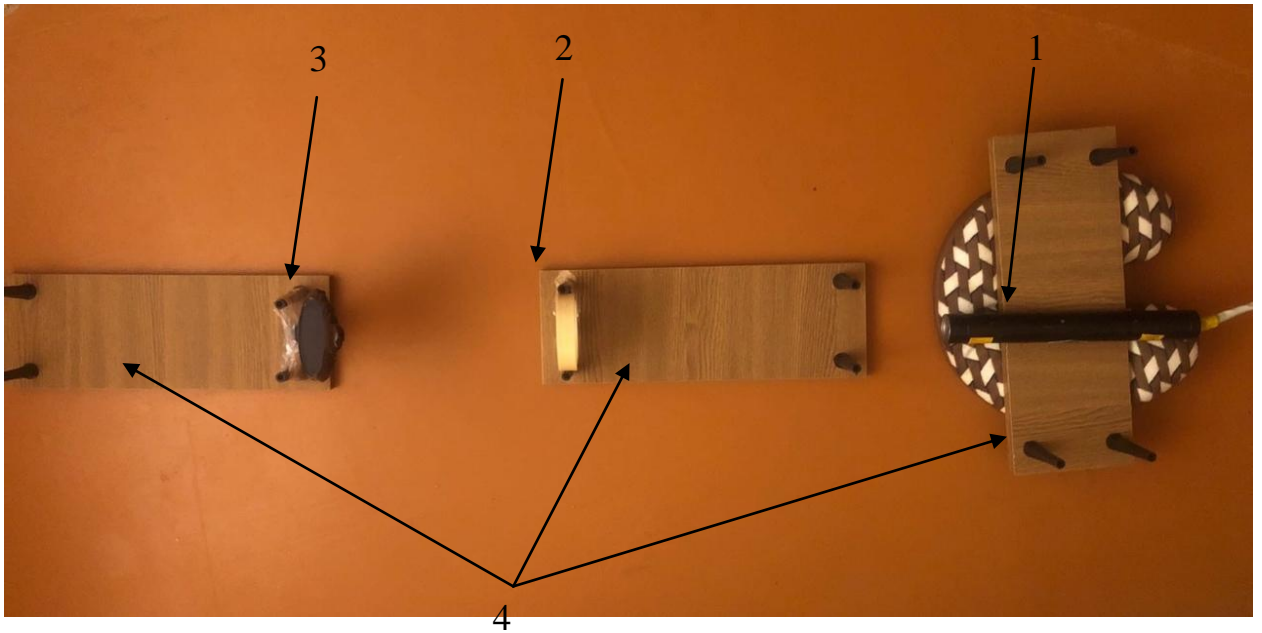


Рис. 14 – Схема экспериментальной установки с рассеивающей линзой

На рисунке 14 представлена усовершенствованная схема экспериментальной установки для облучения зёрен, в неё входит:

1. He-Ne лазер;
2. Рассеивающая линза;
3. Зеркало;
4. Держатели для лазера, линзы и зеркала.

Гелий-неоновый лазер – лазер, где активной средой является смесь гелия и неона, рабочая длина волны 632.8 нм, расположенная в красной части видимого спектра. Схема лазера представлена на рис. 15

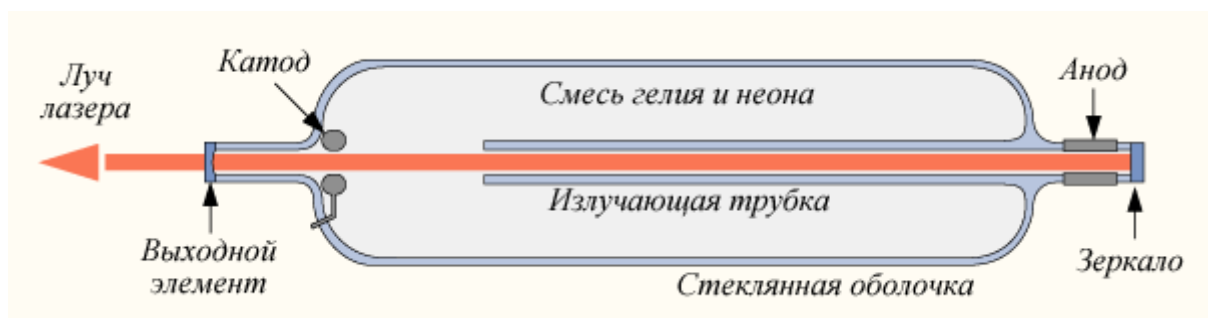


Рис. 15 - Устройство He-Ne лазера



Рабочее тело – смесь гелия и неона в пропорции 5:1, которая находится под низким давлением в стеклянной колбе. Энергия накачки подаётся от электрических разрядников, которые расположены в торце колбы. Резонатор состоит из двух зеркал, первое – полностью непрозрачное, второе – пропускает через себя 1% падающего излучения.

### 3. МЕТОДИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

#### 3.1 Исследование влияния излучения He-Ne лазера на зерновые культуры

Первое исследование проводили при помощи He-Ne лазера, облучая 4 вида зёрен. Было проведено по 5 одинаковых экспериментов, для достижения точности полученных результатов, так как на развитие растений влияет много факторов и невозможно учесть многие параметры, соответственно нужно набирать статистику.

В таблице 1 представлены количество проросших зёрен льна, овса, и пшеницы двух сортов и длительность их облучения.

«Таблица 1»

Количество проросших зёрен в контрольной группе и облученной.

Название образца	№ опыта	Контрольный образец (шт)	Облученный при t=1мин (шт)	Облученный при t=3мин (шт)	Облученный при t=5мин (шт)
Лён	1	22	22	25	0
	2	25	44	37	29
	3	39	21	0	0
	4	16	15	5	13
	5	5	4	10	16
Пшеница	1	44	48	47	39
	2	45	47	47	45
	3	47	46	49	48
	4	48	49	50	49
	5	42	46	26	45
Овёс	1	9	15	18	0
	2	21	21	13	0
	3	0	0	0	0
	4	12	15	4	13
	5	0	0	0	0

«Продолжение таблицы 1»

Название образца	№ опыта	Контрольный образец (шт)	Облученный при t=1мин (шт)	Облученный при t=3мин (шт)	Облученный при t=5мин (шт)
Пшеница №2	1	37	39	39	26
	2	32	39	43	28
	3	7	36	0	36
	4	30	35	37	24
	5	41	34	21	25

В таблице 2 представлены суммы по столбцам для контрольного результата и при разных вариантах длительности облучения.

«Таблица 2»

Суммы по столбцам для каждой группы исследуемых образцов.

Суммы	Количество зёрен, использованных в 5 экспериментах	Контрольный образец	t = 1 мин	t = 3 мин	t = 5 мин
Общая сумма		522	576	471	436
Лён	250	107	106	77	58
Пшеница	250	226	236	219	226
Овёс	250	42	51	35	13
Пшеница №2	250	147	183	140	139

Далее от сумм были посчитаны процент проросших зёрен от общего числа зёрен в таблице и процент проросших зёрен отдельно в каждом сорте. Результаты представлены в таблице 3.

Процентные соотношения от сумм для каждой группы исследуемых образцов.

	Контрольный образец (%)	При t = 1 мин (%)	При t = 3 мин (%)	При t = 5 мин (%)
Процент от общего числа зёрен	52,2	57,6	47,1	43,6
Лён	42,8	42,4	30,8	23,2
Пшеница	90,4	94,4	87,6	90,4
Овёс	16,8	20,4	14	5,2
Пшеница №2	58,8	73,2	56	55,6

Исходя из полученных результатов, для наглядного понимания, были построены гистограммы, отображающие зависимость доли проросших зёрен по сортам от длительности их облучения (рис. 16).

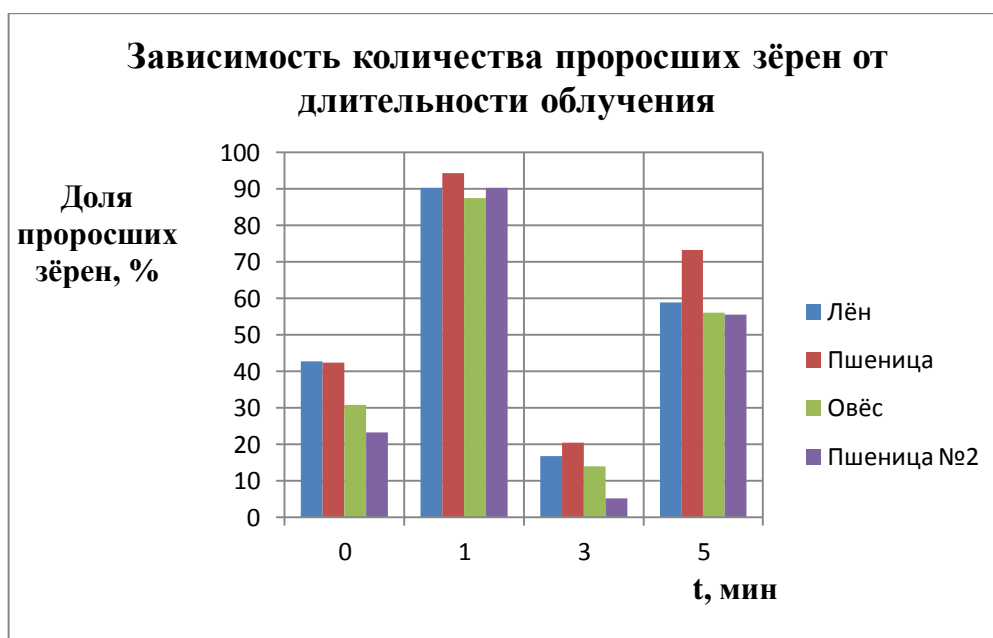


Рис. 16 – Гистограмма, отображающая зависимость доли проросших зёрен (в процентном соотношении) от длительности облучения

Из рисунка 16 видно, что максимальный процент проросших зерен наблюдается при 1 минуте облучения, причем он значительно выше, чем контрольный образец. Так же наблюдается цикличность описанная А.В. Будаговским. При облучении при  $t = 1$  минуте, прорастание приблизительно 90%, далее при  $t = 3$  минутах стимулирующий эффект падает, хотя длительность излучения увеличивается, а вот при  $t = 5$  минутах доля проросших зёрен вновь увеличивается с возрастанием длительности воздействия.

Так же во всех экспериментах была измерена длина корней зёрен каждого образца. Результаты представлены в таблице 4.

«Таблица 4»

Средняя длина корней контрольной группы и облученной.

Название образца	Средняя длина корней КО (см)	Средняя длина корней $t=1$ (см)	Средняя длина корней $t=3$ (см)	Средняя длина корней $t=5$ (см)
Лён	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
Пшеница	0,00	0,00	0,00	0,00
	3,14	3,78	3,26	1,50
	0,00	0,00	5,00	0,00
	4,17	4,10	3,27	4,43
	4,17	5,07	2,70	5,80
Овёс	0,00	0,00	0,00	0,00
	6,02	3,62	3,10	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
	4,33	4,53	0,00	4,00
	0,00	0,00	0,00	0,00

«Продолжение таблицы 4»

Название образца	Средняя длина корней КО (см)	Средняя длина корней t=1 (см)	Средняя длина корней t=3 (см)	Средняя длина корней t=5 (см)
Пшеница №2	0,00	0,00	0,00	0,00
	2,86	2,70	2,40	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
	2,50	2,80	3,30	4,00
	3,00	4,27	2,03	3,07

В таблице 5 посчитаны суммы по столбцам для контрольного результата и при разных вариантах длительности облучения. Исходя из которых, найдены процентные соотношения суммы длины корней каждого образца от их общей суммы (таблица 6).

«Таблица 5»

Суммы по столбцам для каждой группы исследуемых образцов.

Название образца	корни КО	1	3	5
Общая сумма	30,59	31,17	27,70	22,80
Лён	0,00	0,00	0,00	0,00
Пшеница	11,47	12,95	14,23	11,73
Овёс	10,35	8,15	3,10	4,00
Пшеница №2	8,36	9,77	7,73	7,07

«Таблица 6»

Процентные соотношения от сумм для каждой группы исследуемых образцов.

Корни	КО	1	3	5
Лён	0,00	0,00	0,00	0,00
Пшеница	38,01	41,94	56,77	51,46
Овёс	34,30	26,41	12,37	17,54

Корни	КО	1	3	5
Пшеница №2	27,69	31,64	30,86	30,99

На рисунке 17 представлена гистограмма зависимости длины корней каждого образца от длительности облучения.

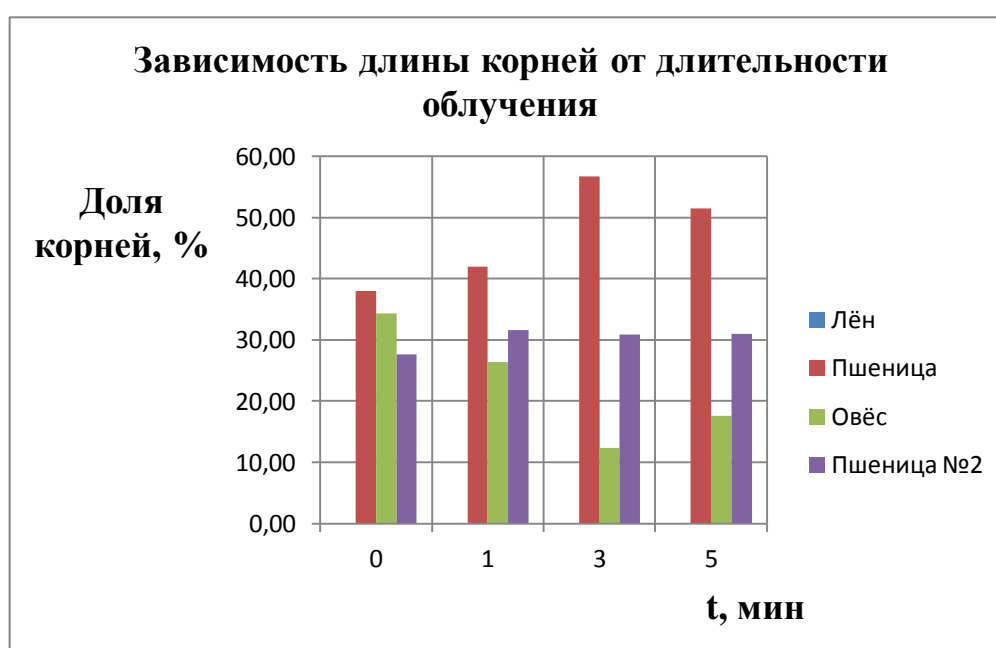


Рис. 17 – Гистограмма, отображающая зависимость длины корней всех образцов от длительности облучения

Можно сделать вывод, что на длину корней облучение красным спектром практически не влияет, но у образца №2 – пшеницы, наблюдаются 2 высоких пика относительно контрольного образца, при длительности облучения  $t = 3, 5$  минут. А вот на овёс излучение оказало отрицательное взаимодействие, причины данного явления остаются неясными.

Далее рассмотрим зависимости длины ростков от длительности облучения. В таблице 7 представлены результаты эксперимента. Сняты длины всех проросших зёрен и найдена средняя длина ростков в сантиметрах.

Средняя длина ростков контрольной группы и облученной.

Название образца	Контрольный образец	Облученный при t = 1 мин	Облученный при t = 3 мин	Облученный при t = 5 мин
Лён	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	2,64	0,00
	0,40	0,30	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
2Пшеница	0,00	0,00	0,00	0,00
	1,10	1,04	0,88	0,00
	2,00	3,20	5,00	4,50
	2,53	2,30	2,77	2,30
	2,13	2,60	1,03	3,13
Овёс	0,00	0,00	0,00	0,00
	3,90	0,60	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
Пшеница№2	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,80	0,84	0,60	0,00
	0,00	0,40	0,00	0,40
	1,20	5,10	1,53	6,30
	0,80	1,73	0,70	1,47

В таблице 8 посчитаны суммы по столбцам для контрольного результата и при разных вариантах длительности облучения. Исходя из которых, найдены процентные соотношения суммы длины ростков каждого образца от их общей суммы (таблица 8). Исходя из которых, найдены процентные соотношения (таблица 9).



«Таблица 8»

Суммы по столбцам для каждой группы исследуемых образцов.

Название образца	Сумма контрольного образца	Сумма облученного при t = 1 мин	Сумма облученного при t = 3 мин	Сумма облученного при t = 5 мин
Общая сумма	14,86	18,11	15,15	18,10
Лён	0,40	0,30	2,64	0,00
Пшеница	7,76	9,14	9,68	9,93
Овёс	3,90	0,60	0,00	0,00
Пшеница №2	2,80	8,07	2,83	8,17

«Таблица 9»

Процентные соотношения от сумм для каждой группы исследуемых образцов.

Название образца	Контрольный образец (%)	Облученный при t = 1 мин (%)	Облученный при t = 3 мин (%)	Облученный при t = 5 мин (%)
Лён	2,69	1,66	17,42	0,00
Пшеница	52,22	50,46	63,88	54,88
Овёс	26,25	3,31	0,00	0,00
Пшеница №2	18,84	44,57	18,70	45,12

На рисунке 18 представлена гистограмма зависимости длины ростков каждого образца от длительности облучения.

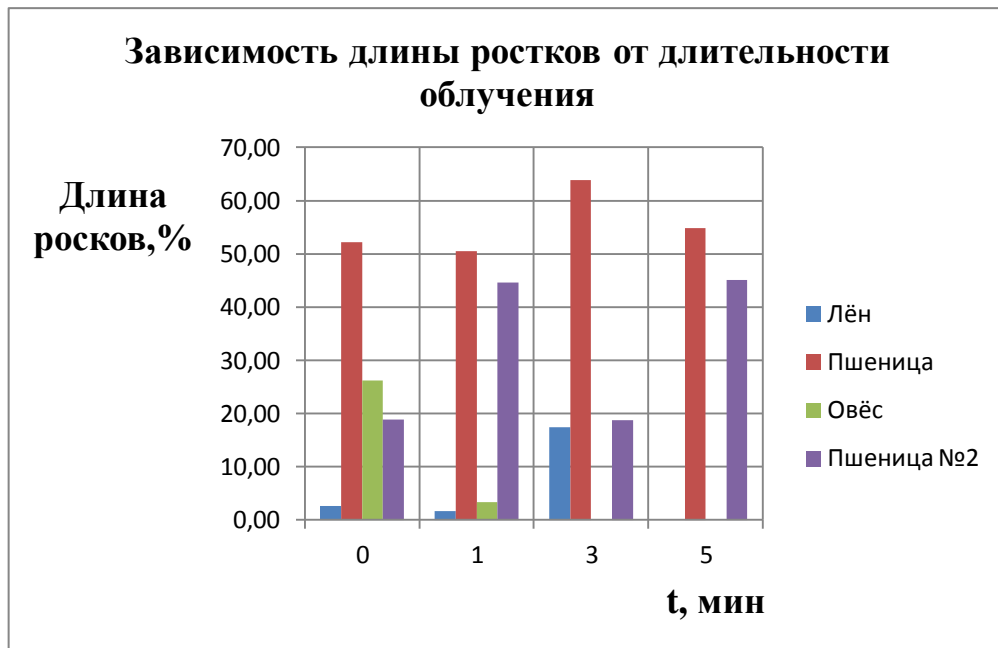


Рис. 18 – Гистограмма, отображающая зависимость длины ростков всех образцов от длительности облучения

Из рисунка видно, что у трёх образцов (пшеница, лён, пшеница №2) наблюдается положительный эффект влияния облучения на рост растений, по отношению к контрольной группе.

Так же, принимая во внимание количество проросших зёрен, длину корней и ростков всех образцов, можно сделать следующие выводы:

Прорастаемость пшеницы сама по себе очень высокая, то есть стимулировать лазерным излучением (на длине волны 632,8 нм) её нецелесообразно. Однако можно заметить, что при облучении длительностью  $t = 3$  минуты, наблюдается положительный эффект досветки пшеницы сорта №1.

На пшеницу сорта №2 эффективно влияет облучение длительностью  $t = 1$  и  $t = 5$  минут

На зёрна льна облучение He-Ne лазером на длине волны 632.8 нм положительно влияет на растения, стимулируя химические и биологические процессы внутри растения.

Большой интерес возник к зёрнам льна, так как при полученных данных, хорошо видна стимуляция развития растения при его досветке. Дальнейшие исследования с использованием He-Ne лазера на 632,8 нм будут проведены именно с этим зерном.

### 3.2 Исследование влияния излучения He-Ne лазера на зёрна льна при помощи усовершенствованной экспериментальной установки (с рассеивающей линзой)

Было проведено 16 экспериментов. В каждом эксперименте участвовали 4 контейнера с зёрнами по 50 штук в каждом. Образцы облучались излучением с одинаковой плотностью мощности, но с разной длительностью воздействия. Посчитанная по формуле (9) плотность мощности равнялась  $P = 2 \text{ Вт/м}^2$ , длительность воздействия была 2, 4 и 6 минут. Схема экспериментальной установки показана на рисунке 14.

В таблице 10 представлены полученные данные для зёрен льна.

«Таблица 10»

Количество проросших зёрен контрольного и облученных образцов.

№ опыта	Количество проросших зёрен к.о.	Количество проросших зёрен при t = 2 минуты	Количество проросших зёрен при t = 4 минуты	Количество проросших зёрен при t = 6 минуты
1	40	35	37	43
2	37	40	35	36
3	43	34	40	30
4	28	40	34	27
5	31	32	28	35
6	31	36	23	34
7	25	40	39	38
8	33	27	28	32
9	24	33	39	31
10	35	34	39	37
11	40	35	36	34
12	27	32	23	29
13	30	40	29	45
14	30	37	38	31
15	33	38	33	30

«Продолжение таблицы 10»

№ опыта	Количество проросших зёрен к.о.	Количество проросших зёрен при t = 2 минуты	Количество проросших зёрен при t = 4 минуты	Количество проросших зёрен при t = 6 минуты
16	31	39	42	39

«Таблица 11»

Средняя длина ростков всех проросших зёрен контрольного и облученных образцов.

№ опыта	Средняя длина ростков к.о. (см)	Средняя длина ростков при t = 2 минуты (см)	Средняя длина ростков при t = 4 минуты (см)	Средняя длина ростков при t = 6 минуты (см)
1	0,99	0,85	0,85	1,15
2	0,82	0,86	0,68	1,10
3	0,64	0,52	0,77	0,70
4	0,50	0,69	0,60	0,70
5	0,51	0,67	0,53	0,53
6	0,54	0,91	0,37	0,62
7	0,29	0,91	1,12	0,78
8	1,19	0,79	1,25	0,57
9	0,42	0,71	0,68	0,48
10	0,71	0,53	0,89	1,40
11	0,56	0,89	0,95	0,73
12	0,50	0,82	0,34	0,46
13	0,39	0,82	0,87	0,52
14	0,73	0,77	0,42	1,22
15	0,42	0,92	0,78	0,80
16	0,52	0,29	0,40	0,67

В таблице 12 приведены обработанные данные.

«Таблица 12»

Процентное соотношение количества проросших зёрен контрольной группы и облученных образцов.

№ опыта	Процентное соотношение проросших зёрен к.о.	Процентное соотношение проросших зёрен при t = 2 минуты	Процентное соотношение проросших зёрен при t = 4 минуты	Процентное соотношение проросших зёрен при t = 6 минуты
1	80	70	74	86
2	74	80	70	72
3	86	68	80	60
4	56	80	68	54
5	62	64	56	70
6	62	72	46	68
7	50	80	78	76
8	66	54	56	64
9	48	66	78	62
10	70	68	78	74
11	80	70	72	68
12	54	64	46	58
13	60	80	58	90
14	60	74	76	62
15	66	76	66	60
16	62	78	84	78

На рисунке 19 представлена зависимость количества проросших зёрен каждого образца от длительности облучения. Далее показана как зависит средняя длина ростков проросших зёрен от длительности облучения (рис. 20).



Рис. 19 – Гистограмма зависимости доли проросших зёрен от длительности облучения



Рис. 20 – Гистограмма зависимости длины ростков проросших зёрен от длительности облучения

Выводы: на рисунках 19 и 20 наблюдается значительная стимуляция роста зёрен льна облученной группы. Доля проросших зёрен облученных образцов и их средняя длина выше, чем в контрольной группе. Так же наблюдается та самая цикличность, описанная в статье А.В. Будаговского: при длительности облучения

$t = 2$  минуты доля проросших зёрен около 72%, при  $t = 4$  минуты она уменьшается и равна 67%, а далее (при  $t = 6$  минут) вновь возрастает до 69%.



## Алгоритм определения погрешности прямых измерений

1. Определяется выборка из  $n$  измеряемых величин
2. Вычисляется среднеарифметическое измеряемой величины

$$\langle a \rangle = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n} \quad (10)$$

3. Определяется отклонение каждого измеренного значения от среднего

$$\begin{aligned} \Delta a_1 &= |a_1 - \langle a \rangle| \\ \Delta a_2 &= |a_2 - \langle a \rangle| \\ &\dots \\ \Delta a_n &= |a_n - \langle a \rangle| \end{aligned} \quad (11)$$

4. Определяется среднеквадратичное отклонение отдельных измерений

$$S_n = \sqrt{\frac{\Delta a_1^2 + \Delta a_2^2 + \dots + \Delta a_n^2}{n}} \quad (12)$$

5. Результат считается промахом, если  $|x_i - \langle x \rangle| \geq \alpha S_n$ , где коэффициент  $\alpha$  определяется из таблицы по размеру выборки.

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	15	20	30	100
$\alpha$	1.41	1.69	1.87	2.00	2.09	2.17	2.24	2.29	2.34	2.39	2.49	2.62	2.80	3.20

$$\begin{aligned} |a_1 - \langle a \rangle| &\geq \alpha S_n \\ |a_2 - \langle a \rangle| &\geq \alpha S_n \\ &\dots \\ |a_n - \langle a \rangle| &\geq \alpha S_n \end{aligned} \quad (13)$$

6. После исключения промахов снова вычисляется среднеарифметическое с измененным  $n'$ .
7. Задав доверительную вероятность, по таблице определяется коэффициент Стьюдента, а затем вычисляется абсолютная погрешность результатов измерения.

$$\Delta x = \sqrt{(t_{p,N} \cdot S_{\langle x_n \rangle})^2 + (\frac{1}{3} t_{p,\infty} \cdot \delta x_{np})^2} \quad (14)$$

8. Рассчитывается относительная погрешность (в %)

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{\langle x \rangle} \cdot 100\% \quad (15)$$

9. Записывается окончательный результат  $x = \langle x \rangle \pm \Delta x$  с округлением.

Пренебрегая приборной погрешностью, с учетом вышперечисленного метода относительная погрешность прямых измерений для количества проросших зёрен отдельно по контрольному образцу и облученным с разной длительностью воздействия представлена в таблице 13. Надежность брали 0.9, критерий Стьюдента, соответствующий данной надежности равен 1.76.

«Таблица 13»

Относительная погрешность при прямых измерениях количества проросших зёрен и средней длины их ростков.

Количество проросших зёрен к.о. (%)	Количество проросших зёрен при t = 2 мин (%)	Количество проросших зёрен при t = 4 мин (%)	Количество проросших зёрен при t = 6 мин (%)	Средняя длина ростков к.о. (%)	Средняя длина ростков при t = 2 мин (%)	Средняя длина ростков при t = 4 мин (%)	Средняя длина ростков при t = 6 мин (%)
29	18	30	25	52	30	64	63

Такая высокая относительная погрешность обусловлена тем, что проведено малое количество экспериментов – 16 штук. Для исследования растущих организмов, нужно собирать выборку из значительно большего числа экспериментов, дабы уменьшить погрешность измерений.

Окончательный результат для количества проросших зёрен:

$$Z_{ко} = 32 \pm 9шт$$

$$Z_2 = 35 \pm 6шт$$

$$Z_4 = 33 \pm 10шт$$

$$Z_6 = 34 \pm 8шт$$

Окончательный результат для средней длины проросших зёрен:

$$X_{ко} = 0,6 \pm 0,3см$$

$$X_2 = 0,8 \pm 0,2см$$

$$X_4 = 0,7 \pm 0,5см$$

$$X_6 = 0,8 \pm 0,5см$$

### 3.3 Исследование влияния излучения Yb лазера на зерновые культуры

В эксперименте по исследованию влияния ИК спектра на рост растений использовали иттербиевый волоконный лазер с длиной волны 1080 нм, облучая 5 видов зёрен.

Волоконные лазеры – одни из наиболее ярких достижений квантовой электроники. В качестве активной среды используют волоконные световоды, легированные разными добавками (редкоземельными металлами:  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Tm}^{3+}$ ,  $\text{Ho}^{3+}$ ). На рис. представлена простейшая схема волоконного лазера. Его составными частями являются: полупроводниковый источник накачки, отрезок волоконного световода, который легирован активными ионами, две брэгговские решетки (входная решётка имеет коэффициент отражения близкий к единице, а коэффициент отражения выходной решетки определяется величиной усиления и оптических потерь излучения в световоде) [29]

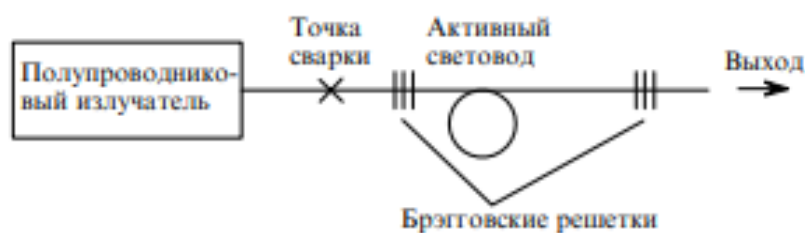


Рис. 21– Схема волоконного лазера

В нашем случае использовался волоконный лазер, легированный ионами иттербия. В спектре поглощения такого световода присутствует только одна полоса поглощения, в связи с тем, что энергетическая структура ионов иттербия обладает только одним уровнем  $^2F_{2/5}$ , помимо основного  $^2F_{7/2}$ , и имеет сложную форму в связи со штарковским расщеплением (рис. 22).

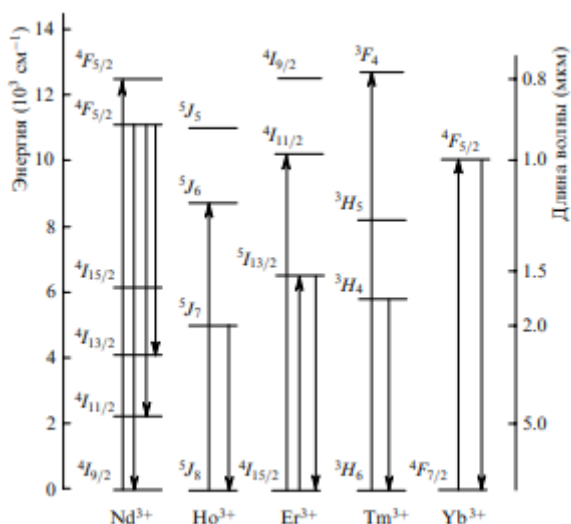


Рис. 22 - Схема энергетических уровней ионов редкоземельных металлов

Полоса поглощения иттербиевого волоконного лазера имеет два максимума на 915 и 976 нм, поэтому для накачки используют полупроводниковые источники. В результате перехода с  $^2F_{2/5}$  на  $^2F_{7/2}$  происходит люминесценция с максимумами на 978-982 нм и 1030-1040 нм [29, 30]

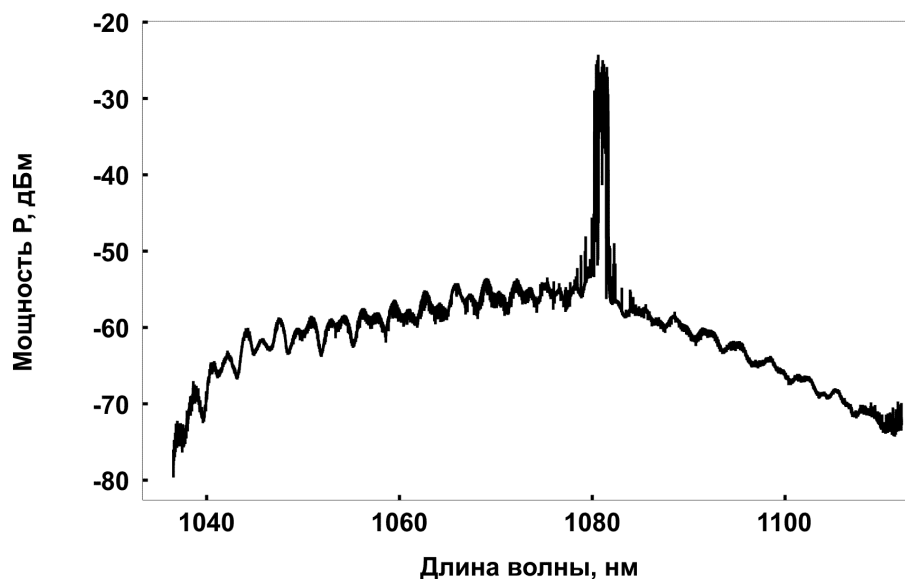


Рис. 23 – Спектр Yb лазера

Было проведено по 5 одинаковых экспериментов, для достижения точности полученных результатов, так как растения – живые организмы, развивающиеся с большой скоростью. В таблице 14 представлены количества проросших зёрен льна, овса, пшеницы двух сортов, гороха и длительность их облучения.

Количество проросших зёрен в контрольной группе и облученной.

Название образца	№ опыта	Контрольный образец (шт)	Облученный при t=1мин (шт)	Облученный при t=3мин (шт)	Облученный при t=5мин (шт)
Горох	1	18	38	33	33
	2	43	25	24	39
	3	30	31	40	40
	4	22	31	37	15
	5	18	0	18	12
Лён	1	22	19	23	26
	2	18	33	42	33
	3	5	45	41	32
	4	0	32	31	27
	5	5	9	11	8
Пшеница	1	44	47	48	48
	2	48	47	49	47
	3	49	50	36	46
	4	49	50	45	32
	5	49	49	48	34
Овёс	1	29	5	14	19
	2	32	12	31	6
	3	23	4	13	21
	4	6	3	0	5
	5	7	19	15	3
Пшеница №2	1	46	36	40	42
	2	46	45	45	41
	3	36	42	38	43
	4	35	25	21	12
	5	35	42	41	29

В таблице 15 посчитаны суммы по столбцам для контрольного результата и при разных вариантах длительности облучения. Исходя из которых, найдены процентные соотношения доли проросших зёрен каждого образца от их общей суммы (таблица 16).

«Таблица 15»

Суммы по столбцам для каждой группы исследуемых образцов.

Название образца	Контрольный образец	Облученный при t = 1 мин	Облученный при t = 3 мин	Облученный при t = 5 мин
Общая сумма	715	739	784	693
Горох	131	125	152	139
Лён	50	138	148	126
Пшеница	239	243	226	207
Овёс	97	43	73	54
Пшеница №2	198	190	185	167

«Таблица 16»

Процентные соотношения от сумм для каждой группы исследуемых образцов.

Название образца	Контрольный образец	Облученный при t = 1 мин	Облученный при t = 3 мин	Облученный при t = 5 мин
Горох	52,40	50,00	60,80	55,60
Лён	20,00	55,20	59,20	50,40
Пшеница	95,60	97,20	90,40	82,80
Овёс	38,80	17,20	29,20	21,60
Пшеница №2	79,20	76,00	74,00	66,80

Исходя из полученных данных, для наглядного понимания, были построены гистограммы, отображающие зависимость доли проросших зёрен по сортам от длительности их облучения (рис. 24).

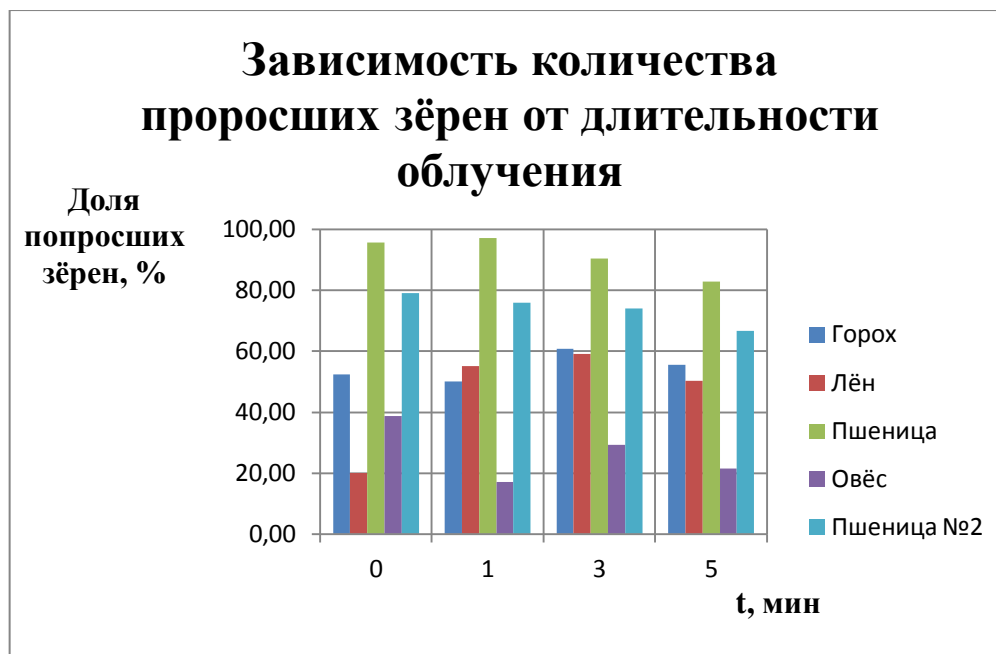


Рис. 24 – Гистограмма, отображающая количество проросших зёрен всех образцов от длительности облучения

Из рисунка видно, что прорастаемость пшеницы обоих сортов высокая и стимуляция роста этим образцам не нужна. Чего нельзя сказать о зёрнах льна. На рисунке наблюдается увеличение энергии роста зёрен льна при облучении длительностью  $t = 1, 3, 5$  минут.

Далее рассмотрим результаты средней длины ростков всех проросших зёрен (таблица 17).



Средняя длина ростков контрольной группы и облученной.

Название образца	Контрольный образец	Облученный при t = 1 мин	Облученный при t = 3 мин	Облученный при t = 5 мин
Горох	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
	1,43	2,29	3,52	2,47
	1,14	1,72	3,08	1,13
	1,30	0,00	1,40	1,10
Лён	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,43	2,73	0,61	0,29
	0,00	0,58	1,28	0,68
	0,00	1,00	1,50	2,00
Пшеница	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,39	3,69	0,59	0,97
	2,30	2,60	2,35	2,27
	2,30	1,90	1,50	0,50
Овёс	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,80	1,18	2,21	0,48
	1,54	0,60	0,00	1,73
	1,94	1,47	0,70	0,00
Пшеница№2	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
	3,26	0,70	0,30	1,07
	2,60	1,62	2,58	1,35
	1,00	0,97	0,70	0,00

В таблице 18 посчитаны суммы по столбцам для контрольного результата и при разных вариантах длительности облучения. Исходя из которых, найдены

процентные соотношения длины ростков проросших зёрен каждого образца от их общей суммы (таблица 19).

«Таблица 18»

Суммы по столбцам для каждой группы исследуемых образцов.

Название образца	Контрольный образец	Облученный при t = 1 мин	Облученный при t = 3 мин	Облученный при t = 5 мин
Общая сумма	20,43	23,04	22,32	16,04
Горох	3,87	4,01	8,00	4,71
Лён	0,43	4,31	3,39	2,97
Пшеница	4,99	8,19	4,44	3,74
Овёс	4,28	3,24	3,24	2,21
Пшеница №2	6,86	3,29	3,29	2,42

«Таблица 19»

Процентные соотношения от сумм для каждой группы исследуемых образцов.

Название образца	Контрольный образец	Облученный при t = 1 мин	Облученный при t = 3 мин	Облученный при t = 5 мин
Горох	18,94	17,41	35,84	29,34
Лён	2,12	18,71	15,19	18,49
Пшеница	24,42	35,55	19,89	23,30
Овёс	20,95	14,07	14,52	13,77
Пшеница №2	33,57	14,27	14,73	15,09

На рисунке 25 представлена гистограмма зависимости длины ростков каждого образца от длительности облучения.



Рис. 25 – Гистограмма, отображающая зависимость длины ростков всех образцов от длительности облучения

Из рисунка видно, что стимуляция роста для зёрен овса нецелесообразна, на пшеницу №2 она оказывает отрицательное влияние. Для пшеницы наблюдается положительная отдача при длительности облучения  $t = 1$  мин, а для гороха при  $t = 3, 5$  мин. На зёрна льна досветка так же оказывает положительное действие при всех длительностях облучения.

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что как и при красном спектре, в инфракрасном у пшеницы высокая прорастаемость как в контрольных образцах, так и в облученных, следовательно стимулировать её рост нецелесообразно. Замечено, что семена гороха и льна положительно реагируют на облучение  $Yb$  лазером, потому проведение дальнейших экспериментов планируется с участием данных семян.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В основной части отчета был рассмотрен теоретический материал на тему влияния длительности и плотности мощности, длины волны и когерентности излучения на рост и развитие растений.

Собрана установка для проведения экспериментов. Проведены исследования и выявлены зависимости различных параметров света на развитие растений.

В результате проделанной работы, были сделаны следующие выводы:

1. При облучении He-Ne лазером у трёх образцов (пшеница, лён, пшеница №2) наблюдается положительный эффект энергии роста, по сравнению с контрольной группой.
2. Принимая во внимание количество проросших зёрен, длину корней и ростков всех образцов, можно сделать вывод, что у пшеницы прорастаемость очень высокая, то есть стимулировать лазерным излучением (на длине волны 632,8 нм) нецелесообразно.
3. При облучении зёрен льна HeNe лазером отчетливо видно положительное влияние на прорастаемость семян и длину ростков.
4. У семян гороха и льна выявлена положительная реакция на стимуляцию инфракрасным излучением Yb лазера, поэтому дальнейшие эксперименты будут проводиться с этими зёрнами.
5. В ряде экспериментов отчетливо наблюдается цикличность стимуляционного воздействия лазерного излучения на семена, что качественно согласуется с результатами А.В. Будаговского.

Все поставленные задачи работы решены в полном объеме.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ю. Н. Кульчин. Агробиофотоника – влияние света на развитие растений. – Фотон-Экспресс, 2019, 6(158), с. 64.
2. Е. В. Долин. Светодиодные технологии для агробиофотоники. – Фотон-Экспресс, 2019, 6(158), с. 65.
3. А.В. Будаговский, Н.В. Соловых, О.Н. Будаговская. Реакция растительных организмов на воздействие квазимонохроматического света с различными длительностью, интенсивностью и длиной волны. – Квантовый электроник, 2015, 45, №4, с. 345 – 350
4. Ю. П. Федулов. Фотосинтез и дыхание растений: учебное пособие. – Краснодар: КубГАУ, 2019. – 101с.
5. А. Г. Лебедев. Фотосинтез. – «Биология», №48/2000, 2001
6. Яковцева М.Н. Фотоморфогенетическая регуляция роста и развития земляники садовой в условиях светокультуры: диссертация. Москва: 2017. - 154с.
7. Головацкая, И.Ф. Роль криптохрома 1 и фитохромов в регуляции фотоморфогенетических реакций растений на зелёном свете / И.Ф. Головацкая // Физиология растений. - 2005. - Т. 52. - С. 822-829.
8. Giovanni, B., Byrdin, M., Ahmad, M., Brettel, K. Light-induced electron transfer in a cryptochrome blue-light photoreceptor // Nat. Struct. Biol. - 2003. - V. 10. - P. 489-490.
9. И.Н. ФЕТИСОВ, П.В. ГРАМЕНИЦКИЙ ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. Методические указания к лабораторной работе К-2 по курсу общей физики: под редакцией Л. К. Мартинсона Москва, 1988.
10. В.И. Малышев, Г. Шрайбер. Инфракрасные лучи в электронике. Большая российская энциклопедия М., 200 с.
11. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. М., 2004.

- 12.С.К. Волончук. Теоретическое обоснование и практическое применение ИК излучения в технологии сушки растительного сырья. Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2011 (9-10): с. 116-123.
- 13.А. В. Будаговский. Дистанционное межклеточное взаимодействие. – М.: НПЛЦ «Техника», 2004. – 104 с.
- 14.С.Х. Ким, С. З. Цой, С. Ч. Ким. Обработка рисовых семян лазерным светом. – Международный научно-исследовательский журнал. - №4-6 (46), 2016, с. 43-46.
- 15.Т.Й. Кару, Г.С. Летохов, В.В. Лобко. Квантовая электроника, 9, 1761 (1982)
- 16.Т. Й. Кару, Г.С. Летохов, В.В. Лобко. Квантовая электроника, 10, 1771 (1983)
- 17.А.В. Будаговский, Н.В. Соловых, О.Н. Будаговская. Реакция растительных организмов на воздействие квазимонохроматического света с различными длительностью, интенсивностью и длиной волны. – Квантовый электроник, 2015, 45, №4, с. 345 – 350
- 18.П.В. Короленко. Оптика когерентного излучения. – уч. пособие. – Москва, 1997, 222 с
- 19.Л.А. Шелепин. Когерентность. – М.: Знание, 1983. – 64 с.
- 20.Франсон М., Сланский С. Когерентность в оптике. Пер. с франц. М.: Наука, 1967. 80 с
- 21.Мандель Л., Вольф Э. Оптическая когерентность и квантовая оптика. Пер. с англ. М.: Наука. Физматлит, 2000. 896 с.
- 22.В.П. Рябухо, Д.В. Лякин, В.В. Лычагов. Интерферометр Майкельсона с протяженным широкополосным источником света – Учебно-методическое руководство к выполнению лабораторной работы. Саратов, 2009, 22 с.
- 23.Е. Romero et al. Quantum coherence in photosynthesis for efficient solar-energy conversion//Nature Physics. 2014.
- 24.F.D. Fuller et al. Vibronic coherence in oxygenic photosynthesis//Nature Chemistry. 2014.

- 25.А. В. Будаговский. О способности клеток различать когерентность оптического излучения. – Квантовая электроника, 2005, т. 35, №4, с. 369-374.
- 26.А. В. Будаговский. Фоторегуляторное действие когерентного света. – Плодоводство и ягодоводство России, 2012, т. 33, с. 53-60.
- 27.А.С. Степановских. Экология: Учебник для вузов. – М.:ЮНИТИ-ДАНА, 2001. – 703 с.
- 28.О. А. Авксентьева, В. В. Жмурко. Физиология цветения/ учебное пособие. – Харьков, 2011. – 132 с.
- 29.А. С. Курков, Е. М. Дианов. Непрерывные волоконные лазеры средней мощности. – Квантовая электроника, 2004, т. 34, №10, с. 881-900.
- 30.Pask H. M., Carman R.J., Hanna D.C., Tropper A.C., Mackechnie C.J, Barber P.R, Dawes J.M. IEEEJ. Sel. Topic Quantum Electron.,1, 1 (1995)]