

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ТГУ)

УДК 63
Рег. № НИОКТР
Рег. № ИКРБС

УТВЕРЖДАЮ

И.о. проректора по научной и
инновационной деятельности ТГУ
д-р физ.-мат. наук, профессор



А.Б. Ворожцов
« 19 » *ноября* 2023 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:

РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ
ОЗДОРОВЛЕННОГО РАСТИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛА
КАРТОФЕЛЯ РОССИЙСКИХ СОРТОВ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ,
ВКЛЮЧАЮЩИХ ОПИСАНИЕ ИСТОЧНИКА ОСВЕЩЕНИЯ И
ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ОСВЕЩЕНИЯ
(заключительный)

выполненный по договору от 22.09.2023 г. № ДС 22092023/1/4709-23

Начальник научного управления,
канд. геол.- минерал. наук

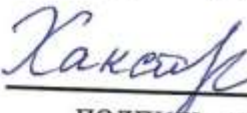
 09.11.2023 Т.С. Краснова
подпись, дата

Руководитель НИР,
ст. науч. сотр., канд. с.-х. наук,
доцент

 09.11.2023 С.А. Сучкова
подпись, дата

Томск 2023

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР, ст. науч. сотр., канд. с.-х. наук, доцент	 подпись, дата	09.11.2023 С.А. Сучкова (введение, раздел 1, 2, 3, заклучение)
Исполнители:		
Ст. науч. сотр., канд. биол. наук	 подпись, дата	09.11.2023 А.Н. Бутенкова (раздел 1, 2)
Науч. сотр.	 подпись, дата	09.11.2023 А.И. Манукян (раздел 2, 3)
Науч. сотр.	 подпись, дата	09.11.2023 Д.А. Савельева (раздел 1, 3)
Науч. сотр.	 подпись, дата	09.11.2023 Е.В. Хаксар (раздел 2, 3)
Нормоконтролер	 подпись, дата	09.11.2023 Е.Н. Соколенко

РЕФЕРАТ

Отчет 65 с., 1 кн., 8 рис., 17 табл., 38 источн., 4 прил.

КАРТОФЕЛЬ, РОСТ, ФОТОПЕРИОД, ОСВЕЩЕНИЕ,
МИКРОРАСТЕНИЯ, СВЕТОВОЙ ПЕРИОД, *SOLANUM TUBEROSUM*

Объект исследования – микроклоны картофеля *Solanum tuberosum* L.
сорта Ариэль.

Цель работы – изучить влияние различных источников освещения и продолжительности освещения на рост и развитие оздоровленных микрорастений картофеля *in vitro*.

Выполнен аналитический обзор современной научно-технической литературы по теме.

Изучено влияние различных источников освещения и продолжительности освещения на рост и развитие оздоровленных микрорастений картофеля сорта Ариэль *in vitro* в лабораторных условиях.

Приведены данные об особенностях роста и развития оздоровленных микрорастений картофеля сорта Ариэль, выращиваемого с использованием различных источников и режимов освещения.

Изучено влияние данных факторов на морфометрические показатели (высота растения, количество междоузлий, количество листьев, ризогенез, масса корневой системы, побега, листьев, стебля) оздоровленных растений картофеля в лабораторных условиях *in vitro*.

Представлены элементы технологии получения оздоровленного растительного материала картофеля в лабораторных условиях.

Работы выполнены в полном объеме в соответствии с техническим заданием.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Литературный обзор	9
1.1 Влияние светового излучения на морфогенез растений	9
1.1.1 Краткий обзор наиболее распространенных типов источников освещения для выращивания растений в условиях культуры	16
1.2 Фотопериодизм картофеля	23
2 Материалы и методы	28
3 Результаты исследований	33
3.1 Изучение влияния различных источников освещения на рост и развитие микрорастений картофеля сорта Ариэль <i>in vitro</i>	33
3.2 Расчет экономической эффективности применения различных источников освещения	37
3.3 Изучение воздействия разных режимов освещения на рост и развитие оздоровленных микрорастений картофеля <i>in vitro</i>	38
3.4 Расчет экономической эффективности применения различных режимов освещения	40
4 Выводы	42
Заключение	44
Список использованных источников	45
Приложение А (обязательное) Протокол морфогенеза растений картофеля <i>in vitro</i> при выращивании его с использованием различных источников освещения	50
Приложение Б (обязательное) Протокол морфогенеза растений картофеля <i>in vitro</i> при выращивании его с использованием различных режимов освещения	51
Приложение В (обязательное) Элемент технологии получения оздоровленного растительного материала картофеля	

сорта Ариэль в лабораторных условиях № 1	52
Приложение Г (обязательное) Элемент технологии получения оздоровленного растительного материала картофеля сорта Ариэль в лабораторных условиях № 2	59

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящем отчете о НИР применяются следующие сокращения и обозначения:

МС – Мурасиге-Скуга

ФАР – фотосинтетически активная радиация

ИК – инфракрасный

УФ – ультрафиолетовый

КПД – коэффициент полезного действия

ЭПРА – электронный пускорегулирующий аппарат

ЭмПРА – электромагнитный пускорегулирующий аппарат

ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень развития биологии и растениеводства немыслим без использования в качестве исходного посадочного материала растений, подготовленных посредством клеточных технологий. Оздоровление растительного материала с помощью технологий *in vitro* позволяет резко повысить качество посадочного материала без изменений сортовых характеристик. Клональное микроразмножение растений картофеля позволяет за короткий срок получать большое количество посадочного материала.

Спектральный состав света и продолжительность фотопериода являются важными факторами, влияющими на рост, развитие и продуктивность растений картофеля [1]. Индуцируемые светом сигнальные пути позволяют растениям достичь оптимального уровня фотосинтеза и свести к минимуму вредное влияние избыточной инсоляции. При смене условий освещения происходит изменение транскрипции благодаря светоиндуцибельным промоторам и светозависимым регуляторным факторам, таким как фитохромы, чувствительные к красному и дальнему красному свету, и криптохромы, осуществляющие рецепцию голубого света и ультрафиолетовых лучей [2]. Избыток света, поглощенного фотосинтетическим аппаратом, стимулирует образование вредных для растений активных форм кислорода, таких как супероксидный радикал, гидроксильный радикал, пероксид водорода и синглетный кислород, что приводит к состоянию окислительного стресса. Процесс сопровождается фотоокислением пигментов, деструкцией каротиноидов, обесцвечиванием хлорофиллов и разрушением структур хлоропластов [3].

Для оптимального роста растений картофеля в лабораторных условиях необходимо учитывать специфическую реакцию растений на различные источники, спектр света и продолжительность освещения, так как картофель является одной из ценнейших сельскохозяйственных культур, что

обуславливает высокую заинтересованность в изучении оптимальных условий его выращивания [4].

Цель исследования: изучить влияние различных источников освещения и продолжительности освещения на рост и развитие оздоровленных микрорастений картофеля *in vitro*.

Задачи:

1. Изучить влияние различных источников освещения на морфометрические показатели микрорастений картофеля *in vitro*.

2. Изучить воздействие разных режимов освещения (в части продолжительности освещения) на рост и развитие микрорастений картофеля *in vitro*.

3. Определить экономическую эффективность применения различных источников освещения и разной продолжительности освещения при выращивании микрорастений картофеля *in vitro*.

1 Литературный обзор

1.1 Влияние светового излучения на морфогенез растений

Изучение влияния качества света на ростовые процессы и содержание фотосинтетических пигментов является важным направлением исследований и используется для подбора оптимального режима освещения [5]. При этом содержание хлорофиллов и каротиноидов – один из важнейших биохимических показателей реакции растений на изменения факторов внешней среды, а именно условий освещения и качества света [6].

Оптическое излучение, положительно влияющее на растения, по спектральному составу может быть разделено на три части: ультрафиолетовое (от 295 до 380 нм), видимое (от 380 до 780 нм) и ближнее инфракрасное излучение (от 780 до 1100 нм). В спектре солнечных лучей выделяют область фотосинтетической активной радиации (ФАР), используемой растениями в процессе фотосинтеза. Это лучи длиной волны (от 380 до 710 нм) [7].

Спектральный состав света оказывает большое влияние на процессы роста, регенерации и ризогенеза *in vitro* и является одним из главных факторов биопродуктивности растений, в том числе картофеля [2, 8]. Различными авторами проводилось изучение влияния спектрального состава света на рост и развитие растений. В. Barkiwska и L. Michalczyk [9] отмечают, что наилучшего качества корней и надземных органов вишни и голубики возможно достичь, используя спектр синего цвета. Учеными Л.В. Алексеенко и В.А. Высоцким [10] выявлено, что красный и синий цвет ускоряют образование корневой системы растений *in vitro*. При этом синий участок спектра существенно влияет на суммарную длину корней. В исследованиях А.А. Шипуновой и В.А. Высоцкого выявлен положительный эффект культивирования эксплантов плодовых и ягодных культур на этапе пролиферации в условиях облучения синим цветом, как в отношении увеличения количества побегов, так и с точки зрения улучшения их качества [11]. При сочетании белого и красного света

наблюдается максимальная высота Юкки слоновой в условиях стерильной культуры, а отдельно красный цвет ингибирует скорость укоренения и наибольшее количество образования корней [12].

У растений имеются системы фоторецепторов, обеспечивающие поглощение энергии по всей области ФАР, так как они являются единственными организмами на Земле, которые самостоятельно синтезируют органические вещества из неорганических.

Анализ специальной литературы показывает, что растения усваивают только около 0,2 % энергии ФАР, приходящей на Землю. Вместе с этим теоретически возможно усвоить 5 % и даже 10 % энергии ФАР. По данным А.А. Ничипоровича максимальный коэффициент полезного действия фотосинтеза (но не более 5 %) имеет место при излучении с длиной волны 680 нм [13]. Основная причина низкой продуктивности биосферы, как биорегенеративной системы, заключается в том, что громадное количество приходящей энергии ФАР обесценивается как фактор фотосинтеза неблагоприятными сочетаниями ее с другими условиями продуктивности: теплом, влажностью, условиями почвенного плодородия. Кроме того, важен спектральный состав излучения.

По данным Н.Н. Протасовой [14] различные части спектра оказывают характерное только им воздействие на растения. Отсутствие в излучении ламп отдельных участков спектра может привести к нарушению нормального роста растений при длительном выращивании их под этими источниками. Влияние спектра излучения на формирование растений (по Н.Н. Протасовой) показано в таблице 1.

Таблица 1 – Длина волн и их влияние на растения

Диапазон длин волн, нм	Влияние на растения
400–500 (синий цвет)	Формирование низкорослых растений с низкой продуктивностью вследствие накопления в листьях ингибиторов роста. При этом стебли укорочены, листья утолщены, но мелкие
500–600 (зеленый свет)	Формирование растений с вытянутыми осевыми органами и тонкими листьями, с низкой продуктивностью
600–780 (красный свет) особенно важна зона 640–680 нм	Формирование у растений высокого ростового эффекта (интенсивный рост листьев, осевых органов). При недостатке этого излучения у растений формируются неполноценные генеративные органы, что приводит к низкой урожайности

По мнению Н.Н. Протасовой целесообразно создать такой источник излучения, у которого соотношение потоков по спектру ФАР будет следующее: для диапазона от 380 до 490 нм – от 20 % до 25 %; для диапазона от 490 до 500 нм – от 20 % до 25 %; для диапазона от 600 до 700 нм – от 50 % до 60 %. Таким образом, каждая из трех основных областей ФАР, взятая в отдельности, не позволяет вырастить полноценные растения, и только излучение с определенным соотношением энергии по этим трем диапазонам длин волн может обеспечить выращивание полноценных растений.

В течение дня спектральная плотность солнечного излучения изменяется. При уменьшении солнцестояния солнечный спектр обогащается длинноволновыми оранжево-красными лучами, а при нахождении солнца в зените максимум приходится на коротковолновые сине-фиолетовые лучи.

Анализ литературы показывает, что солнечный свет (величина облученности, длительность воздействия в течение суток, сезонов года, высота стояния солнца над горизонтом) оказывают огромное влияние на длительность вегетации.

Энергия света используется растениями для фотосинтеза и регуляции своего развития (прорастание, цветение, плодоношение). При этом на регуляцию требуется от 100 до 1000 раз меньше энергии, чем на фотосинтез.

Спектральные диапазоны света имеют следующие физиологические значения:

- от 280 до 320 нм: оказывает вредное воздействие;
- от 320 до 400 нм: регуляторная роль, необходимо несколько процентов;
- от 400 до 500 нм («синий»): необходим для фотосинтеза и регуляции;
- от 500 до 600 нм («зеленый»): полезен для фотосинтеза оптически плотных листьев, листьев нижних ярусов, густых посевов растений благодаря высокой проникающей способности;
- от 600 до 700 нм («красный»): ярко выраженное действие на фотосинтез, развитие и регуляцию процессов;
- от 700 до 750 нм («дальний красный»): ярко выраженное регуляторное действие, достаточно несколько процентов в общем спектре;
- от 1200 до 1600 нм: поглощается внутри и межклеточной водой, увеличивает скорость тепловых биохимических реакций.

Интенсивность света влияет на скорость фотосинтеза. При низкой интенсивности света преобладают процессы дыхания растений (энергия для жизнедеятельности черпается за счет распада ранее синтезированных веществ). При повышении интенсивности света линейно увеличивается фотосинтез. При дальнейшем росте интенсивности фотосинтез увеличивается медленнее, потом не увеличивается, наступает «фаза насыщения». Если продолжать увеличивать интенсивность света, фотосинтез начинает снижаться. При низкой интенсивности света растения получают вытянутые. У корнеплодных культур корнеплоды образуются плохо, растения формируют цветоносные стебли. У томатов и огурца цветы опадают, плоды невелики, вкусовые качества низкие. Интенсивный свет позволяет увеличить урожай, получать крупные плоды высокого качества,

значительно снизить сроки вегетации. Интенсивный свет позволяет скоординировать фотосинтез, рост и развитие растений. В то же время для выращивания зелени сильный свет вреден, так как рост листовой поверхности замедляется, качества листьев снижается, они желтеют и становятся жесткими.

Согласно разработкам института Гипронисельпром, оптимальная норма облученности в теплице для выращивания рассады 40 Вт/м^2 ФАР с фотопериодом 14 часов, для выращивания на продукцию 100 Вт/м^2 с фотопериодом 16 часов, средняя суточная интенсивность естественного света 100 Вт/м^2 [15].

Основные пигменты листьев – хлорофиллы а и b – поглощают свет синего и красного диапазонов, каротиноиды поглощают свет синего диапазона. Обобщение данных поглощения света листьями разных растений позволяет рассчитать спектральную кривую поглощения «среднего» зеленого листа. Поглощение в синей и красной области спектра составляет от 80 % до 90 % излучения ФАР. Зеленые лучи хорошо проникают к листьям нижних ярусов, куда синие и красные лучи почти не проникают.

В ИК диапазоне полоса поглощения от 1200 до 1600 нм связана с водой, содержание которой в клетках листьев может достигать 90 %. Начиная с 2000 нм начинается неселективное тепловое поглощение [16].

При среднесуточной интенсивности света 100 Вт/м^2 ФАР соотношение синих, зеленых и красный лучей в спектре не имеет особого значения. При высокой интенсивности ФАР синие лучи продолжают хорошо усваиваться растениями, тогда как интенсивные красные могут привести к пожелтению листьев и даже гибели растения.

Фитоценоз как фотосинтезирующая система отличается от среднего листа. К оптическим характеристикам света прибавляются такие как направление излучения (вертикальное, боковое), степень рассеянности (диффузности света). Листья растений так располагаются в пространстве,

чтобы при нехватке света максимально собирать рассеянный свет, а при избытке уменьшать световое поглощение [17].

Интересно, что интенсивный свет, падающий на одну сторону листа, производит такое же действие на фотосинтез, как и половинные интенсивности света, падающего на обе стороны листа. Это означает, что для ценоза важен также свет, рассеянный листьями и отраженный от листьев.

Выигрыш в урожае, полученный в работе В.М. Лемана [18] указывает, что в реальных ценозах при одинаковых мощностях лучистых потоков боковое освещение более эффективно, чем освещение сверху, поскольку оно более объемно и лучше распределяется по ассимилирующей поверхности ценоза. Диффузный свет более эффективен, чем прямой, так как лучше распределяется в ценозе.

Интенсивность вертикального света резко падает после прохождения света через лист. Верхний лист получит 100 % света, следующий за ним 20 %, третий лист – только 4 %. Обеднение спектрального состава света еще более существенно. При искусственном освещении целесообразно располагать источники излучения так, чтобы излучение падало на ценозы под определенными углами. Энергетическая эффективность фитоценоза [19] или КПД фитоценоза позволяют соотнести количество света на площадь фитоценоза и полученную биомассу растений.

Считается, что белый солнечный свет является лучшим освещением, поскольку филогенетическое развитие растений происходило на нем, растения лучше к нему приспособлены. Чем ближе спектральный состав излучателей к естественному спектру, тем выше эффективность фитоценоза. Однако универсальность и эффективность часто не совпадают, поэтому белый свет не может обеспечить максимальную продуктивность любых растений. И.И. Свентицкий предложил метод определения универсального спектра ФАР, наиболее благоприятный для фотосинтеза абсолютного большинства зеленых растений. На рисунке 1 показан универсальный

спектральный состав света с интенсивностью от 10 Вт/м^2 до 30 Вт/м^2 , вызывающий максимальный фотосинтез в зеленом листе.

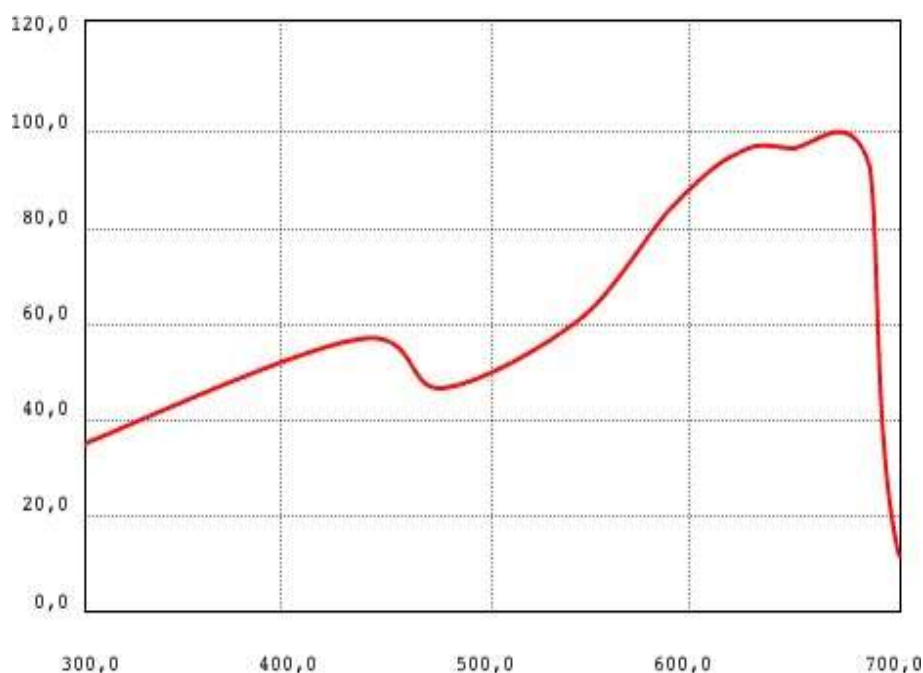


Рисунок 1 – Усредненная кривая фотосинтеза зеленого листа по McCree

Исследования на ценозах показывают, что у растений разных видов различны требования к оптимальному сочетанию спектральных и энергетических характеристик светового режима. Критерием оценки оптимального сочетания стала реакция растений на долю красного света в спектре. Это позволило разделить растения на три группы. Растения первой группы, например, огурец, могут погибнуть при длительном воздействии интенсивного красного света. Растения второй группы, например, томат, дают максимальный урожай. Растениям третьей группы нужны лучи белого света [20].

Если рассматривать вопрос, каким должно быть соотношение ФАР/ИК радиации для обеспечения максимальной продуктивности растений, то известно, что в пределах от 20 % до 50 % от общего излучения инфракрасной радиации не влияет существенно на урожай, но сильно изменяет сроки вегетации. Доля ИК радиации от 50 % до 60 % повышает выход урожая при

минимальных сроках вегетации. Превышение доли ИК радиации выше 60 % снижает урожайность, а снижение ниже 20 % сильно удлиняет сроки вегетации. С ростом уровня облученности ФАР рекомендуется снижать долю ИК радиации. Ближнее ИК излучение (от 750 до 1200 нм) слабо поглощается водой и тканями листа. Излучение в диапазоне от 1200 до 1600 нм сильно поглощается водой, а, следовательно, и тканями листа.

Растения, как живой организм, приспосабливаются к условиям среды, и их оптические свойства могут со временем меняться. В условиях светокультуры растения могут расти как в направленном, так и в диффузном световом потоке. Диффузное излучение называют объемным (например, свет при равномерном облачном небе или свет через матовое стекло). Для получения диффузного света используют переизлучающую или рассеивающую поверхность. У растений чувствительны к свету не только листья, но и стебли. Листья верхних ярусов получают прямой свет, а листья внутри ценоза находятся частично или полностью в тени и получают менее интенсивное диффузное облучение с измененным спектральным составом (меньше синих и красных лучей и больше зеленых).

Обзор литературных источников показывает, что данных по воздействию света различного спектрального состава и интенсивности на культуры растений (в том числе картофеля) недостаточно и требуются дальнейшие исследования. Тем более это актуально становится в связи с тем, что, благодаря развитию науки и техники, на рынок выходят новые источники освещения.

1.1.1 Краткий обзор наиболее распространенных типов источников освещения для выращивания растений в условиях культуры

В настоящее время светотехническая промышленность, как отечественная, так и зарубежная, выпускает широкий ассортимент ламп, которые можно использовать для выращивания растений, однако спектр их излучения имеет ограниченную область. В технологии выращивания растений спектральный состав света принято выражать по содержанию в нем

тех волн, которые оказывают наибольшее физиологическое воздействие на растения.

При выращивании растений в закрытых системах важным является обеспечение оптимального спектрального состава освещения с минимальными затратами энергии. На рисунке 2 можно увидеть спектр поглощения фотосинтетически активной радиации растениями [21]. Чем точнее система освещения воспроизводит этот спектр с минимальными затратами энергии, тем она эффективнее и экономически целесообразнее.

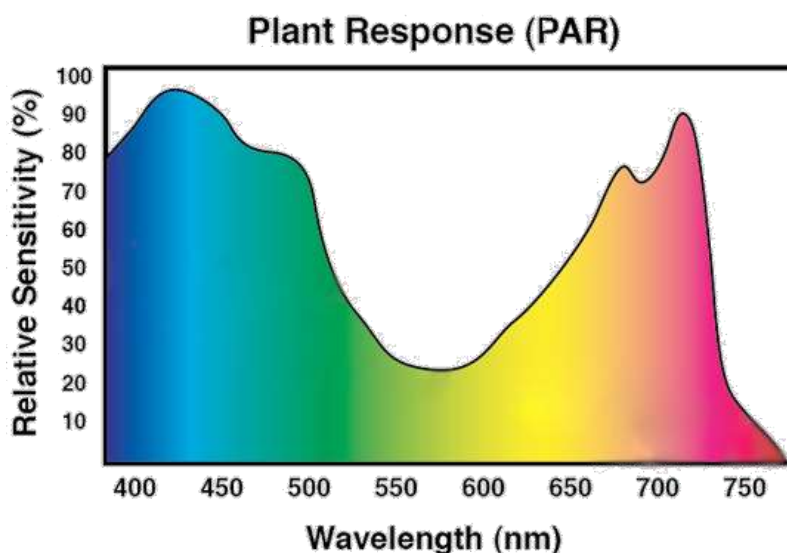


Рисунок 2 – Спектр действия фотосинтетически активной радиации

Массовое применение в текущий момент имеют натриевые газоразрядные лампы (спектр натриевой газоразрядной лампы показан на рисунке 3). Их спектр сильно смещен в красную зону и содержит элементы, которые не используются растениями [22], что сказывается на эффективности по энергозатратам. Один из основных недостатков этих ламп – невозможность регулировки мощности и точечный тип излучения, который приводит к неравномерному распределению света между растениями. Достоинство этих ламп – низкая стоимость.

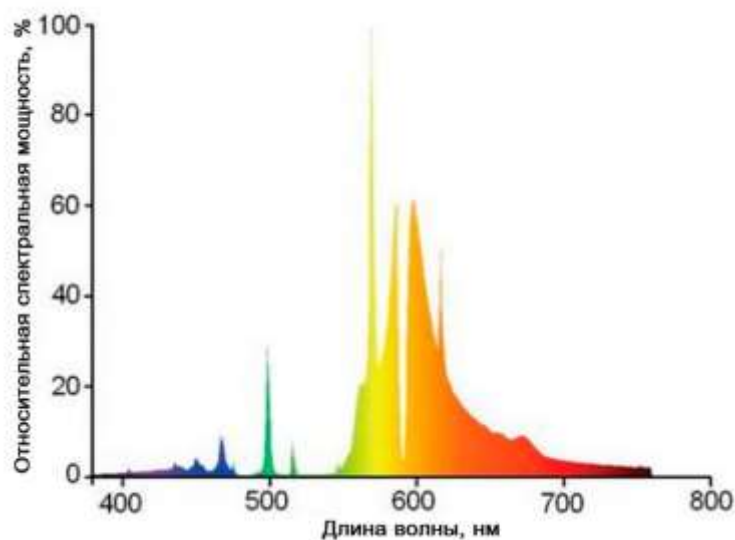


Рисунок 3 – Спектр натриевой газоразрядной лампы

Вторые по популярности в производстве лампы люминесцентные. Спектр люминесцентной лампы показан на рисунке 4 [23]. Их недостаток – очень маленькая эффективная зона работы от лампы.

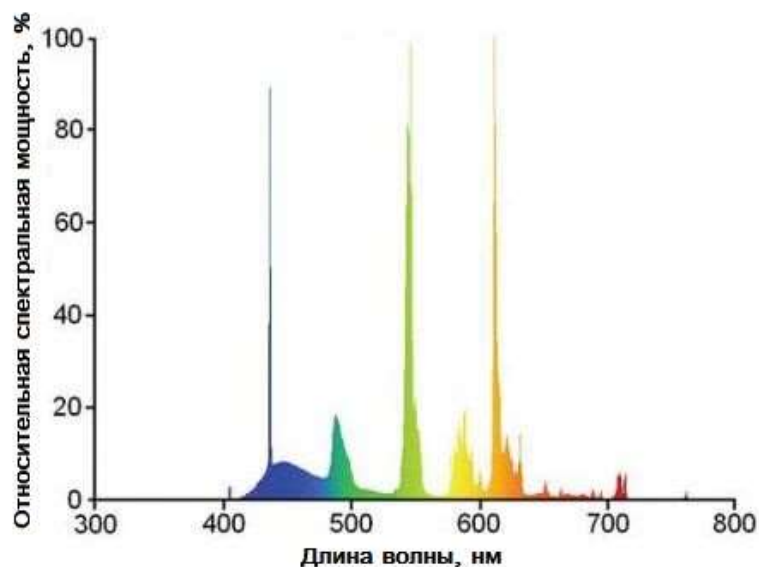


Рисунок 4 – Спектр люминесцентной лампы

Люминесцентные лампы представляют собой стеклянные трубки, по торцам которых расположены специальные цоколя. Сама трубка наполнена газом – люминофором. Он светится под воздействием ультрафиолетового излучения разряда. Соответственно, чем больше размер трубки, тем больше

мощность лампы. Мощность ламп российского и европейского производства отличаются. Например, лампа, изготовленная в РФ, имела мощность 20 Вт, в то время как лампы Philips или Osram этого же типа размера имели мощность 18 Вт. Так и с остальными мощностями 40 Вт и 36 Вт, 58 Вт и 80 Вт.

Люминесцентная лампа в 20 Вт дает освещенность как лампа накаливания 100 Вт. Это одна из причин доминирования этого вида ламп, их экономичность. К экономичности можно отнести их длительный срок службы, который может составлять от 2000 до 20000 часов в отличие 1000 часов обычных лампы накаливания. Люминесцентный источник света может иметь разные оттенки свечения, которые меняют восприятие. От желтого, который часто называют «теплым», до голубого, который называют «холодным» светом. Цветовую передачу ламп измеряют в кельвинах, люминесцентные лампы варьируются от 1800 К до 16000 К.

Люминесцентные фотолампы особенно сильны в синей и красной области спектра и прекрасно сопровождает фитобиологические процессы растения. По словам производителей, использование ламп Fluora помогает растениям оставаться здоровыми и ускоряет рост растений.

Плюсы люминесцентных ламп:

- Высокий КПД.
- Различные спектры свечения.
- Наличие цветных ламп.
- Наличие специальных ламп (бактерицидных, ультрафиолетовых).
- Длительный срок службы.

Минусы люминесцентных ламп:

- Использование химически-вредных веществ (затраты на утилизацию).
- Обязательное наличие дроссельного аппарата для запуска лампы.
- Возможное мерцание при использовании ЭмПРА (при использовании ЭПРА мерцания отсутствуют).

Обычные источники света сориентированы на чувствительность человеческого глаза и содержат в основном зелёный и желтый свет, практически бесполезный для растений. Нужного же спектра в обычных лампах содержится очень мало, и для получения необходимого уровня освещения приходится увеличивать мощность всего светового потока. При этом не только от 40 % до 60 % светового потока составляют ненужные спектры, но и в растительных спектрах наблюдается дисбаланс, что сказывается на развитии растения в целом. Поэтому использование распространенных источников света для искусственного освещения, либо досветки растений часто не приносит желаемого результата, требуя при этом больших расходов на электроэнергию.

Использование же люминесцентных ламп дает в растениеводстве наилучшее соотношение цена – качество [24].

Последние разработки в светодиодной отрасли позволили производить недорогие, яркие, с большим сроком службы источники фитосвета. Большим преимуществом светодиодных источников является возможность получения монохроматического излучения в фитоактивной части спектра. Привлекательность светодиодов для выращивания растений в помещениях обусловлена многими факторами. Среди них: низкая электрическая мощность, отсутствие балласта, низкое тепловыделение, что позволяет устанавливать светодиоды вплотную к растениям без риска повредить их. Также необходимо отметить, что использование светодиодов снижает испарение, приводя к удлинению периодов между поливами.

Существует несколько активных участков спектра: для хлорофилла и каротиноидов. Поэтому в светодиодном светильнике могут сочетаться несколько цветов, перекрывающих эти фитоактивные участки [25].

Рекомендации по оптимальному сочетанию светодиодов сильно разнятся. Например, в одном из источников, для максимизации роста и здоровья растений рекомендуется следующая пропорция «12 красных

светодиодов с длиной волны 660 нм плюс 6 оранжевых светодиодов с длиной волны 612 нм и один синий светодиод с длиной волны 470 нм» [26].

Также имеются публикации, в которых на период вегетативного роста рекомендуется отдавать приоритет светодиодам синего цвета (с длиной волны в районе середины спектра: от 400 до 500 нм). Для роста плодов и цветов рекомендуется увеличить долю светодиодов глубоко красного оттенка (с длиной волны около 660 нм). Следует отметить, что точность при выборе длины волны красных светодиодов более важна, нежели при выборе светодиодов синего спектра. Стандартные красные светодиоды с длиной волны 630 нм неэффективны [27].

Красные фитосветодиоды имеют багряное, бархатистое свечение. Исследования показали полезность дополнительной подсветки растений светодиодами инфракрасного и ультрафиолетового спектра. При смешении красного и синего света получается свет пурпурного (розового) оттенка. Зелёный свет при искусственном освещении растений может применяться в эстетических целях для нейтрализации неприятного для глаз пурпурного свечения фитосветодиодов или для облегчения визуального контроля зеленых побегов и состояния почвы, поскольку глаз человека лучше всего различает детали именно в зелёной части спектра. Фотосинтетическая эффективность зелёного света крайне низка ввиду высокой степени отражения лучей данного спектра хлорофиллом [28].

Мощность светодиодов, получаемых по старой технологии, составляла сотые доли ватта, что не позволяло эффективно заменять ими газоразрядные лампы. Современные усовершенствованные светодиоды и светодиодные матрицы обладают мощностью, исчисляемой десятками и даже сотнями ватт, что делает их достойной альтернативой газоразрядным лампам. Мощность и эффективность фитосветодиодов продолжает расти. Светодиоды предыдущего поколения были мощностью 1 Вт. Сейчас в фитосветильниках широко используются светодиоды мощностью 3 Вт и 5 Вт. С ростом спроса на светодиоды «растительного спектра» появились в продаже более удобные

при сборке светильников комбинированные светодиоды (Mix Color), у которых в одном корпусе установлены сразу несколько отдельных излучающих кристаллов с разными длинами волн, например, 660 нм и 445 нм в пропорциях 2:1 или 1:2, а также светодиоды «полного спектра» (full spectrum), в которых благоприятный для роста растений спектр достигается за счет применения специального люминофора.

Плюсы светодиодных ламп:

- В светодиоде, в отличие от лампы накаливания или люминесцентной лампы, электрический ток преобразуется непосредственно в световое излучение, и теоретически это можно сделать почти без потерь. Действительно, светодиод (при должном теплоотводе) мало нагревается, что делает его незаменимым для некоторых приложений. Светодиод излучает в узкой части спектра, его цвет чист, а УФ- и ИК-излучения, как правило, отсутствуют.

- Светодиод механически прочен и исключительно надежен, его срок службы может достигать 100 тысяч часов, что почти в 100 раз больше, чем у лампочки накаливания, и в 10 раз больше, чем у люминесцентной лампы.

- Светодиод – низковольтный электроприбор, а стало быть, безопасный.

В последнее время получила развитие новая технология производства светодиодных ламп повышенной мощности – «многочисленные кристаллы на плате» – COB (chip-on-board) [29].

Спектр полноспектрального светодиода показан на рисунке 5. Использование полноспектрального светодиодного освещения позволяет резко сократить энергозатраты в силу высокой светоотдачи, отсутствия в спектре излучения составляющих, мало влияющих на рост растений, длительного рабочего ресурса и возможности регулирования потребляемой мощности. Полноспектральный светодиод излучает около 17 % света синего спектра и около 65 % света красного спектра, 10 % желто-зеленого. Один из недостатков подобного типа ламп – это высокая стоимость. Но она компенсируется их

большей эффективностью, возможностью управления мощностью излучения, равномерным распределением светового потока. Использование таких ламп весьма перспективно в растениеводстве, в том числе и для выращивания картофеля *in vitro*, но требует отдельного изучения [30].

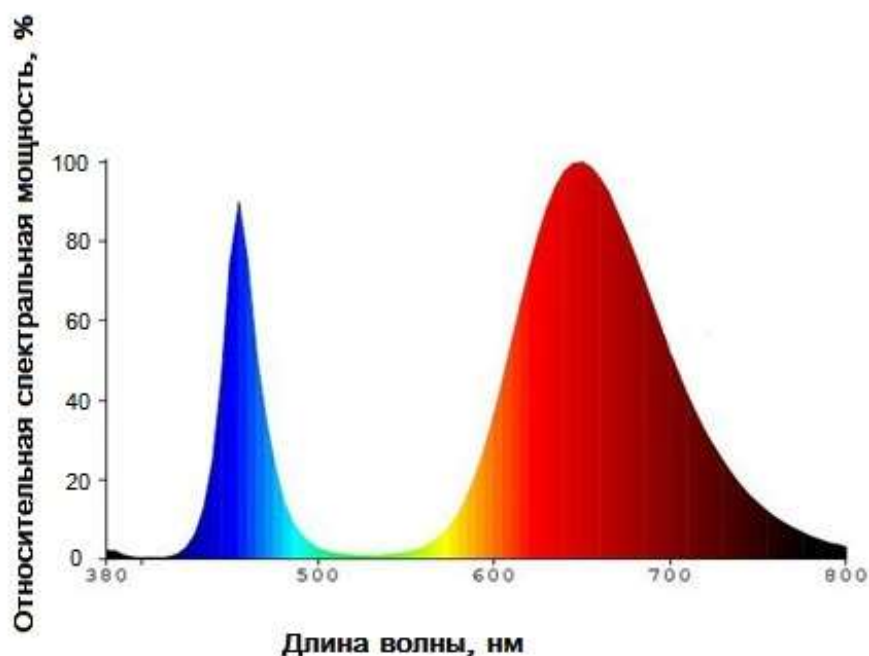


Рисунок 5 – Спектр полноспектрального светодиода

1.2 Фотопериодизм картофеля

Фотопериодизм картофеля относится к числу его важнейших физиологических свойств, поскольку от него зависит не только воспроизведение семенами, но и размножение клубнями. При интродукции картофеля из низких широт в условия длинного дня высоких широт проявляется особенность его фотопериодической реакции, которая заключается в различных требованиях соотношения длины дня и ночи для процессов цветения и клубнеобразования. Так, все виды картофеля, происходящие даже из экваториальных стран, проявили способность к образованию генеративных органов в условиях длинного дня. В то же время уменьшение длины дня при выращивании картофеля стимулирует у него клубнеобразование, способствует более раннему созреванию и увеличивает урожай клубней на единицу листовой поверхности. Часть видов картофеля

способна образовывать клубни только при укороченном дне. Это явление объясняется различной направленностью метаболизма картофеля, при которой у него в условиях длинного дня преобладают процессы роста, а в условиях короткого дня – процесс клубнеобразования. От преобладания роста или клубнеобразования зависят в свою очередь процессы цветения и созревания картофеля. Влияние фотопериода на рост главного побега картофеля имеет ту особенность, что в первые фазы его роста удлинению стебля способствует короткий день, а спустя от 2 до 3 недель после всходов фотопериодический оптимум перемещается в условия длинного дня. Фотопериодическая отзывчивость различных видов в течение вегетации зависит от их видовых особенностей. Часть видов (например, *S. tarijense*, *S. kesselbrenneri*, *S. stoloniferum*) имеет более длинный период положительной реакции на укороченный день, и у них наибольшее удлинение стебля в условиях непрерывного освещения наступает позже, чем у *S. tuberosum* и *S. andigenum*, а большинство высокогорных розетковидных видов образует стебель наибольшей длины в условиях от 14 до 18-часового дня [31].

Количество листьев и побегов ветвления увеличивается с увеличением продолжительности дневного освещения; условия короткого дня способствуют формированию более массивных листьев с широкими долями и в ряде случаев менее рассеченных, чем в условиях длинного дня.

Столону картофеля испытывают то же фотопериодическое воздействие, что и надземные побеги, с той разницей, что начальное отрастание столонов не зависит от фотопериода и целиком определяется свойствами вида.

У большинства южноамериканских видов длинный день стимулирует образование столонных побегов. Это позволяет различать виды *S. andigenum* и *S. tuberosum* при выращивании их в условиях длинного дня (искусственного или естественного).

Наиболее благоприятным для роста стебля, листьев, столонов и генеративных органов картофеля является 14-часовой день.

Как правило, короткий день (менее 13 часов) резко тормозит цветение картофеля, однако ряд видов (например, *S. polyadenum*, *S. brachycarpum*, *S. tarijense*, *S. phureja*, *S. maglia*) отличается способностью к достаточно интенсивным процессам роста и цветения и в условиях короткого дня. Поскольку все виды картофеля цветут в условиях длинного светового периода, вплоть до непрерывного дня, работу по скрещиванию картофеля можно проводить в условиях естественной длины дня. Резкий переход от длинного дня к короткому, который имеет место при первоначальном подращивании растений в условиях, способствующих росту, а затем в условиях, способствующих клубнеобразованию, действует на виды картофеля по-разному.

У видов серий *Oxycarpa*, *Acaulia*, *Circaefolia*, *Cuneoalata* и большинства видов серий *Demissa*, *Glabrescentia* и *Transaequatorialia* происходит торможение процессов роста и цветения, в то время как виды серий *Bulbocastana*, *Pinnatisecta*, *Polyadenia* и *Tarijensa* еще долгое время продолжают расти и образовывать цветки.

При естественном переходе от длинного весенне-летнего дня к укороченному осеннему целый ряд видов обнаруживает способность к продолжению цветения даже в октябре и ноябре при 9-часовой длине дня в этот период года. К ним относятся: *S. morelliforme*, *S. clarum*, *S. bulbocastanum*, *S. cardiophyllum*, *S. michoacanum*, *S. moscopanum*, *S. bukasovii*, *S. multidissectum*, *S. ayacuchense*, *S. phureja*, *S. trigalense*, *S. cuevoanum*, *S. commersonii*, *S. maglia*, *S. ehrenbergii*. У большинства этих видов процесс ягодообразования сдвигается, несмотря на раннее зацветание, на позднеосенний короткодневный период, наиболее соответствующий световым условиям в период ягодообразования на родине этих видов.

Реакция на клубнеобразование при более коротком дне сложилась у многих видов картофеля как филогенетический признак. Этот признак обуславливается тем, что большинство видов картофеля происходит из горных местообитаний экваториальных и приэкваториальных широт с

наивысшей длиной дня в период вегетации 14 часов, уменьшающейся к моменту начала клубнеобразования до 10 или 11 часов [32].

Наибольшую приспособленность к световым условиям высоких широт северного полушария показали виды серии *Tuberosa*, произрастающие на родине в Чили до 44° ю. ш. в условиях крайне небольшой высоты над уровнем моря и сравнительно длинного дня.

Оптимальной для клубнеобразования горных видов из местообитаний, близких к экватору, оказалась длина дня, равная от 12 до 12,5 часам. С увеличением длины дня растения многих видов картофеля резко сокращают число закладываемых клубней.

Фотопериодические условия влияют не только на рост и развитие картофеля, но и в известной степени определяют его иммунитет. Так, поражаемость картофеля вирусами проявляется сильнее в условиях длинного дня, на основании чего разработаны рекомендации при их определении методом индексации в зимнее время создавать растениям условия 16-часового дня. Устойчивость сортов картофеля к фитофторе понижается при укорочении дня. Этому можно найти объяснение в том, что возбудитель болезни – гриб *Phytophthora infestans* de Bary формировался в условиях короткого дня Мексики и в свою очередь проявляет определенную фотопериодическую отзывчивость.

Проблема клубнеобразования у картофеля, по мнению многих исследователей, является одним из самых неразгаданных и увлекательных вопросов физиологии растений. И если в настоящее время накоплено достаточно данных, показывающих, что эти явления в значительной мере регулируются факторами внешней среды, среди которых особенно важную роль играют фотопериод и температура, то проблема механизмов клубнеобразования, проблема ростовых веществ-регуляторов изучены еще очень мало.

В условиях длинного и короткого дня большинство видов картофеля формирует соответственно позднеспелый и раннеспелый типы, первый из

которых энергично растет и цветет весь период вегетации, обнаруживая слабое клубнеобразование лишь в самом ее конце, а второй имеет полурозеточный куст, не цветет и, образовав клубни, рано отмирает. Это явление связывают с выработкой картофелем эндогенных гиббереллинов, содержание которых в условиях короткого дня минимально и увеличивается по мере увеличения длины дня [33, 34].

2 Материалы и методы

Работа проводилась в 2023 году. Объект эксперимента – оздоровленные материнские микроклоны картофеля *Solanum tuberosum* L. сорта Ариэль, культивированные с использованием разных источников освещения и при различной продолжительности освещения.

Сорт Ариэль – среднеранний, столового назначения. Растение средней высоты, листового типа, полупрямостоячее. Лист среднего размера до крупного, промежуточный, зелёный. Венчик среднего размера. Интенсивность антоциановой окраски внутренней стороны венчика средняя до сильной. Товарная урожайность от 304 до 533 ц/га, от 113 до 129 ц/га выше стандартов Ирбитский, Невский. Максимальная урожайность составляет 662 ц/га, на 350 ц/га выше стандарта Инноватор (Ивановская обл.). Клубень овальный с глазками средней глубины. Кожура жёлтая. Мякоть кремовая. Масса товарного клубня от 106 до 235 г. Содержание крахмала от 14,3 % до 18,5 %. Вкус хороший и отличный. Товарность от 88 % до 92 %. Лёжкость составляет 96 %. Устойчив к возбудителю рака картофеля, золотистой картофельной цистообразующей нематоды. По данным ВНИИ фитопатологии, умеренно устойчив к возбудителю фитофтороза по ботве и умеренно восприимчив по клубням. По данным оригинатора, устойчив к полосчатой мозаике.

Используемые методы:

- Метод культивирования растений на искусственных питательных средах.
- Метод микрочеренкования растений картофеля.
- Методы статистической обработки материала: критерий Манна-Уитни с использованием пакета прикладных программ Statistica 10.0.

Схема эксперимента 1 по изучению влияния различных источников освещения на рост и развитие оздоровленных микрорастений картофеля *in vitro*:

1. Люминесцентные лампы, холодный дневной свет (контроль).
2. Люминесцентные фитолампы Fluora с преобладающей составляющей красного и синего цветов.
3. Линейные светодиодные лампы 3000 К, теплый белый свет.
4. Линейные светодиодные лампы 4200 К, холодный белый свет.
5. Современные светодиодные лампы красно-синие, соотношение диодов 3:1.
6. Современные светодиодные лампы полноспектральные.

Состав питательной среды, используемой в 1 и 2 экспериментах, приведен в таблице 2.

Схема эксперимента 2 по изучению воздействия разных режимов освещения на рост и развитие оздоровленных микрорастений картофеля *in vitro*:

1 вариант – источник освещения: люминесцентные лампы, холодный дневной свет, фотопериод: 16/8 часов свет/темнота.

2 вариант – источник освещения: люминесцентные лампы, холодный дневной свет, фотопериод: 8/16 часов свет/темнота.

Перед закладкой опытов все микрорастения картофеля прошли диагностику методом ПЦР в реальном времени в лаборатории по диагностике и контролю качества семенного картофеля. Для ускорения процесса приготовления питательной среды готовили концентрированные растворы макро, микросолей, витаминов и фитогормонов. Все концентрированные растворы необходимых элементов помечали этикеткой и хранили в холодильнике.

Таблица 2 – Состав питательной среды для выращивания оздоровленных микрорастений картофеля, мг/л

№	Наименование	Среда МС
Макросоли		
1	NH_4NO_3	825
2	KNO_3	950
3	$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	220
4	$\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	185
5	KH_2PO_4	85
Микросоли		
1	H_3BO_3	3,1
2	$\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	11,15
3	$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0,0125
4	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	4,3
5	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0,0125
6	$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,125
7	KI	0,415
Хелат железа		
1	$\text{Fe}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	13,9
2	$\text{Na}_2\text{-ЭДТА} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	18,65
Витамины		
1	Тиамин - HCl	2,5
2	Пиридоксин - HCl	5
3	АС-К	2,5
Органические вещества		
1	Сахароза	30 000
2	Агар-агар	7 000

Во время 1 эксперимента черенки картофеля культивировали при температуре от плюс 20 °С до плюс 22 °С, с фотопериодом 16/8 часов свет/темнота, в пробирках в течение 28 суток, освещенность секции 5 тыс. люкс.

Во 2 эксперименте черенки картофеля культивировали при температуре от плюс 20 °С до плюс 22 °С, с фотопериодом 16/8 часов свет/темнота и 8/16 часов свет/темнота соответственно, в течение 28 суток, освещенность секции 5 тыс. люкс.

Повторность трехкратная. В течение опыта на 3, 7, 14, 21 и 28 сутки измеряли показатели, характеризующие развитие растений: длина растения,

наличие корня, количество листьев и междоузлий на одно растение. На 28 сутки проводилось измерение массы корневой системы, побега, листьев, стебля.

Появление корней определяли визуально через определённые промежутки времени. Высоту измеряли мерной линейкой от основания растения до верхней точки роста. Количество листьев определяли путем пересчета их на одном пробирочном растении. Массу растений с листьями, массу листьев и массу корней определяли путем взвешивания на лабораторных весах (рисунки 6 и 7).

Для статистической обработки результатов использовался пакет программ для Windows Statistica 10.0. Для сравнения численных значений показателей использовался непараметрический критерий Манна-Уитни.

Технические характеристики использованных в первом эксперименте источников освещения представлены в таблице 3. Нумерация в таблице соответствует схеме эксперимента.

Таблица 3 – Технические характеристики ламп различного типа

Тип лампы	Спектр, нм	Световой поток, Лм	Потребляемая мощность, Вт
1	400–500 520–550 570–630	2 500	36
2	400–500 550–600	1 400	36
3	400–490 500–680	1 800	18
4	400–490 500–680	1 800	18
5	420–480 620–680	4 000	32
6	360–400 420–500 560–800	5 000	42



Рисунок 6 – Процесс измерения биомассы микрорастений



Рисунок 7 – Процесс измерения биомассы микрорастений

3 Результаты исследований

В данном разделе представлены результаты изучения влияния различных источников и продолжительности освещения на рост и развитие микрорастений картофеля сорта Ариэль, а также расчет экономической эффективности применения изучаемых вариантов освещения.

3.1 Изучение влияния различных источников освещения на рост и развитие микрорастений картофеля сорта Ариэль *in vitro*

Приживаемость растений во всех вариантах составила 100 % (приложение А).

Результаты изучения влияния различных источников освещения на ростовые показатели растений на различных сроках их выращивания приведены в таблице 4.

В таблице 4 и далее изучаемые варианты источников освещения пронумерованы следующим образом:

1. Люминесцентные лампы, холодный дневной свет (контроль).
2. Люминесцентные фитолампы Fluora с преобладающей составляющей красного и синего цветов.
3. Линейные светодиодные лампы 3000 К, теплый белый свет.
4. Линейные светодиодные лампы 4200 К, холодный белый свет.
5. Современные светодиодные лампы красно-синие, соотношение диодов 3:1.
6. Современные светодиодные лампы полноспектральные.

Таблица 4 – Влияние различных режимов освещения на показатели развития микрорастений картофеля сорта Ариэль на разных сроках выращивания

Показатель	Вариант опыта	Сутки				
		3	7	14	21	28
Высота, см	1 (контроль)	0,17±0,02	0,56±0,05	3,08±0,20	5,15±0,30	7,27±0,34
	2	0,14±0,02	0,56±0,04	3,73±0,24*	6,03±0,31*	7,64±0,24
	3	0,14±0,02	0,48±0,04	3,09±0,25	6,16±0,31*	8,52±0,29**
	4	0,21±0,01*	0,53±0,05	3,78±0,20*	5,92±0,22*	7,11±0,18
	5	0,17±0,02	0,45±0,04	2,69±0,23	4,78±0,25	6,10±0,22*
	6	0,19±0,01	0,58±0,05	3,71±0,21	5,50±0,24	6,61±0,27*
Число междоузлий, шт.	1 (контроль)	0,25±0,06	1,12±0,08	2,56±0,12	3,81±0,17	5,56±0,19
	2	0,43±0,13	1,48±0,14	2,66±0,10	4,71±0,27*	6,44±0,17**
	3	0,12±0,05	0,90±0,07*	2,50±0,11	4,04±0,14	6,29±0,17**
	4	0,16±0,05	1,02±0,06	2,77±0,12	3,85±10	6,37±0,20*
	5	0,10±0,04	1,04±0,08	2,52±0,13	3,92±0,18	5,66±0,24
	6	0,21±0,06	1,04±0,07	3,19±0,16**	3,73±0,14	5,87±0,22
Число листьев, шт.	1 (контроль)	0,91±0,17	2,43±0,14	4,73±0,13	6,98±0,21	7,96±0,14
	2	0,48±0,12*	1,62±0,13***	4,64±0,12	6,04±0,28**	8,08±0,17
	3	0,69±0,14	2,17±0,14	4,48±0,13	6,79±0,21	7,89±0,17
	4	0,81±0,16	2,20±0,13	4,62±0,13	6,81±0,21	7,87±0,17
	5	0,58±0,14	2,29±0,12	4,52±0,13	6,75±0,22	7,72±0,20
	6	0,83±0,17	2,54±0,11	5,52±0,17***	6,79±0,21	7,54±0,19
Число растений с появившимися корнями, шт.	1 (контроль)	0	36	48	48	48
	2	1	20	47	48	48
	3	0	23	48	48	48
	4	0	40	48	48	48
	5	0	33	47	47	48
	6	0	37	47	47	48

Примечания - * – отличия достоверны с $p < 0,05$ по сравнению с вариантом 1; ** – отличия достоверны с $p < 0,01$ по сравнению с вариантом 1; *** – отличия достоверны с $p < 0,001$ по сравнению с вариантом 1

В таблице 5 приведена информация о влиянии источников на морфологические показатели микрорастений картофеля на 28 сутки выращивания.

Таблица 5 – Влияние различных источников освещения на морфологические показатели микрорастений сорта Ариэль на 28 день выращивания

Вариант опыта	Масса листьев, г	Масса стебля, г	Масса побега, г	Масса корневой системы, г	Длина корневой системы, см
1 (контроль)	0,10±0,00	0,07±0,00	0,18±0,00	0,16±0,02	7,68±0,34
2	0,10±0,01	0,09±0,01*	0,19±0,01	0,10±0,01**	7,51±0,34
3	0,13±0,01*	0,13±0,01**	0,25±0,01**	0,08±0,01**	6,12±0,39**
4	0,15±0,01**	0,09±0,00**	0,24±0,01**	0,11±0,01*	8,25±0,37
5	0,13±0,01	0,11±0,01**	0,24±0,01**	0,14±0,01	8,47±0,48
6	0,10±0,01	0,08±0,00	0,19±0,01	0,18±0,01*	8,51±0,35
Примечания – * – отличия достоверны с $p < 0,05$ по сравнению с вариантом 1; ** – отличия достоверны с $p < 0,01$ по сравнению с вариантом 1					

Как видно из таблиц 4 и 5, использование для выращивания оздоровленных микрорастений картофеля сорта Ариэль люминесцентных фитоламп Fluora привело к увеличению высоты растений на 21 % на 14 сутки выращивания и на 17 % на 21 сутки выращивания; увеличению числа междоузлий на 24 % (0,9 шт.) на 21 сутки выращивания и на 16 % (0,9 шт.) на 28 сутки выращивания по сравнению с контролем. Число листьев в данном варианте было снижено относительно контроля на 47 % на 3 сутки выращивания, на 33 % на 7 сутки выращивания и на 14 % на 21 сутки выращивания; масса стебля увеличена на 29 %, а масса корневой системы снижена на 38 % на 28 сутки выращивания.

Культивирование растений с использованием линейных светодиодных ламп теплого белого света вызвало увеличение длины микрорастений картофеля на 20 % на 21 сутки развития и на 17 % на 28 сутки развития, уменьшение числа междоузлий на 20 % (0,2 шт.) на 7 сутки развития и увеличение числа междоузлий на 13 % (0,7 шт.) на 28 сутки развития. При

этом масса побега на 28 сутки развития была увеличена на 39 % за счет увеличения массы листьев на 30 % и массы стебля на 86 %, а масса и длина корневой системы, напротив, снижена (на 50 % и 20 % соответственно).

Линейные светодиодные лампы холодного белого света вызвали у растений увеличение их длины на 24 % на 3 сутки выращивания, на 23 % на 14 сутки выращивания и на 15 % на 21 сутки выращивания. Число междоузлий в данном варианте было увеличено относительно контроля на 15 % (0,8 шт.) на 28 сутки выращивания. На 28 сутки выращивания наблюдалось увеличение массы побегов растений на 33 % относительно контроля за счет увеличения массы листьев на 50 % и массы стебля на 29 %, а также снижение массы корневой системы на 31 %.

Выращивание микрорастений картофеля под современными светодиодными красно-синими лампами с соотношением диодов 3:1 привело к уменьшению высоты растений на 16 % на 28 сутки развития с одновременным увеличением массы побегов растений на 33 % за счет увеличения массы стеблей на 57 % по сравнению с контролем.

Использование современных полноспектральных светодиодных ламп вызвало у культивируемых растений снижение общей высоты на 9 % на 28 сутки культивирования, увеличение числа междоузлий на 25 % (0,6 шт.) и числа листьев на 17 % на 14 сутки культивирования. На 28 сутки масса корневой системы растений в этом варианте была увеличена относительно контроля на 13 %.

3.2 Расчет экономической эффективности применения различных источников освещения

При расчете стоимости использования различных источников освещения учитывались следующие их характеристики: стоимость одной лампы, рекомендуемый срок эксплуатации, световой поток и потребляемая мощность. При расчете затрат на 1 месяц эксплуатации учитывалось разное количество ламп разного типа, необходимое для освещения одной секции экспериментального стеллажа в соответствии с требованиями методики

выращивания растений картофеля *in vitro* (5 тыс. люкс). Результаты расчета приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Расчет затрат на эксплуатацию ламп различного типа

Тип лампы	Стоимость, руб./1 шт.	Срок эксплуатации, час	Потребляемая мощность, Вт	Затраты на 1 месяц эксплуатации ламп для освещения 1 секции светового стеллажа площадью 0,455 м ² , руб.
1 (контроль)	136	13 000	36	838,83
2	1015	20 000	36	477,43
3	1087	50 000	18	233,48
4	1416	50 000	18	161,97
5	6 000	10 000	32	407,81
6	6 000	10 000	42	445,25

Таким образом, из данных таблицы 6 видно, что самыми дешевыми в эксплуатации для освещения одинаковой площади светового стеллажа являются линейные светодиодные лампы холодного белого света. Следует отметить, что все опытные варианты освещения оказались дешевле контрольного варианта.

3.3 Изучение воздействия разных режимов освещения на рост и развитие оздоровленных микрорастений картофеля *in vitro*

Приживаемость растений картофеля во всех вариантах опыта составила 100 % (приложение Б).

Результаты изучения влияния продолжительности освещения на ростовые показатели растений на различных сроках их выращивания приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Влияние различных режимов освещения на показатели развития микрорастений картофеля сорта Ариэль на разных сроках выращивания

Показатель	Вариант опыта	Сутки				
		3	7	14	21	28
Высота, см	1	0,46±0,02	1,08±0,07	5,30±0,27	9,21±0,42	10,85±0,50
	2	0,46±0,03	1,7±0,10***	6,99±0,42***	10,45±0,44**	12,03±0,44*
Число междоузлий, шт.	1	0,89±0,05	1,69±0,09	3,62±0,15	5,64±0,21	7,15±0,22
	2	0,73±0,07	1,88±0,11	3,64±0,14	5,46±0,19	7,55±0,22
Число листьев, шт.	1	2,31±0,10	3,82±0,11	5,62±0,14	7,22±0,19	9,20±0,22
	2	1,87±0,15*	1,88±0,11	5,47±0,17	7,13±0,19	9,51±0,23
Число растений с появившимися корнями, шт.	1	2	45	45	45	45
	2	12	44	45	45	45
Примечания – * – отличия достоверны с $p < 0,05$ по сравнению с вариантом 1; ** – отличия достоверны с $p < 0,01$ по сравнению с вариантом 1; *** – отличия достоверны с $p < 0,001$ по сравнению с вариантом 1						

В таблице 7 и далее изучаемые варианты продолжительности освещения пронумерованы следующим образом:

1 вариант – источник освещения: люминесцентные лампы, холодный дневной свет, фотопериод: 16/8 часов свет/темнота.

2 вариант – источник освещения: люминесцентные лампы, холодный дневной свет, фотопериод: 8/16 часов свет/темнота.

В таблице 8 приведена информация о влиянии различных режимов освещения на морфологические показатели микрорастений картофеля на 28 сутки выращивания.

Таблица 8 – Влияние различных режимов на морфологические показатели микрорастений сорта Ариэль на 28 день выращивания

Вариант опыта	Масса листьев, г	Масса стебля, г	Масса побега, г	Масса корневой системы, г	Длина корневой системы, см
1	0,09±0,01	0,12±0,02	0,21±0,02	0,02±0,00	4,53±0,43
2	0,07±0,01	0,10±0,01	0,17±0,02	0,02±0,00	4,97±0,41

Согласно данным таблиц 7 и 8, снижение продолжительности освещения (вариант 2) привело к увеличению высоты растений на 57 % на 7, на 32 % на 14, на 14 % на 21 и на 11 % на 28 сутки выращивания относительно стандартного (1) варианта. Во втором варианте на 3 сутки также было снижено количество листьев растений на 19 %, но данный эффект уже не отмечался на более поздних сроках развития.

Кроме того, микрорастения картофеля во 2 варианте имели светло-зеленую окраску, в отличие от 1 варианта, а также более удлинённые и скрученные листья (рисунок 8).



Рисунок 8 – 28-дневные микрорастения картофеля сорта Ариэль

3.4 Расчет экономической эффективности применения различных режимов освещения

При расчете стоимости использования различных режимов освещения учитывались следующие характеристики ламп: стоимость одной лампы, рекомендуемый срок эксплуатации, световой поток и потребляемая мощность, время работы ламп. При расчете затрат на 1 месяц эксплуатации учитывалось количество ламп, необходимое для освещения одной секции экспериментального стеллажа в соответствии с требованиями методики выращивания растений картофеля *in vitro* (5 тыс. люкс). Результаты расчета приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Расчет затрат на эксплуатацию ламп при различных вариантах продолжительности освещения

Вариант 1	Время работы, ч	Стоимость, руб./1 шт.	Срок эксплуатации, час	Потребляемая мощность, Вт	Затраты на 1 месяц эксплуатации ламп для освещения 1 секции светового стеллажа площадью 0,455 м ² , руб.
1	16	136	13 000	36	838,83
2	8	136	13 000	36	419,42

Таким образом, снижение продолжительности освещения растений привело к снижению затрат на эксплуатацию ламп.

4 Выводы

1. При использовании для выращивания оздоровленных микрорастений картофеля сорта Ариэль люминесцентных фитоламп Fluora относительного контрольного варианта наблюдалось увеличение высоты микрорастений на 21 % на 14 сутки выращивания и на 17 % на 21 сутки выращивания; увеличение числа междоузлий на 24 % (0,9 шт.) на 21 сутки выращивания и на 16 % (0,9 шт.) на 28 сутки выращивания; снижение числа листьев на 47 % на 3 сутки выращивания, на 33 % на 7 сутки выращивания и на 14 % на 21 сутки выращивания; увеличение массы стебля на 29 % и снижение массы корневой системы на 38 % на 28 сутки выращивания.

2. Культивирование растений с использованием линейных светодиодных ламп теплого белого света вызвало увеличение длины микрорастений картофеля сорта Ариэль на 20 % на 21 сутки выращивания и на 17 % на 28 сутки выращивания; уменьшение числа междоузлий на 20 % (0,2 шт.) на 7 сутки выращивания и увеличение числа междоузлий на 13 % (0,7 шт.) на 28 сутки выращивания; увеличение массы побега на 28 сутки выращивания на 39 % за счет увеличения массы листьев на 30 % и массы стебля на 86 %; снижение массы и длины корневой системы на 50 % и 20 % соответственно на 28 сутки выращивания.

3. Линейные светодиодные лампы холодного белого света вызвали у растений увеличение их длины на 24 % на 3 сутки выращивания, на 23 % на 14 сутки выращивания и на 15 % на 21 сутки выращивания; увеличение числа междоузлий на 15 % (0,8 шт.) на 28 сутки выращивания; увеличение массы побегов растений на 33 % за счет увеличения массы листьев на 50 % и массы стебля на 29 %, снижение массы корневой системы на 31 % на 28 сутки выращивания.

4. Выращивание микрорастений картофеля под современными светодиодными красно-синими лампами с соотношением диодов 3:1 привело к уменьшению высоты растений на 16 % на 28 сутки выращивания с

одновременным увеличением массы побегов растений на 33 % за счет увеличения массы стеблей на 57 %.

5. Использование современных полноспектральных светодиодных ламп вызвало у культивируемых растений снижение общей высоты на 9 % на 28 сутки выращивания, увеличение числа междоузлий на 25 % (0,6 шт.) и числа листьев на 17 % на 14 сутки выращивания; увеличение массы корневой системы на 13 % на 28 сутки выращивания.

6. При расчете затрат на эксплуатацию разных типов источников освещения было выяснено, что самыми дешевыми источниками освещения из изученных являются линейные светодиодные лампы холодного белого света.

7. Рекомендуется для выращивания оздоровленных микрорастений картофеля сорта Ариэль с целью быстрого получения большого количества растений в условиях *in vitro* использовать линейные светодиодные лампы холодного белого света, так как данные лампы являются самыми дешевыми в эксплуатации (в 5 раз дешевле контрольного варианта) и вызывают увеличение числа междоузлий в период готовности растений к очередному микрочеренкованию (28 сутки выращивания) на 15 %.

8. Снижение продолжительности освещения растений с 16 до 8 часов в сутки привело к увеличению высоты растений на 57 % на 7, на 32 % на 14, на 14 % на 21 и на 11 % на 28 сутки выращивания, а также к снижению количества листьев на 19 % на 3 сутки выращивания.

9. Затраты на эксплуатацию ламп при уменьшении продолжительности освещения с 16 до 8 часов в сутки снизились в 2 раза.

10. Рекомендуется для выращивания оздоровленных микрорастений картофеля сорта Ариэль с целью быстрого получения большого количества растений в условиях *in vitro* применять режим освещения растений 8 часов свет/16 часов темнота.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проводилось изучение влияния различных источников освещения и различных режимов освещения на рост и развитие оздоровленных микрорастений картофеля сорта Ариэль в лабораторных условиях *in vitro*. Приведены данные о влиянии данных факторов на высоту растений, количество междоузлий, количество листьев, ризогенез, массу корневой системы, побега, листьев и стебля. Рассчитана стоимость эксплуатации изучаемых ламп в представленных режимах для выращивания оздоровленных микрорастений картофеля. Показано, что лучшим из изученных вариантов источников освещения являются линейные светодиодные лампы холодного белого света, лучшим из изученных режимов освещения – режим освещения 8 часов свет/16 часов темнота. Разработаны 2 элемента технологии получения оздоровленного растительного материала картофеля в лабораторных условиях (приложения В, Г).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Федорова Ю.Н., Ковалев А.И. Оптимизация условий культивирования микрорастений картофеля российской селекции в условиях *in vitro* // Агрономия и биология. - 2014. - № 37. - С. 22-25.

2. Карначук Р.А., Дорофеев В.Ю., Медведева Ю.В. Фоторегуляция роста и продуктивности растений картофеля при размножении *in vitro* // VII Съезд общества физиологов растений России. Междунар. конф. «Физиология растений – фундаментальная основа экологии и инновационных биотехнологий». - Нижний Новгород, 2011. - С. 313-314.

3. Маляровская В.И., Коломиец Т.М., Соколов Р.Н., Самарина Л.С. Влияние спектрального состава света на рост и развитие *Lilium caucasicum* в условиях культуры *in vitro* // Научный журнал КубГАУ. - 2013. - № 94 (10). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-spektralnogo-sostava-sveta-na-rost-i-razvitie-lilium-caucasicum-v-usloviyah-kultury-in-vitro> (дата обращения 25.10.2023).

4. Головацкая И.Ф., Дорофеев В.Ю., Медведева Ю.В. и др. Оптимизация условий освещения при культивировании *Solanum tuberosum* L. микроклонов сорта Луговской *in vitro* // Вестник Томс. гос. ун-та. - 2013. - № 4 (24). - С. 133-144.

5. Aksenova N.P., Konstantinova T.N., Sergeeva L.I., Machachkova I., Golyanovskaya S.A. Morphogenesis of Potato Plant *in vitro*. I Effekt of light quality and hormones // J. Plant Growth Regul. - 2014. - V.13. - P. 143-146.

6. Шibaева Т.Г., Марковская Е.Ф. Влияние круглосуточного освещения на состояние фотосинтетического аппарата и рост растений огурца *Cucumis sativus* L. на ранних этапах онтогенеза // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. - 2012. - N. 2. - С. 162-166.

7. Никифоров С.Г. Разработка методик контроля деградации характеристик светодиодов на основе твердых растворов AlGaInP и AlGaInN: дис. ... канд. техн. наук. - Москва, 2006. - 195 с.

8. Коновалова И.О. Определение оптимальных параметров светодиодного освещения листовых овощных культур применительно к витаминной космической оранжерее: дис. ... канд. биол. наук. - Москва, ГНЦ РФ ИМБП РАН, 2016. - 177 с.

9. Кондратьева Н.П. Фомин Е.М., Кабанова И.Н. Дополнительное облучение при вегетативном размножении ремонтантной гвоздики / Сборник научных трудов МИИСП «Использование электроэнергии в с.х. и электроснабжение с.-х. районов». - М.: МИИСП им. В.П. Горячкина, 1984. - С. 58-61.

10. Бородин И.Ф., Кирилин Н.И. Практикум по основам автоматики и автоматизации производственных процессов. - М., «Колос», 1974. - 255 с.

11. Валеев Р.А., Кондратьева Н.П., Кондратьев Р.Г. Светодиодные облучательные установки для меристемных растений // Известия Международной академии аграрного образования (МАО). - 2013. - Вып. № 16 (1). - С. 23-25.

12. ГОСТ 16354-77. Лампы ртутные высокого давления общего назначения. Технические условия. - М: Стандартинформ, 1977. - 56 с.

13. Именков А.Н., Гребенщикова Е.А., Журтанов Б.Е., Данилова Т.Н., Сиповская М.А., Власенко Н.В., Яковлев Ю.П. Свойства светодиодов на основе GaSb с сетчатыми омическими контактами // Физика и техника полупроводников. - 2004. - Т. 38, вып. 2. - С. 1399-1407.

14. Изаков Ф.Я., Козинский В.А., Лукиенко Т.В., Шаповалов А.Т., Яснгов Г.А. Практикум по применению электрической энергии в сельском хозяйстве. - М., Колос, 1972. - 304 с.

15. Самойленко В.В. Технические средства снижения энергозатрат при реализации технологии переменного оптического облучения рассады овощных культур в теплицах: автореф. дис. ... канд. тех. наук. - Зеленоград, 2013. - 172 с.

16. Васильева Е.Д., Закгейм А.Л., Снегов Ф.М., Черняков А.Е., Шмидт Н.М., Якимов Е.Б. Некоторые закономерности деградации синих светодиодов на основе InGaN/GaN // Светотехника. - 2007. - №5. - С. 30-32.
17. Глухов И.В., Елисеев В.И. Высшие гармоники тока установок светоимпульсного облучения растений и способы их уменьшения // Зап. ЛенСХИ. - 1975. - Т. 258. - С. 23-31.
18. Вассерман А.Л. Ультрафиолетовые бактерицидные установки для обеззараживания воздушной среды помещений. - М.: Дом Света, 1999. - С. 15.
19. Вовденко К.П. Исследование изменения спектрального излучения аграрного светодиодного светильника в зависимости от изменения температуры окружающей среды // Аспекты современной науки. - 2012. - № 2. - С. 6-10.
20. Жилинский Ю.М., Кумин В.Д. Электрическое освещение и облучение. - М., Колос, 1982. - С. 268.
21. Фотосинтетически активная радиация [Электронный ресурс]. - URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения 25.10.2023).
22. Лампа ДнаТ 400 Sylvania Gro Lux [Электронный ресурс]. - URL: <https://agrolampa.ru/shop/lampy-dnat/natrievye-dnat/lampa-dnat-400--sylvania-gro-lux-400-vt/> (дата обращения 25.10.2023).
23. Освещение для теплиц [Электронный ресурс]. - URL: <http://infoelectrik.ru/sistema-osveshheniya/osveshhenie-dlya-teplic.html> (дата обращения 25.10.2023).
24. Тихомиров А.А., Шарупич В.П., Лисовский Г.М. Светокультура растений в теплицах // Издательство СО РАН. - Новосибирск, 2013. - 205 с.
25. Светокультура растений [Электронный ресурс]. - URL: <http://tehnovilla.sv19.com/?views=svetokult> (дата обращения 25.10.2023).
26. Бахарев И.А., Прокофьев А.Ю., Туркин А.Н., Яковлев А.А. Применение светодиодных светильников для освещения теплиц: реальность и перспективы // Аграрное обозрение. - 2011. - № 3. - С. 25-26.

27. Тимирязев К.А. Избранные сочинения в 4-х томах. Т. 1. Солнце, жизнь и хлорофилл. - М.: ОГИЗ–СЕЛЬХОЗГИЗ, 1948. - 695 с.
28. Светодиодное освещение для растений led-glow [Электронный ресурс]. - URL: [http:// www.led-glow.ru/](http://www.led-glow.ru/) (дата обращения 25.10.2023).
29. Cob лампы. Светодиоды типа COB [Электронный ресурс]. - URL: <https://euromodern.ru/cob-lampy-svetodiody-tipa-cob-organizaciya-vremennogo-osveshcheniya.html> (дата обращения 25.10.2023).
30. Светокультура растений [Электронный ресурс]. - URL: <http://tehnovilla.sv19.com/views=svetokult> (дата обращения 25.10.2023).
31. Дорошенко А.В., Разумов В.И. Фотопериодизм некоторых культурных форм в связи с их географическим происхождением // Тр. по прикл. бот., ген. и сел. - 1929. - Вып. 22 (1). - С. 219-273.
32. Бюннинг Э. Суточные ритмы и измерение времени при фотопериодических реакциях // Биологические часы. - М., 1964. - С. 409-421.
33. Головки Т.К., Табаленкова Г.Н., Маркаров А.М. Влияние фотопериода и хлорхолинхлорида на фотосинтетическую деятельность картофеля в связи с клубнеобразованием // Газообмен растений в природных фитоценозах. - Сыктывкар, 1992. - С. 20-22.
34. Иванова О.А. Особенности развития и клубнеобразования культурных и диких видов картофеля в условиях разной длины дня и температуры ночи // Тр. по прикл. бот., ген. и сел. - ВИР, 1974. - Т. 53 (1). - С. 148-162.
35. Анисимов Б.В., Сергачёва А.П., Акатьев В.Н. Схемы выращивания супер-суперэлиты при использовании оздоровленного семенного материала в первичном семеноводстве // Науч. труд. ВНИИКХ. - 1977. - Т. 30. - С. 35-41.
36. Анисимов Б.В., Сариев Г.М., Шакуров И.Ш. Мини-клубни: как лучше их использовать // Картофель и овощи. - 1998. - № 6. - С. 28.
37. Анисимов Б.В. Картофелеводство России: производство, рынок, проблемы семеноводства // Картофель и овощи. - 2000. - № 1. - С. 2-3.

38. Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Т.1. «Сорта растений» (официальное издание). - М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2018. - 508 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное)

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель НИР, ст. науч. сотр.

С.А. Сучкова С.А. Сучкова
« 09 » ноября 2023 г.

ПРОТОКОЛ МОРФОГЕНЕЗА РАСТЕНИЙ КАРТОФЕЛЯ IN VITRO ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ ЕГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ОСВЕЩЕНИЯ

Приживаемость микрорастений картофеля сорта Ариэль на всех изучаемых вариантах составила 100 %.

Таблица А.1 – Влияние различных источников освещения на показатели развития микрорастений картофеля сорта Ариэль на разных сроках выращивания

Показатель	Вариант опыта	Сутки				
		3	7	14	21	28
Высота, см	1	0,17±0,02	0,56±0,05	3,08±0,20	5,15±0,30	7,27±0,34
	2	0,14±0,02	0,56±0,04	3,73±0,24	6,03±0,31	7,64±0,24
	3	0,14±0,02	0,48±0,04	3,09±0,25	6,16±0,31	8,52±0,29
	4	0,21±0,01	0,53±0,05	3,78±0,20	5,92±0,22	7,11±0,18
	5	0,17±0,02	0,45±0,04	2,69±0,23	4,78±0,25	6,10±0,22
	6	0,19±0,01	0,58±0,05	3,71±0,21	5,50±0,24	6,61±0,27
Число междоузлий, шт.	1	0,25±0,06	1,12±0,08	2,56±0,12	3,81±0,17	5,56±0,19
	2	0,43±0,13	1,48±0,14	2,66±0,10	4,71±0,27	6,44±0,17
	3	0,12±0,05	0,90±0,07	2,50±0,11	4,04±0,14	6,29±0,17
	4	0,16±0,05	1,02±0,06	2,77±0,12	3,85±0,10	6,37±0,20
	5	0,10±0,04	1,04±0,08	2,52±0,13	3,92±0,18	5,66±0,24
	6	0,21±0,06	1,04±0,07	3,19±0,16	3,73±0,14	5,87±0,22
Число листьев, шт.	1	0,91±0,17	2,43±0,14	4,73±0,13	6,98±0,21	7,96±0,14
	2	0,48±0,12	1,62±0,13	4,64±0,12	6,04±0,28	8,08±0,17
	3	0,69±0,14	2,17±0,14	4,48±0,13	6,79±0,21	7,89±0,17
	4	0,81±0,16	2,20±0,13	4,62±0,13	6,81±0,21	7,87±0,17
	5	0,58±0,14	2,29±0,12	4,52±0,13	6,75±0,22	7,72±0,20
	6	0,83±0,17	2,54±0,11	5,52±0,17	6,79±0,21	7,54±0,19
Число растений с появившимися корнями, шт.	1	0	36	48	48	48
	2	1	20	47	48	48
	3	0	23	48	48	48
	4	0	40	48	48	48
	5	0	33	47	47	48
	6	0	37	47	47	48

Испытание выполнил(а):

науч. сотр.

науч. сотр.

науч. сотр.

А.И. Манукян

Д.А. Савельева

Е.В. Хаксар

ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное)

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель НИР, ст. науч. сотр.

С.А. Сучкова С.А. Сучкова
« 09 » *ноября* 2023 г.

ПРОТОКОЛ МОРФОГЕНЕЗА РАСТЕНИЙ КАРТОФЕЛЯ IN VITRO ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ ЕГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ ОСВЕЩЕНИЯ

Приживаемость микрорастений картофеля сорта Ариэль на всех изучаемых вариантах составила 100 %.

Таблица Б.1 – Влияние различных режимов освещения на показатели развития микрорастений картофеля сорта Ариэль на разных сроках выращивания

Показатель	Вариант опыта	Сутки				
		3	7	14	21	28
Высота, см	1	0,46±0,02	1,08±0,07	5,30±0,27	9,21±0,42	10,85±0,50
	2	0,46±0,03	1,7±0,10	6,99±0,42	10,45±0,44	12,03±0,44
Число междоузлий, шт.	1	0,89±0,05	1,69±0,09	3,62±0,15	5,64±0,21	7,15±0,22
	2	0,73±0,07	1,88±0,11	3,64±0,14	5,46±0,19	7,55±0,22
Число листьев, шт.	1	2,31±0,10	3,82±0,11	5,62±0,14	7,22±0,19	9,20±0,22
	2	1,87±0,15	1,88±0,11	5,47±0,17	7,13±0,19	9,51±0,23
Число растений с появившимися корнями, шт.	1	2	45	45	45	45
	2	12	44	45	45	45

Испытание выполнил(а): науч. сотр. *А.И. Манукян* А.И. Манукян
науч. сотр. *Д.А. Савельева* Д.А. Савельева
науч. сотр. *Е.В. Хаксар* Е.В. Хаксар

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

Элемент технологии получения оздоровленного растительного материала картофеля сорта Ариэль в лабораторных условиях № 1

Проблема обеспечения отечественных производителей картофеля качественным посадочным материалом очень актуальна. Без надлежащих мер по оздоровлению и защите семенного материала от повторного заражения число пораженных растений прогрессивно увеличивается, сорт постепенно теряет свою первоначальную продуктивность, вырождается и сходит с арены. В связи с этим в последнее время производство картофеля во всем мире переведено на безвирусную основу с использованием единственно эффективного в настоящее время метода апикальных меристем, который основан на выращивании растений из апикальных (верхушечных) зон делящихся клеток, свободных от вирусной и другой инфекции [35]. Именно картофель стал той сельскохозяйственной культурой, в отношении которой были впервые использованы биотехнологические методы для избавления посадочного материала от вирусов [36, 37].

Сегодня процесс семеноводства картофеля предполагает сочетание биотехнологических методов оздоровления растений на основе технологии культивирования *in vitro* апикальных меристем и стерильных растений с последующим выращиванием миниклубней в защищенных условиях.

Сорт Ариэль – среднеранний, столового назначения. Растение средней высоты, листового типа, полупрямостоячее. Лист среднего размера до крупного, промежуточный, зелёный. Венчик среднего размера. Интенсивность антоциановой окраски внутренней стороны венчика средняя до сильной. Товарная урожайность составляет от 304 до 533 ц/га, от 113 до 129 ц/га выше стандартов Ирбитский, Невский. Максимальная урожайность составляет 662 ц/га, на 350 ц/га выше стандарта Инноватор (Ивановская обл.). Клубень овальный с глазками средней глубины. Кожура жёлтая.

Мякоть кремовая. Масса товарного клубня от 106 до 235 г. Содержание крахмала от 14,3 % до 18,5 %. Вкус хороший и отличный. Товарность от 88 % до 92 %. Лёжкость 96 %. Устойчив к возбудителю рака картофеля, золотистой картофельной цистообразующей нематодой. По данным ВНИИ фитопатологии, умеренно устойчив к возбудителю фитофтороза по ботве и умеренно восприимчив по клубням. По данным оригинатора, устойчив к полосчатой мозаике [38].

Технологическая схема получения оздоровленных микрорастений картофеля сорта Ариэль

1. Подготовка клубней для вычленения верхушечных меристем или ростков из растений-доноров.
2. Проведение термотерапии и проращивание клубней картофеля.
3. Варка искусственной питательной среды для выращивания апикальных меристем картофеля.
4. Стерилизация растительного материала для вычленения апикальных меристем или ростков в асептических условиях и культивирование их на искусственной питательной среде в помещении с контролируемым световым и температурным режимом.
5. Варка искусственной питательной среды для выращивания микрорастений картофеля.
6. Черенкование полученных микрорастений по количеству междоузлий и посадка черенков на питательную среду по линиям.
7. Диагностика линий на зараженность вирусами и бактериями высокочувствительным методом анализа (ПЦР-РВ).
8. Размножение микрорастений картофеля многократным черенкованием до необходимого количества.
9. Культивирование микрорастений картофеля на искусственной питательной среде в помещении с контролируемым световым и температурным режимом в течение 28 суток.

Ход работы

Отбор базовых клонов проводится в полевых условиях. Требования, предъявляемые к растению, намеченному к отбору: растение – типичное по морфологическому строению для данного сорта, абсолютно здоровое по внешнему виду, нормально развитое, с характерным для сорта количеством стеблей.

Клубни – типичные по морфологическим признакам для данного сорта без признаков веретеновидности, совершенно здоровые по визуальной оценке, с характерным для сорта количеством стандартных по размеру клубней и переходом от крупных к мелким. Урожай каждого отобранного клона помещают в отдельный пакет и закладывают на хранение. После прекращения периода покоя проводят термотерапию.

Процесс термотерапии клубней при этом осуществляется в следующей последовательности: прошедшие период покоя и начавшие прорастать клубни помещают на термотерапию в термостат и выдерживают в течение от 20 до 60 дней при температуре от плюс 36 °С до плюс 40 °С и влажности от 70 % до 80 %. Клубни, помещаемые на термотерапию, должны быть свободны от инфекции, фитофтороза, склероциев ризоктониоза и другой инфекции и тщательно вымыты.

После термотерапии клубни проращивают в темноте для получения этиолированных ростков размером от 2 до 3 см. Клубни помещают на стеллажах в темном месте, при температуре от плюс 18 °С до плюс 22 °С и относительной влажности воздуха в пределах 75 %.

В процессе прорастания на клубнях образуются ростки длиной от 2 до 3 см, которые отделяют от клубня и стерилизуют раствором гипохлорида натрия в течение от 10 до 15 минут, с последующей трехкратной промывкой стерильной автоклавированной водой. Простерилизованные ростки помещают в стерильную чашку Петри и добавляют несколько капель автоклавированной воды для предупреждения их подсыхания.

Работа по вычленению меристем проводится в простерилизованном с помощью бактерицидных ламп микробиологическом боксе. Перед началом работы рабочее место (стол, бинокулярная лупа) и штативы с пробирками протирают спиртом. Инструмент, используемый для вычленения (пинцеты, скальпели и иглы) стерилизуют перед каждым вычленением, погружая в спирт с последующим обжигом. Для достижения лучшей стерильности используют ламинар-боксы. Перед вычленением с верхушки ростка удаляют верхние покровные листочки, последовательно обнажая боковые и верхушечные меристемы с примордиальными листочками. Эту операцию лучше проводить дисцизионной медицинской иглой под бинокулярным микроскопом с 24-кратным увеличением с масштабной сеткой. Меристему, включающую кусочек ткани размером от 80 до 200 мкм без листовых зачатков (примордиев), вычленяют обычной тонкой иглой, зажатой в цанговый держатель. Каждую операцию по обрыванию листочков и вычленению меристемы проводят отдельным простерилизованным инструментом. После вычленения меристему на острие иглы переносят на поверхность питательной среды в пробирку. Затем пробирку закрывают пробкой над пламенем спиртовки и ставят в штатив. После заполнения штатив накрывают целлофановым колпачком для предупреждения чрезмерного подсыхания среды. Для культивирования апикальных меристем используют питательную среду Мурасиге–Скуга (таблица В.1).

Для роста картофельных эксплантов оптимальная реакция среды pH 5,7.

Таблица В.1 – Состав питательной среды для роста апикальных меристем картофеля

Компоненты	Содержание, мг/л	Компоненты	Содержание, мг/л
NH_4NO_3	1650	$\text{Fe}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	27,8
KNO_3	1900	$\text{Na}_2\text{-ЭДТА} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	37,3
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	440	Тиамин	0,1
$\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	370	Пиридоксин	0,5
KH_2PO_4	170	Никотиновая кислота	0,5
$\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	22,3	Мезо-инозит	100
$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0,025	Глицерин	2,0
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	8,6	ИУК	2,0
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0,025	Кинетин	0,2
$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,25	Сахароза	30 000
KJ	0,83	Агар-агар	7000

Штатив с меристемами картофеля помещают в темноту при температуре от плюс 24 °С до плюс 26 °С на четверо суток и поэтапно бракуют инфицированные пробирки. Оставшиеся пробирки помещают в специальные камеры с регулируемыми условиями температуры, влажности, освещенности. Оптимальная температура от плюс 23 °С до плюс 25 °С, влажность 70 %, освещенность – 5 тыс. люкс при 16-часовом светопериоде. Обычно за период от 8 до 10 дней меристема увеличивается, появляется росток. В большинстве случаев появлению ростка предшествует рост каллусной ткани. Когда росток достигнет длины от 3 до 5 мм (обычно за период от 1 до 3 месяцев), его в стерильном боксе извлекают длинным пинцетом из пробирки, отсекают каллусную ткань у основания ростка и пересаживают в пробирку на свежую питательную среду. Пересадка стимулирующе действует на укоренение и рост растения. За период от 2 до 8 месяцев вырастает нормально укоренившееся растение высотой от 5 до 7 см, как правило, с таким же количеством листочков.

Полноценное микрорастение картофеля в фазе от 5 до 8 листьев вынимают в ламинаре из пробирки стерильным пинцетом, помещают в

чашку Петри, скальпелем разрезают на части (отрезок стебля с листом и пазушной почкой), часть стебля над листом при этом должна быть от 2 до 3 раз меньше, чем часть ниже листа, соблюдая строгую стерильность. Черенки высаживают на питательную среду в заранее приготовленные пробирки. Для предотвращения попадания микроорганизмов в пробирку обжигают горлышко пробирки и ватную пробку в пламени спиртовки. Черенкование проводят с интервалом от 21 до 28 дней.

Растения поддерживаются в состоянии *in vitro* на агаризованной питательной среде. Культивирование производится на световом стеллаже при температуре от плюс 20 °С до плюс 22 °С, фотопериоде 16/8 часов свет/темнота, освещенность секции 5 тыс. люкс. Технические характеристики рекомендуемого источника освещения представлены в таблице В.2.

Таблица В.2 – Технические характеристики рекомендуемого источника освещения

Тип ламп	Спектр, нм	Световой поток, Лм	Потребляемая мощность 1 лампы, Вт
Линейная светодиодная лампа, холодного белого света	400–490 500–680	1 800	18

Для выращивания оздоровленных растений картофеля используют питательную среду следующего состава (таблица В.3).

Таблица В.3 – Состав питательной среды для выращивания оздоровленных микрорастений картофеля, мг/л

№	Наименование	Среда МС
Макросоли		
1	NH_4NO_3	825
2	KNO_3	950
3	$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	220
4	$\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	185
5	KH_2PO_4	85
Микросоли		
1	H_3BO_3	3,1
2	$\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	11,15
3	$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0,0125
4	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	4,3
5	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0,0125
6	$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,125
7	KI	0,415
Хелат железа		
1	$\text{Fe}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	13,9
2	$\text{Na}_2\text{-ЭДТА} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	18,65
Витамины		
1	Тиамин - HCl	2,5
2	Пиридоксин - HCl	5
3	АС-К	2,5
Органические вещества		
1	Сахароза	30 000
2	Агар-агар	7 000

ПРИЛОЖЕНИЕ Г (обязательное)

Элемент технологии получения оздоровленного растительного материала картофеля сорта Ариэль в лабораторных условиях № 2

Проблема обеспечения отечественных производителей картофеля качественным посадочным материалом очень актуальна. Без надлежащих мер по оздоровлению и защите семенного материала от повторного заражения число пораженных растений прогрессивно увеличивается, сорт постепенно теряет свою первоначальную продуктивность, вырождается и сходит с арены. В связи с этим в последнее время производство картофеля во всем мире переведено на безвирусную основу с использованием единственно эффективного в настоящее время метода апикальных меристем, который основан на выращивании растений из апикальных (верхушечных) зон делящихся клеток, свободных от вирусной и другой инфекции [35]. Именно картофель стал той сельскохозяйственной культурой, в отношении которой были впервые использованы биотехнологические методы для избавления посадочного материала от вирусов [36, 37].

Сегодня процесс семеноводства картофеля предполагает сочетание биотехнологических методов оздоровления растений на основе технологии культивирования *in vitro* апикальных меристем и стерильных растений с последующим выращиванием миниклубней в защищенных условиях.

Сорт Ариэль – среднеранний, столового назначения. Растение средней высоты, листового типа, полупрямостоячее. Лист среднего размера до крупного, промежуточный, зелёный. Венчик среднего размера. Интенсивность антоциановой окраски внутренней стороны венчика средняя до сильной. Товарная урожайность от 304 до 533 ц/га, от 113 до 129 ц/га выше стандартов Ирбитский, Невский. Максимальная урожайность составляет 662 ц/га, на 350 ц/га выше стандарта Инноватор (Ивановская обл.). Клубень овальный с глазками средней глубины. Кожура жёлтая.

Мякоть кремовая. Масса товарного клубня составляет от 106 до 235 г. Содержание крахмала от 14,3 % до 18,5 %. Вкус хороший и отличный. Товарность от 88 % до 92 %. Лёжкость составляет 96 %. Устойчив к возбудителю рака картофеля, золотистой картофельной цистообразующей нематоды. По данным ВНИИ фитопатологии, умеренно устойчив к возбудителю фитофтороза по ботве и умеренно восприимчив по клубням. По данным оригинатора, устойчив к полосчатой мозаике [38].

Технологическая схема получения оздоровленных микрорастений картофеля сорта Ариэль

1. Подготовка клубней для вычленения верхушечных меристем или ростков из растений-доноров.
2. Проведение термотерапии и проращивание клубней картофеля.
3. Варка искусственной питательной среды для выращивания апикальных меристем картофеля.
4. Стерилизация растительного материала для вычленения апикальных меристем или ростков в асептических условиях и культивирование их на искусственной питательной среде в помещении с контролируемым световым и температурным режимом.
5. Варка искусственной питательной среды для выращивания микрорастений картофеля.
6. Черенкование полученных микрорастений по количеству междоузлий и посадка черенков на питательную среду по линиям.
7. Диагностика линий на зараженность вирусами и бактериями высокочувствительным методом анализа (ПЦР-РВ).
8. Размножение микрорастений картофеля многократным черенкованием до необходимого количества.
9. Культивирование микрорастений картофеля на искусственной питательной среде в помещении с контролируемым световым и температурным режимом в течение 28 суток.

Ход работы

Отбор базовых клонов проводится в полевых условиях. Требования, предъявляемые к растению, намеченному к отбору: растение – типичное по морфологическому строению для данного сорта, абсолютно здоровое по внешнему виду, нормально развитое, с характерным для сорта количеством стеблей.

Клубни – типичные по морфологическим признакам для данного сорта без признаков веретеновидности, совершенно здоровые по визуальной оценке, с характерным для сорта количеством стандартных по размеру клубней и переходом от крупных к мелким. Урожай каждого отобранного клона помещают в отдельный пакет и закладывают на хранение. После прекращения периода покоя проводят термотерапию.

Процесс термотерапии клубней при этом осуществляется в следующей последовательности: прошедшие период покоя и начавшие прорастать клубни помещают на термотерапию в термостат и выдерживают от 20 до 60 дней при температуре от плюс 36 °С до плюс 40 °С и влажности от 70 % до 80 %. Клубни, помещаемые на термотерапию, должны быть свободны от инфекции, фитофтороза, склероциев ризоктониоза и другой инфекции и тщательно вымыты.

После термотерапии клубни проращивают в темноте для получения этиолированных ростков размером от 2 до 3 см. Клубни помещают на стеллажах в темном месте, при температуре от плюс 18 °С до плюс 22 °С и относительной влажности воздуха в пределах 75 %.

В процессе прорастания на клубнях образуются ростки длиной от 2 до 3 см, которые отделяют от клубня и стерилизуют раствором гипохлорида натрия от 10 до 15 минут, с последующей трехкратной промывкой стерильной автоклавированной водой. Простерилизованные ростки помещают в стерильную чашку Петри и добавляют несколько капель автоклавированной воды для предупреждения их подсыхания.

Работа по вычленению меристем проводится в простерилизованном с помощью бактерицидных ламп микробиологическом боксе. Перед началом работы рабочее место (стол, бинокулярная лупа) и штативы с пробирками протирают спиртом. Инструмент, используемый для вычленения (пинцеты, скальпели и иглы) стерилизуют перед каждым вычленением, погружая в спирт с последующим обжигом. Для достижения лучшей стерильности используют ламинар-боксы. Перед вычленением с верхушки ростка удаляют верхние покровные листочки, последовательно обнажая боковые и верхушечные меристемы с примордиальными листочками. Эту операцию лучше проводить дисцизионной медицинской иглой под бинокулярным микроскопом с 24-кратным увеличением с масштабной сеткой. Меристему, включающую кусочек ткани размером от 80 до 200 мкм без листовых зачатков (примордиев), вычленяют обычной тонкой иглой, зажатой в цанговый держатель. Каждую операцию по обрыванию листочков и вычленению меристемы проводят отдельным простерилизованным инструментом. После вычленения меристему на острие иглы переносят на поверхность питательной среды в пробирку. Затем пробирку закрывают пробкой над пламенем спиртовки и ставят в штатив. После заполнения штатив накрывают целлофановым колпачком для предупреждения чрезмерного подсыхания среды. Для культивирования апикальных меристем используют питательную среду Мурасиге–Скуга (таблица Г.1).

Для роста картофельных эксплантов оптимальная реакция среды pH 5,7.

Таблица Г.1 – Состав питательной среды для роста апикальных меристем картофеля

Компоненты	Содержание, мг/л	Компоненты	Содержание, мг/л
NH_4NO_3	1650	$\text{Fe}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	27,8
KNO_3	1900	Na_2 -ЭДТА $2\text{H}_2\text{O}$	37,3
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	440	Тиамин	0,1
$\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	370	Пиридоксин	0,5
KH_2PO_4	170	Никотиновая кислота	0,5
$\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	22,3	Мезо-инозит	100
$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0,025	Глицерин	2,0
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	8,6	ИУК	2,0
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0,025	Кинетин	0,2
$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,25	Сахароза	30 000
KJ	0,83	Агар-агар	7000

Штатив с меристемами картофеля помещают в темноту при температуре от плюс 24 °С до плюс 26 °С на четверо суток и поэтапно бракуют инфицированные пробирки. Оставшиеся пробирки помещают в специальные камеры с регулируемыми условиями температуры, влажности, освещенности. Оптимальная температура от плюс 23 °С до плюс 25 °С, влажность 70 %, освещенность 5 тыс. люкс при 16-часовом светопериоде. Обычно за период от 8 до 10 дней меристема увеличивается, появляется росток. В большинстве случаев появлению ростка предшествует рост каллусной ткани. Когда росток достигнет длины от 3 до 5 мм (обычно за период от 1 до 3 месяцев), его в стерильном боксе извлекают длинным пинцетом из пробирки, отсекают каллусную ткань у основания ростка и пересаживают в пробирку на свежую питательную среду. Пересадка стимулирующе действует на укоренение и рост растения. За период от 2 до 8 месяцев вырастает нормально укоренившееся растение высотой от 5 до 7 см, как правило, с таким же количеством листочков.

Полноценное микрорастение картофеля в фазе от 5 до 8 листьев вынимают в ламинаре из пробирки стерильным пинцетом, помещают в чашку Петри, скальпелем разрезают на части (отрезок стебля с листом и пазушной почкой), часть стебля над листом при этом должна быть от 2 до 3 раз меньше, чем часть ниже листа, соблюдая строгую стерильность. Черенки высаживают на питательную среду в заранее приготовленные пробирки. Для предотвращения попадания микроорганизмов в пробирку обжигают горлышко пробирки и ватную пробку в пламени спиртовки. Черенкование проводят с интервалом от 21 до 28 дней.

Растения поддерживаются в состоянии *in vitro* на агаризованной питательной среде. Культивирование производится на световом стеллаже при температуре от плюс 20 °С до плюс 22 °С, фотопериоде 8/16 часов свет/темнота, освещенность секции 5 тыс. люкс. Технические характеристики рекомендуемого источника освещения представлены в таблице Г.2.

Таблица Г.2 – Технические характеристики рекомендуемого источника освещения

Тип ламп	Спектр, нм	Световой поток, Лм	Потребляемая мощность 1 лампы, Вт
Люминесцентная лампа, холодного дневного света	400–500 520–550 570–630	2500	36

Для выращивания оздоровленных микрорастений картофеля сорта Ариэль используют следующую питательную среду (таблица Г.3).

Таблица Г.3 – Состав питательной среды для выращивания оздоровленных микрорастений картофеля, мг/л

№	Наименование	Среда МС
Макросоли		
1	NH_4NO_3	825
2	KNO_3	950
3	$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	220
4	$\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	185
5	KH_2PO_4	85
Микросоли		
1	H_3BO_3	3,1
2	$\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	11,15
3	$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0,0125
4	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	4,3
5	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0,0125
6	$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,125
7	KI	0,415
Хелат железа		
1	$\text{Fe}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	13,9
2	$\text{Na}_2\text{-ЭДТА} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	18,65
Витамины		
1	Тиамин - HCl	2,5
2	Пиридоксин - HCl	5
3	АС-К	2,5
Органические вещества		
1	Сахароза	30 000
2	Агар-агар	7 000