

1 СОДЕРЖАНИЕ:

1	СОДЕРЖАНИЕ:	1
2	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ СОКРАЩЕНИЙ	2
3	ВВЕДЕНИЕ	3
4	ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	4
5	ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	7
5.1	Подготовка образцов растений.	7
5.2	Определение оптимальных биометрических и физиологических параметров растений.	10
5.3	Виртуальная модель лабораторного модуля “Мэлис”	12
5.4	Разработка силового драйвера	14
5.4.1	Прототип “Конденсаторная пипетка”	15
5.4.2	Прототип “ХУ-LPWM”	16
5.4.3	Прототип 2а	17
5.4.4	Прототип 2b, 2с	18
5.4.5	Прототип 3а	19
5.4.6	Прототип 3b (серия)	20
5.4.7	Прототип 4а (серия)	22
5.5	Использованные датчики	22
5.6	Эксплуатация прототипа	23
6	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	25
7	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	26

2 СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ СОКРАЩЕНИЙ

Русскоязычные.

дНАТ - дуговая натриевая трубчатая газоразрядная лампа.

УЗИС - устойчивые закрытые искусственные системы.

ГРЛНД - газоразрядная лампа низкого давления.

ЦАП - цифро-аналоговое преобразование.

МКС - международная космическая станция.

ИБП - импульсный блок питания.

СВЖО - система воздушно-жидкостного охлаждения

ИИ – искусственный интеллект

Англоязычные.

LED - light emitting diode, светодиод.

BIA - Building-integrated agriculture, растениеводство внутри зданий.

UA - urban agriculture, городское растениеводство.

pH - водородный показатель.

TDS - total dissolved solids, показатель общей минерализации.

3 ВВЕДЕНИЕ

В рамках данной научно-исследовательской работы разрабатываются проекты, главной направленностью которых является обеспечение продовольственной безопасности РФ, создание доступной и высокотехнологичной базы оборудования как для растениеводческой промышленности, так и для научных исследований (в том числе селекции растений).

Целью работы является разработка лабораторного модуля, системы культивации и системы мониторинга биометрических и физиологических параметров растений. Данный лабораторный модуль в будущем - часть распределенного эксперимента, целью которого является повышение социального и эмоционального благосостояния людей - участников эксперимента. Городское сельское хозяйство может оказать положительное влияние на здоровье сообщества, которое напрямую влияет на социальное и эмоциональное благополучие людей.

Исходя из вышесказанного были поставлены следующие задачи:

Первый год.

1. Провести экспериментальные исследования для определения оптимальных биометрических (1) и физиологических (2) параметров растения, дающих представление о его текущем состоянии.

2. Разработать виртуальную модель разрабатываемого лабораторного модуля, определить основные структурные элементы.

3. Провести экспериментальные исследования для определения оптимального набора растений, представляющих наибольший образовательный и показательный интерес.

Второй год.

4. Разработка тестового экспериментального образца лабораторного модуля масштабируемой функциональности с возможностью его дальнейшей модернизации: увеличения количества датчиков и сенсоров, определения типов данных, разработки методики унификации данных.

5. Разработка экспериментального образца лабораторного модуля с программной средой (бета-версией) для последующего тестирования модели обмена данными с облачным хранилищем.

6. Тестирование экспериментального образца лабораторного модуля, внесение корректировок.

4 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

В мире основными бенефициарами высокотехнологичного подхода к изучению процесса культивации растений являются страны с высоким уровнем food insecurity и social insecurity одновременно. Этот процесс - технологизация сельского хозяйства является неотъемлемой частью тех переходных процессов, которые происходят при окончательном становлении постиндустриального общества. Хорошим примером является принятая в 2015 году ООН концепция целей устойчивого развития. Фактором, заставляющим проводить подобные изыскания, является задача по ликвидации голода на планете (вторая по счету из 17). Нельзя на данный момент предположить общего и эффективного подхода, позволившего бы решить данную проблему, поскольку основой кризиса в сложившейся ситуации является само поведение человека, его потребительские привычки, образование и морально-этическое отношение. Нередко такой привычкой является избыточное потребление, нередко человека ограничивает незнание.

Рис.1 - Рожь

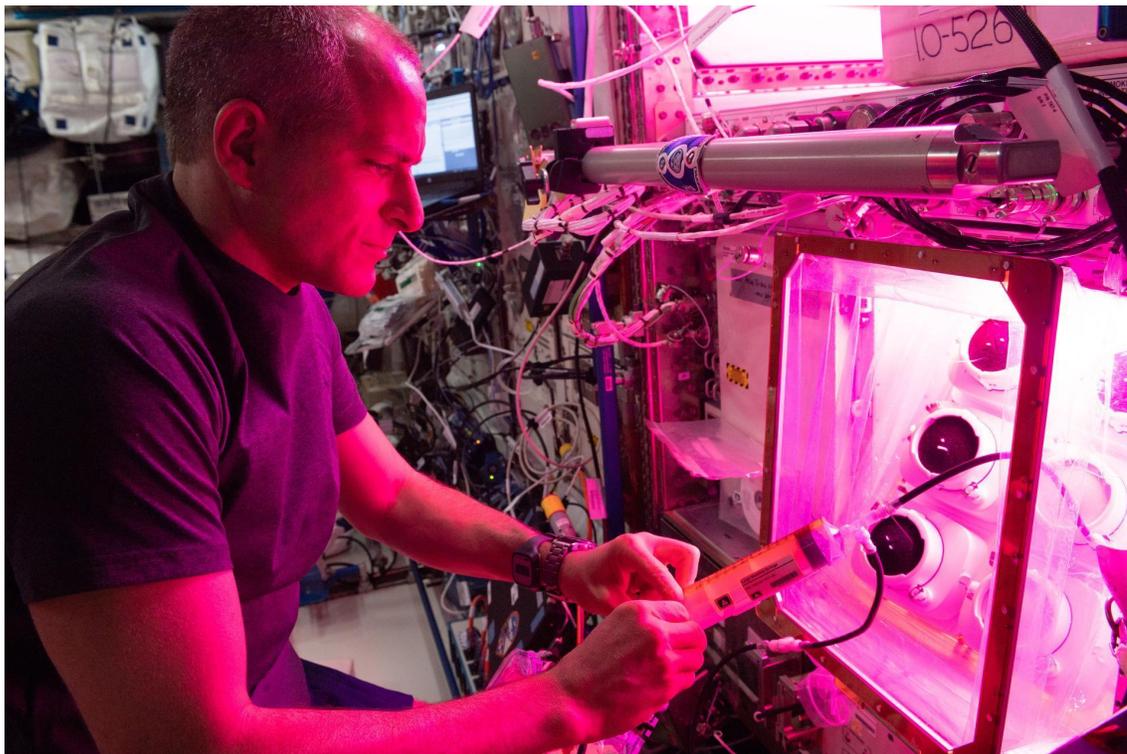


Начиная с 2007 года все большее количество людей и частных предпринимателей занимаются созданием условий для исследования растений вне академических стен, создавая

для этого частные компания и даже городские сообщества. Причем городское управление большинства крупных городов с 2010 года начало активно участвовать в урегулировании городского растениеводства, занимается просветительской и благотворительной деятельностью, более того - создается законодательная база, направленная на поддержку сообществ городских фермеров (Article 89, Boston). Начиная с 2016 года данный процесс ведется и в России (iFarm project, Новосибирск), как яркого представителя за рубежом можно отметить компанию Кимбала Маска “Square Roots”, изучающая возможности контейнерных микро-ферм.

Более того сам процесс - исследование особенностей роста культур в закрытых условиях ведется многие годы на МКС, начиная с 2015 года при поддержке SpaceX был запущен Veggie. Готовятся к отправке на орбиту российские “Лада-2” и “Растение-2”. В свете проведенных экипажем МКС и командой Veg-01 исследований необходимо отметить важность дальнейшего изучения технологической базы, позволившей бы облегчить исследования специалистам.

Рис. 2 – МКС



5 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

5.1 Подготовка образцов растений.

Рис. 3 - Саженцы



В качестве тестовых образцов для прототипа лаборатории (50*90 см) были использованы следующие культуры:

Культура:	Семейство:	Тип фотосинтеза:	Период жизни:
Помидор (черри)	пасленовые	C3	100 суток
Перец "Алладин"	перечные	C3	120 суток
Крестовник пепельный	астровые	C3	1-2 года
Алоэ	асфodelовые	C3	многолетние
Рожь озимая	злаковые	C3	1-2 года

Цветочное разнотравие	цветковые	СЗ	1-2 года
Мята перечная	яснотковые	СЗ	многолетнее

Рис. 4 – Помидор в процессе тренировки



Выбор был обоснован удобством выращивания культур в домашних условиях и легкостью культивации данных образцов. Отдельно стоит отметить наличие многолетних, цветущих и злаковых культур, присутствующих одновременно в выборке, что существенно усложнило планирование исследований ввиду значительного отличия условий для их культивации. Возникшие сложности создали потребность в увеличении потенциала и мощности лаборатории, при сохранении габаритов, обусловленных условиями эксперимента. Оптимальным решением стало создание и установка новой системы фотонных излучателей высокой мощности, обеспечившей бы возможность создания диапазона уровней освещенности от нуля до ста тридцати тысяч килोलюкс (максимальное значение освещенности на орбите Земли) на площади культивационного отсека.

Рис. 5 – Недостаток света на балконе



Подводя итог культивационного процесса на июль 2021 года, хотелось бы отметить тот факт, что большинство образцов не выжило. Причем основным препятствием их жизнедеятельности оказалась невозможность выполнять рутинные процессы в отношении каждого растения. В случае выполнения условий, необходимых для роста культур, каждый из образцов показал признаки роста. Однако наличие условий было доступно лишь на ограниченной площади (по сути соответствующей количеству ламп), что привело к необходимости ограничивать популяцию культур (часть была высажена в открытый грунт, часть стала декоративными квартирными растения, остальные были компостированы). (См. Приложение, Таблица 2 - Итоги культивации)

5.2 Определение оптимальных биометрических и физиологических параметров растений.

Рис. 6 - Побег



В результате пробного эксперимента нами были выбраны следующие параметры

- 1) Количество зелёной массы.
- 2) Толщина ствола.
- 3) Количество междоузлий или кустистость.
- 4) Площадь листа.
- 5) Цвет.

Данные параметры не позволяют полностью оценить состояние и рост растения. Проблема полной оценки состояния при существующих технических возможностях принципиально не разрешима без вмешательства в гомеостаз растения. Поэтому была разработана сводная таблица параметров, снятых в ходе эксперимента с использованием текущих технических возможностей с целью выявления направлений, в которых уже имеются или возможно создание датчиков для изучения растения без нарушения его целостности. Наиболее перспективными можно считать направления, в которых присутствует сложная съемка, поскольку наличие цифровых снимков упростит обучение для искусственного интеллекта.

Табл. 1 – Сводная таблица

Технические	Биометрические		Физиологические	
Размеры культивационного отсека	Средний объем кроны взрослого растения V_{cp}	Средний размер H_{cp}	Толщина ствола S_{cp}	Количество точек роста $Q_{рост}$
Температура окружающей среды t_{cp}	Сводный тип конкуренции со вторичными биотическими факторами Θ	Доминанта роста (апикальная, горизонтальная плющ - и т.п) Ψ	Количество меристем $Q_{мер}$	Среднее время роста отдельных меристем $T_{мер}$
Сводный коэффициент полезного действия системы	Предел интенсивности поглощаемого света $P_{св}$	Тип фотосинтеза (C_3, C_4)	Сравнительный коэффициент репликации меристем M_{cp}	Среднее время роста T_{cp}
Сводные габариты технических модулей	Сравнительный объем прикорневого воздуха A	Объем воды $V_{мод}$, потребляемой одним квазизамкнутым модулем	Состав специализированного питательного раствора NPK	Точка нарушения осмолярного баланса корня P_{EC}

Можно заметить, что параметры пробной выборки и параметры сводной таблицы частично пересекаются. Основным отличием сводной таблицы является наличие в ней параметров, описывающих абиотические факторы системы и производные таких факторов. Цель - создать понятную для искусственного интеллекта модель взаимодействия биотических и абиотических факторов системы с целью дальнейшей автоматизации процесса ухода за культурами внутри лаборатории. Более того сам процесс обучения ИИ существенно расширит возможности предсказательных моделей. Его потребность в данных станет мотиватором для изучения все большего и большего количества образцов, где его цифровая природа станет тем интерфейсом, который возьмет на себя рутинные измерения и работы, создаст стабильность и воспроизводимость условий.

Рис. 7 – Опустынивание вторичными биотическими факторами

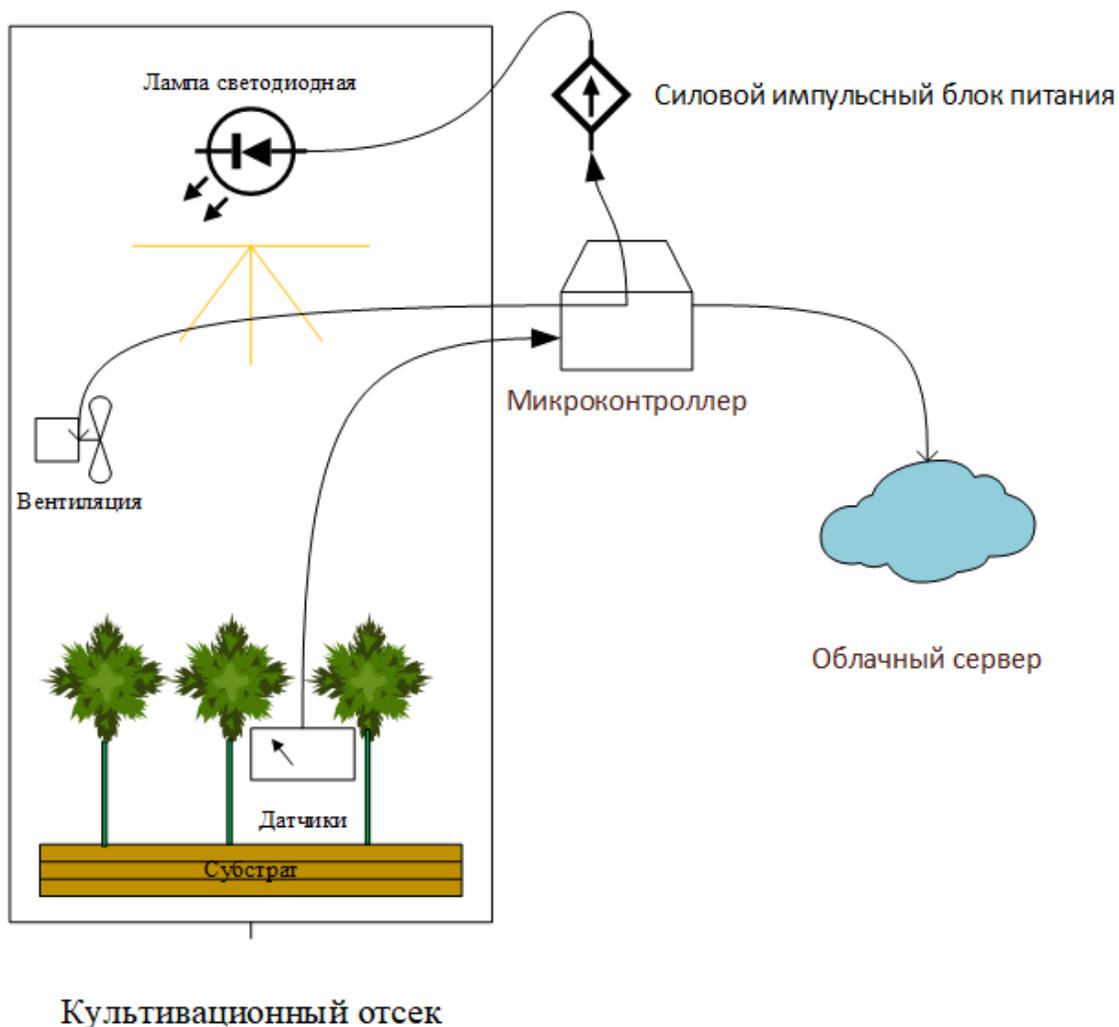


5.3 Виртуальная модель лабораторного модуля “Мэлис”

Лабораторный модуль состоит из следующих компонентов:

- 1) Плата управления и сбора данных.
- 2) Силовой импульсный стабилизатор тока для питания светодиодов.
- 3) Система вентиляции.
- 4) Датчики, совместимые с микроконтроллерной сборкой.
- 5) Вспомогательные компоненты, не указанные на схеме: насосы, дежурное питание и т.д. (не показаны на схеме).

Рис.8 - Модель

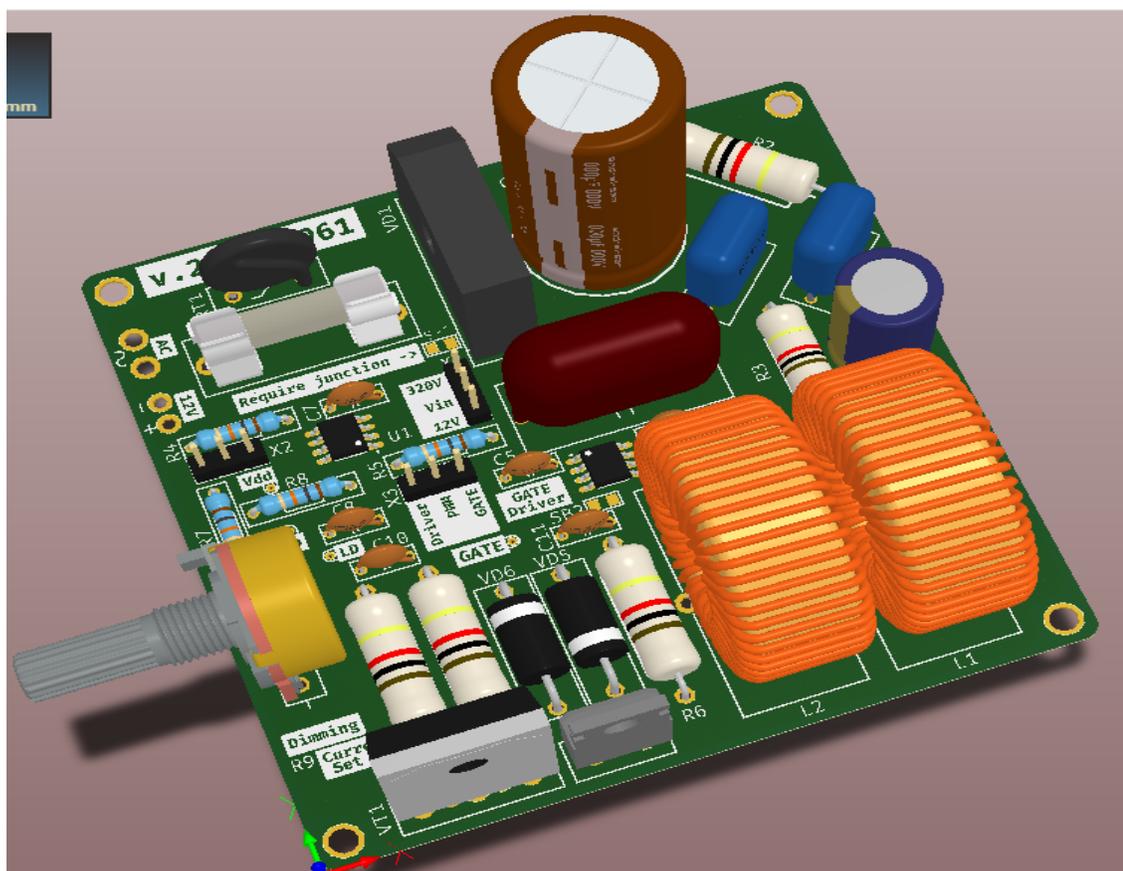


Разработка технической части лаборатории началась с изучения рынка, а именно наличия подобных лабораторий или систем. Были изучены российские и иностранные разработки, различные системы частного и вертикального растениеводства. Основной проблемой рассмотренных систем стала их уникальность. Практически ни одна из найденных систем не содержала бы в себе типовые конструкции или решения за исключением: каркаса (профильный металл в большинстве случаев), системы освещения (в настоящий момент - светодиодные лампы японского или китайского производства) и гидропонной системы (зачастую европейской). В ходе тестирования прототипов выяснилось, что основной проблемой является несовершенство существующих на рынке систем освещения, в связи с чем возникла задача разработки специализированной под нужды лаборатории системы освещения. Основной проблемой рыночных образцов мощной светодиодной техники

является отсутствие в них систем теплопереноса, что приводит к невозможности их использования для формирования УЗИС. Наличие тепловыделения при отсутствии теплопереноса приводит к накоплению тепловой энергии внутри закрытой системы, что нарушает ее устойчивость и гомеостаз биотической части. Для исследования и решения данной проблемы создана серия прототипов фотонных излучателей с возможностью теплопереноса, была создана система внешнего охлаждения и проведены тесты с целью выявить максимальную величину рассеиваемой тепловой мощности. (См. Приложение 1)

5.4 Разработка силового драйвера

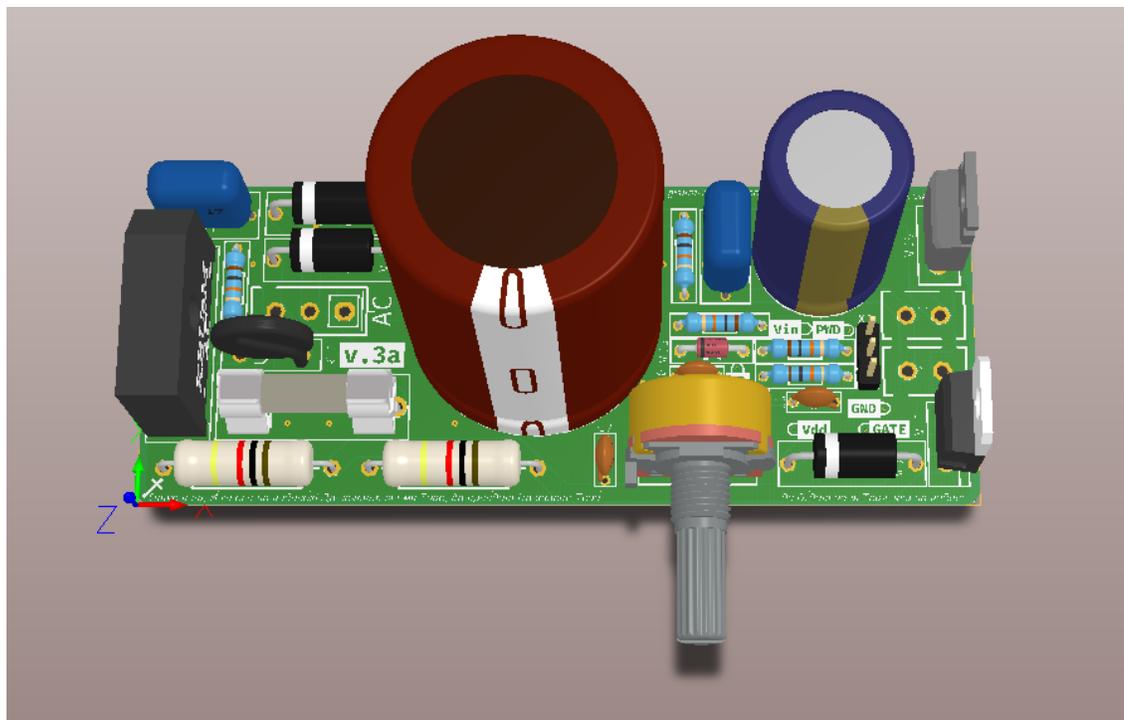
Рис. 9 – Драйвер 2с



Разработка отдельных блоков питания для фотонных излучателей началась вынужденно ввиду отсутствия на мировом рынке ИБП, которые подходил бы по мощностным характеристикам к разработанным прототипам фотонных излучателей. Согласно расчетам для освещения лабораторного модуля с суммарной площадью культивационных камер в два метра квадратных требуется распределенная система освещения из 15 светодиодных матриц по 100 ватт каждая (итого 1500 ватт), при падении напряжения на одной матрице в 30-31 В для питания такой системы потребовался бы ИБП на $15 \cdot 3 = 45$ Ампер или 5 ИБП по 10А. При этом

сводный КПД такой системы из ИБП будет ниже КПД одного ИБП требуемой мощности, в то время как для единичного ИБП проблемой является его эффективная стоимость в пересчете на ватт нагрузки. Более того ни один из рассмотренных образцов бюджетных ИБП не обладал из коробки возможностью цифрового управления. Совокупность данных факторов привела к созданию линейки специализированных драйверов для фотонных излучателей.

Рис. 10 – Драйвер 3а



Данная линейка позволила существенно увеличить КПД системы, предварительное расчетное значение которого (отношения мощности излучаемого светового потока к полной потребляемой мощности включая тепловые потери) достигло 50%, в некоторых образцах 60-70%. Дальнейшие разработки позволят еще больше увеличить КПД системы, что приведет к снижению уровня энергопотребления системы без изменения его культивационного потенциала. Основной информацией в нижеследующем описании образцов будут заметки и рекомендации, возникшие в ходе эксплуатации стабилизатора высокой мощности (тип светодиод) как твердотельного источника фотонов видимого спектра. (Предупреждение! - работа с открытыми фотонными излучателями повышенной мощности может привести к необратимому разрушению сетчатки глаза и преждевременной слепоте!).

Табл. 2 – Освещенность на 50 см.

Ток, mA	Освещенность Klux	Мощность, W
250	8,5	39
500	15,2	78
750	21	116
1000	28	155
1250	34	194
1500	39	233
1750	43	271
2000	47	310
2250	50	349
2500	53	388
2750	54	426
3000	53	465



Освещенность, Klux

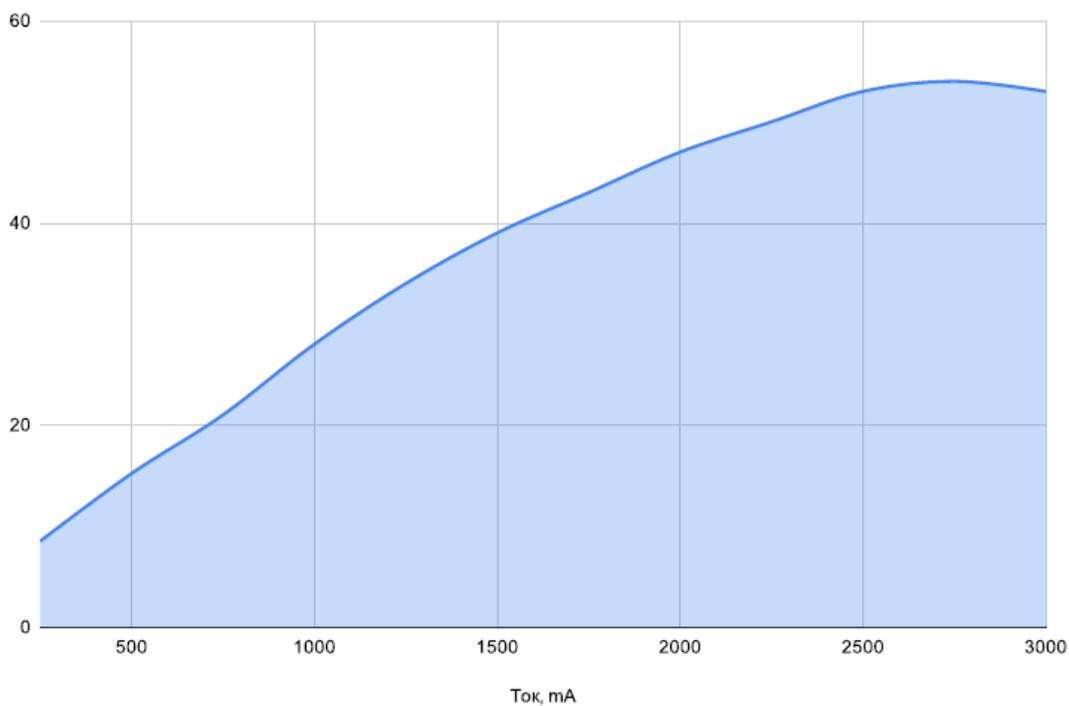
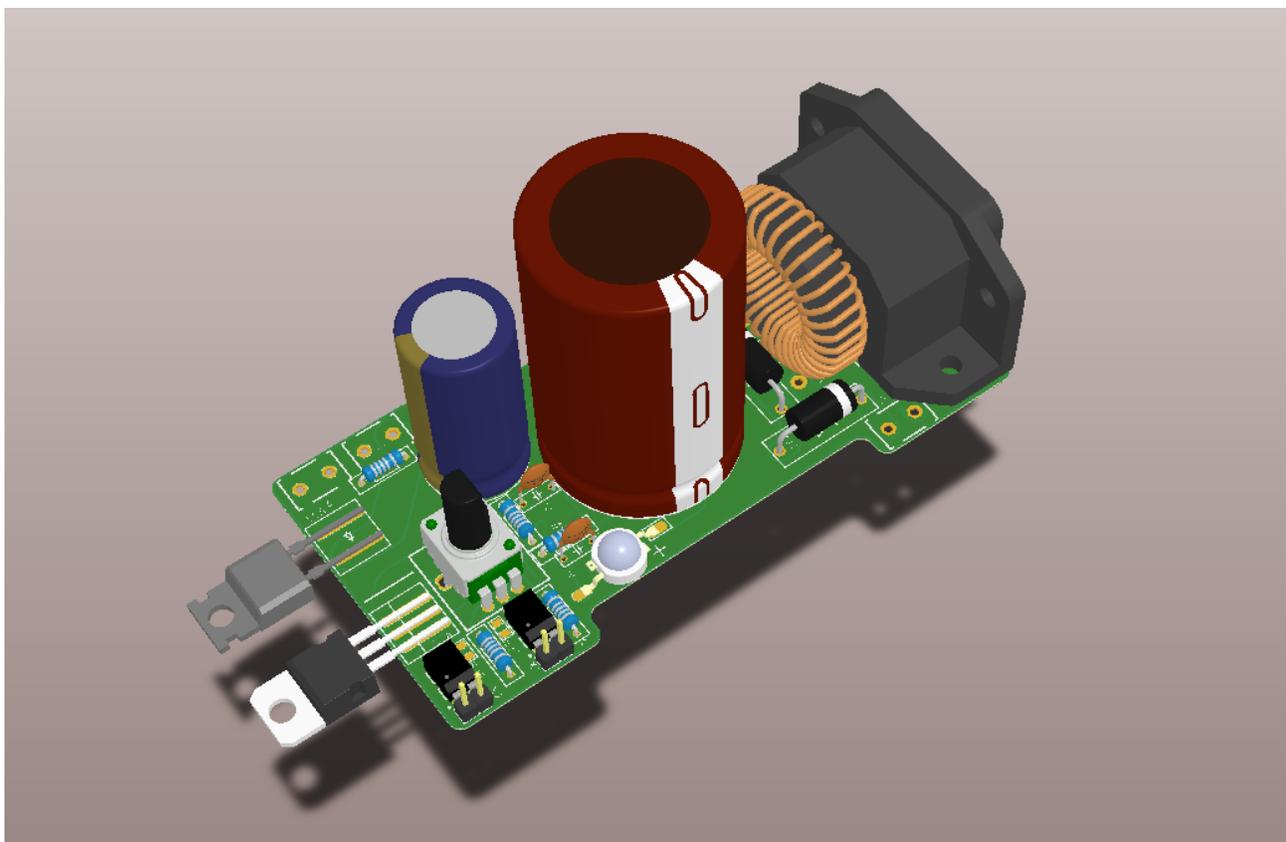


Рис. 11 - Драйвер 3d



Подробное описание хода разработки устройств и выявленных недостатков приведено в Приложении.

5.5 Используемые датчики

Рис. 16 – Лабораторное оборудование



Ввиду отсутствия готовой технической базы для эксплуатации лабораторных образцов датчиков было принято решение провести предварительное исследование существующих рыночных образцов на предмет возможности их модификации, объединения, доступности ЦАП и распространенности. Предварительно были рассмотрены два возможных варианта создания среды датчиков - использование максимально разнообразного пула датчиков вне зависимости от их стоимости с целью создания наиболее подробной картины жизнедеятельности растения; использование только доступных и широко распространенных датчиков для создания интегрирующей их функционал аналитической платформы с целью удешевления наблюдения за единичной выборкой.

В ходе пробных исследований были применены датчики температуры и влажности, люксметр, рН и TDS метры, вольтметры, амперметры (в том числе на датчике Холла), датчики потока воды (и воздуха в последующих версиях), фотокамера.

Показательными оказались: значение освещенности, снятое с помощью люксметра, позволившее найти порог угнетения интеркалярных меристем (~80 кЛюкс); оптимальный ток потребления 100 ваттной светодиодной матрицы (1.75А, 200+ люмен/ватт при температуре подложки 30 °С), снятый с помощью амперметра и люксметра; минимальная влажность воздуха (не ниже 40% при 28-30 °С) для достижения средней скорости роста СЗ растений; точка нарушения осмолярного баланса корня (5 рН и меньше);

Интересно изучение датчика CO₂, ИК-камеры и альтиметра. Использование CO₂ позволило наблюдать двукратное увеличение скорости роста, поэтому целесообразно включение системы CO₂ в лабораторию, следовательно требуется система контроля и мониторинга CO₂. ИК-камера позволила бы получить термоснимок растения, что дало бы косвенное представление о скоростях его внутренних процессов. Альтиметр служит для контроля потока воздуха внутри культивационного отсека - стоячий воздух негативно сказывается на скорости роста, в основном из-за сопутствующего застоя водяных паров, из-за чего внутри культивационного отсека была установлена система внутренней вентиляции.

5.6 Эксплуатация прототипа

Прототип эксплуатировался в домашних условиях, что наложило ограничения на его габариты, требования к эффективности потребляемой энергии, эксплуатационной доступности, бесшумности, типу и частоте технического обслуживания. Большинство систем прототипа относятся к типовым элементам трех рынков - компьютерного, автомобильного и

строительного. Требование бесшумности для круглосуточной домашней эксплуатации (20-30 дБ) ограничило мощность динамических элементов значением 5-10 ватт, что заставило модернизировать принцип и смысл систем лаборатории. Одним из несомненных плюсов такого подхода стала комфортность при нахождении в одном помещении с достаточно габаритной лабораторией - при колоссальном значении потенциальной потребляемой мощности система выглядит как привычный предмет обихода - шкаф, практически бесшумна (полностью бесшумна в некоторых конфигурациях СВЖО) - в помещении с лабораторией комфортно находиться, можно без затруднений отдыхать и спать.

Рис. 17 – LED 500 ватт, эксплуатировался в прототипе “Мах”



5.7 Разработка экспериментального образца

Основная задача образца - проверка гипотезы, что контроль ключевых параметров лабораторного модуля позволяет осуществлять базовое прогнозирование изменений в жизнедеятельности растений (фототрофов). Поскольку само поведение высшего растения

можно аппроксимировать неким алгоритмом $A(\sum_1^n F(t))$ (где $F(t)$ - параметр, отражающий

функцию роста, где совокупность текущих значений функций роста дает нам матрицу

текущего состояния растения), можно попробовать определить указанные функции и алгоритм роста через изменения ключевых параметров абиотической части системы. Сравнивая же изменения биотической и абиотической частей системы мы получим рефлексивную модель, увеличивая количество данных в которой мы сможем перейти уже к предсказательной модели, что в конечном счете приведет нас к ИИ-прогнозированию.

Существуют параметры, нахождение которых вне допустимых пределов ведет к гибели растения:

- влажность
- световой поток
- температура
- средняя скорость газообмена внутри системы
- газовый состав среды
- содержание питательных элементов (NPK, микроэлементы)

Эффективный контроль и поддержание этих показателей на заданном уровне внутри лабораторного модуля позволят минимизировать участие оператора в техническом обслуживании модуля и позволят экспериментатору уделять больше внимания самому эксперименту и получаемых результатам. Помимо этого контроль вышеперечисленных параметров ведет к снижению абиотической ошибки проектирования биома, что нередко является причиной провала эксперимента.

Для экспериментальных исследований перечисленных биотических и абиотических параметров были созданы два образца, образец “Max” и “Neck”.

Образец “Мах”

рис. 18 – Прототип “Мах”



Тестовый экспериментальный образец лабораторного модуля “Мах” представляет собой неразборный мульти-бокс, состоящий из двух отсеков - стационарного шкафа (ОСБ) и

передвижной камеры-коробки (картон), оснащенный следующим оборудованием: прототип излучателя v.4с (двухканальная LED-лампа с отдельным цифровым диммированием каналов), блок питания на 12В, комбинированная воздушно-водяная система охлаждения, набор вентиляторов (5 шт.), помпа погружная.

Процесс разработки шел через установку новых устройств в сам шкаф в случае, если устройство по техническим соображениям должно располагаться непосредственно в камере культивации (лампа, вентиляция) или через вынесение устройства в отдельную аппаратную сборку (охлаждение, ирригация).

Светоотражающая поверхность выполнена внутри с целью обеспечить рассеивание светового потока и присутствует в двух вариантах - побелка (как рассеиватель) и алюминиевая фольга (как отражатель). Помимо этого система оснащена датчиком влажности и температуры, цифровыми часами и беспроводной (Wi-Fi) системой управления.

Вторая камера является боксом 60x50x50 из фольгированного картона с вмонтированным излучателем (являющимся ребром жесткости) и вентилятором, выполненных единой сборкой и расположенных сверху.

У прототипа в ходе эксплуатации были выявлены недостатки сборки, выраженные в отклонения культивационного процесса от планируемых показателей. Задачей разработки было изучить недостатки абиотической природы и устранить их. За вычетом конструкционных модификаций, выраженных в основном в изменении взаимного расположения элементов камеры культивации, разработка была направлена на повышение стабильности силовых элементов системы. Одной из существенных проблем, решенных в ходе разработки лишь частично, стала проблема степени автономности системы. Решения, в которых система становилась полностью замкнутой, требовали создания изолированной камеры культивации. Прототипирование такого типа системы технически сложный процесс, реализовывать который на данном этапе исследования невозможно.

Образец “Neck”

рис. 19 – Прототип “Neck”



Тестовый экспериментальный образец лабораторного модуля “Neck” представляет собой разборный бокс, состоящий из металлического каркаса и стенок из влаго- и

теплоизолирующего материала (на данный момент это пенофол тип А, однако планируется введение сэндвич-панели, состоящей из оргстекла с самоклеящимся пенофолом тип А). В зависимости от требований заказчика, возможно разбиение модуля на 2-3 изолированные независимые секции, в каждой из которых осуществляется поддержание индивидуального микроклимата. Это позволяет увеличить количество исследуемых объектов при неизменных габаритных размерах бокса-модуля. Также как и прототип “Мах”, образец лабораторного модуля “Nesk” оснащается прототипом излучателя v.4c (двухканальным), а термоизоляция со светоотражающей поверхностью, направленная внутрь, обеспечивает эффективное рассеивание светового потока.

В процессе разработки нашей командой было предложено имплементировать ряд слотов-разъемов под необходимые датчики (датчик влажности, температуры, TDS и рН-метры, газоанализатор), для обеспечения сбора данных.

Поскольку ручное управление несколькими секциями может быть неудобным и привести к ошибкам со стороны оператора, разработчиками был предложен вариант цифрового управления световым оборудованием, включающим следующие возможности:

- включение/выключение ламп
- контроль интенсивности светового потока
- программируемый режим работы ламп (возможность задания времени включения и выключения систем по таймеру реального времени)

Управление осуществляется с удаленного устройства, находящегося в той же беспроводной интернет-сети, что и устройство управления.

Процесс сборки на месте такого прототипа (при наличии всех необходимых составляющих) занимает от 6 до 8 часов и предполагает участие 2-3 операторов.

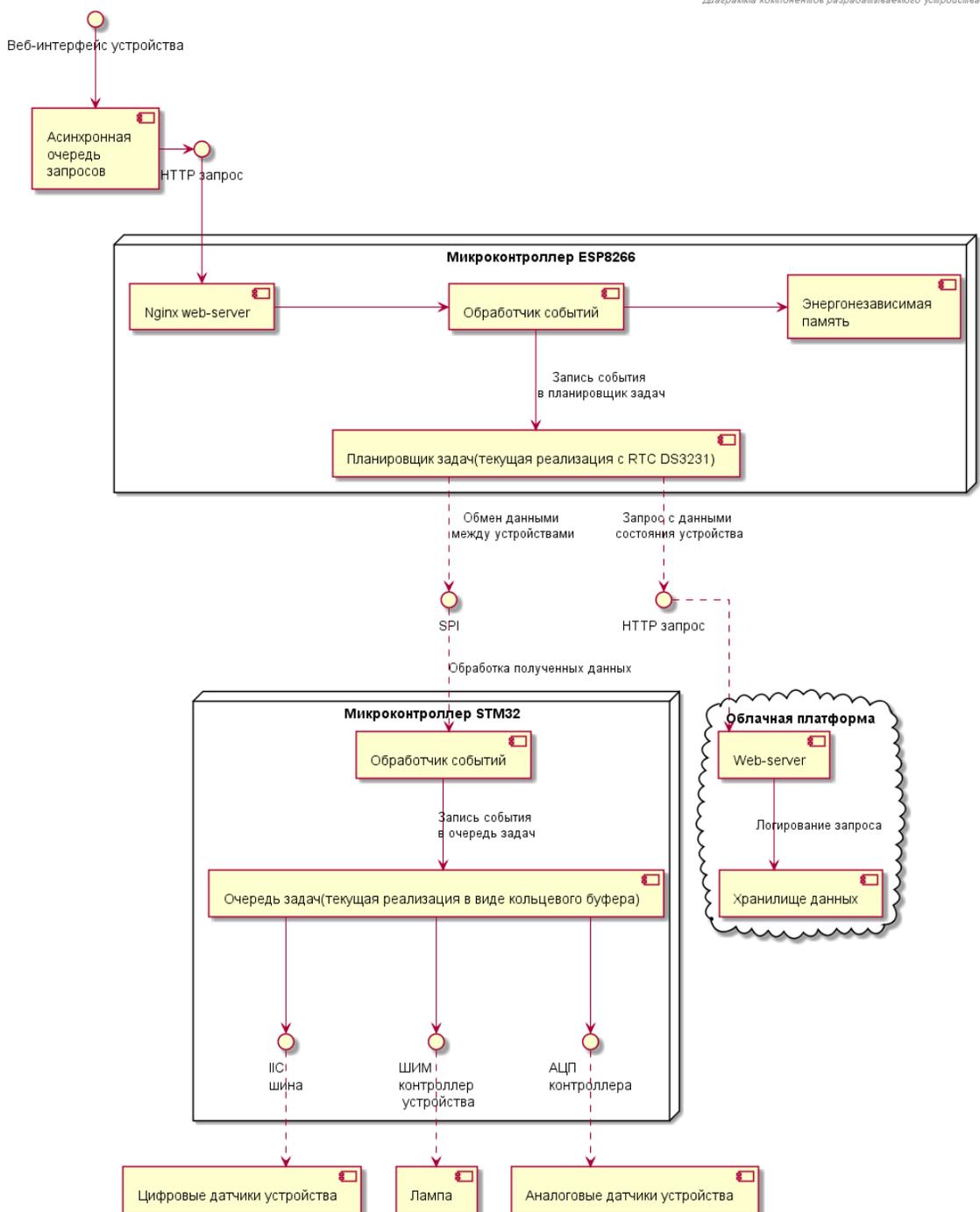
Безопасность процесса эксплуатации такого модуля обусловлена в первую очередь наличием электрической изоляцией на всех участках прототипа, а также возможностью удалённого контроля системой.

Среди улучшений и доработок планируемых в будущем: автономный полив или автоматизированная гидропонная система (эсклюзивная разработка была отложена ввиду широкого ассортимента готовых решений); тесты изоляции системы от внешней среды, (поскольку поддержание параметров изолированной системы очень показательно);

CO2-система (выбор именно заводской системы, оправдан из соображений безопасности);
хранилище данных (SD-карта).

5.8 Разработка программной среды

Рис. 20 - Блок-схема программной среды



Основная причина - необходимость в безопасном и удобном управлении системой. Ввиду высокой мощности силовых элементов лаборатории взаимодействие и настройка оборудования в ходе его работы должно быть исключены, при этом само управление является дежурным процессом и исключено быть не может. Подключение же датчиков к системе требует либо использование АЦП (в случае примитивных линейных датчиков), либо использование цифрового интерфейса ввода/вывода - поэтому функции управления, считывания и переключения режимов системы было решено передать микроконтроллеру (STM32).

Вторым важным элементом программной среды является веб-сервер и обработчик событий на плате ESP8266. Он участвует в обмене данными с микроконтроллером, определяя тем самым режимы работы излучателя, скважность ШИМ, время включения и выключения систем лаборатории. Доступ к веб-серверу, служащему для настройки данных параметров, осуществляется через сеть Wi-Fi при помощи веб-интерфейса.

5.9 Тестирование экспериментального образца

Тест №1 Сбор типовых параметров системы.

Таблица 3 - Основные характеристики созданных прототипов

	Допустимые значения Max	Измеренные значения Max	Допустимые значения Neck	Измеренные значения Neck
Энергопотребление образца, Вт.	20 - 700	130 - 420	50 - 700	100 - 550
Световой поток, клк.	2 - 150	4 - 82	2 - 150	12 - 68
Температура внутри °С т.к. = 23°С	20 - 39	26	20 - 39	24
Относительная влажность 50% снаружи	50-90%	54%	50-90%	55%

Погрешности измерений соответствуют значениям, приведенным в паспортах на использованный измерительный прибор (термометр, люксметр, гигрометр, мультиметр в режиме ватт-метра), и не приведены в данной таблице.

Ряд дополнительных тестов, проведенных в рамках исследования эффективности разрабатываемых прототипов приведен в Приложении.

6 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были проведены экспериментальные исследования для определения оптимальных биометрических (1) и физиологических (2) параметров растения. Параметры приведены в табл. 1. Выбранные параметры позволили исследовать оптимальные условия роста для использованных в эксперименте культур.

Разработана виртуальная модель лабораторного модуля, основные структурные элементы приведены на рис. 2. Прототип модели позволил оценить потенциал применения структурных элементов, включая успешное завершение тестовых исследований.

Проведены экспериментальные исследования для определения оптимального набора растений, представляющих наибольший образовательный и показательный интерес. Основную образовательную нагрузку дает изучение поведения высших растений, стоит отдельно отметить высокий показательный интерес культур пасленовых и астровых семейств.

Промежуточные результаты работы продемонстрировали высокий потенциал текущих (и возможных на базе их базе будущих) разработок. Передовое силовое оборудование позволит существенно расширить границы доступных экспериментов, изучение которых продолжится в рамках последующих работ. Общая сложность проекта требует существенного увеличения количества тестов и исследований, что преждевременно заставило обратиться к методологии распределенного эксперимента. Только с использованием обратной связи полученной в ходе эксплуатации оборудования участниками эксперимента были определена граница необходимости имплементации автоматизации - для городского человека невозможно посвящать больше 1 часа в сутки работам за таковым лабораторным оборудованием, из чего как минимум следует необходимость автоматизации полива культур (вода на удивление быстро может потребляться растениями) и возможность отправки отчета о текущих неисправностях систем лаборатории (что снижает возможное время простоя).

Созданные прототипы лабораторных модулей (как описано в п. Разработка экспериментального образца) были протестированы и успешно применены для культивации выбранных культур. По результатам первичных испытаний можно сделать вывод об удовлетворительной надежности данных прототипов и перспективности их эксплуатации в

рамках научных исследований. В будущем планируется организация сбора, хранения и обработки данных, однако дальнейшие улучшения, исследования и создание методических руководств по эксплуатации лабораторных модулей требует соответствующего количества ресурсов, как то: расширения команды разработчиков, увеличения времени тестирования образцов, кооперации с исследовательскими центрами.

7 СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-development-goals/>

http://supertex-i.ru/doc/HV9961_ru.pdf

<https://cyberleninka.ru/article/n/stvolovye-kletki-rasteniy-i-zhivotnyh-dve-storony-odnoy-med-ali-chast-1>

<https://cyberleninka.ru/article/n/stvolovye-kletki-rasteniy-i-zhivotnyh-dve-storony-odnoy-med-ali-chast-2>

<https://www.pvpc.org/sites/default/files/doc-municipal-strategies-increase-food-access2594.pdf>

f - Article 89, Boston

<https://ifarmproject.ru/> Новосибирский политех

en.wikipedia.org/wiki/Urban_agriculture

<https://www.farmfromabox.com/> Сан-Франциско

<https://squarerootsgrow.com/> Кимбал Маск и компания Square Roots