

Северо-Казахстанский университет им. Манаша Козыбаева

УДК 004:51-76:62-52

На правах рукописи

КИМ ГУЛЬНАР АМАНГЕЛЬДЫЕВНА

**Разработка математических моделей и алгоритмов автоматического
управления продуктивностью роста лекарственного растения в условиях
гидропонных систем**

6D075100 Информатика, вычислительная техника и управление

Диссертация на соискание степени
доктора философии (PhD)

Научный консультант:
кандидат технических наук, доцент
Демьяненко А.В.

Зарубежный консультант:
кандидат физико-математических наук,
доцент
Логачева О.М.

Республика Казахстан
Петропавловск, 2022 г.

СОДЕРЖАНИЕ

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ	5
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	6
ВВЕДЕНИЕ	7
1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ К РАЗРАБОТКЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РОСТА И МЕТОДА РАСПОЗНАВАНИЯ ПРИЧИН ОТКЛОНЕНИЯ ОТ РОСТА ЛЕКАРСТВЕННОГО РАСТЕНИЯ (СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ)	12
1.1 Исследование существующих теоретических подходов к математическому описанию продукционных процессов	12
1.2 Моделирование динамики накопления биомассы растений	20
1.3 Моделирование динамики накопления биологически значимых элементов в вегетативных органах растений	24
1.4 Выращивание лекарственных растений гидропонными методами	29
1.4.1 Исследование условий роста наиболее распространенных лекарственных растений	29
1.4.2 Опыт применения гидропоники в выращивании лекарственных растений	41
1.4.3 Анализ международного опыта создания и управления автоматизированными гидропонными системами основных мировых производителей	45
1.5 Применение систем распознавания образов для автоматизации процесса классификации объектов растениеводческого производства и выявления отклонений в развитии растений	52
Вывод по первому разделу	56
2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РОСТА ЛЕКАРСТВЕННОГО РАСТЕНИЯ	58
2.1 Моделирование роста растения <i>Aloe Arborescens</i> L.	58
2.2 Материалы и методы создания параметризированной модели роста растения <i>Aloe Arborescens</i> L.	60
2.3 Результаты моделирования роста лекарственного растения <i>Aloe Arborescens</i> L.	65
Вывод по второму разделу	67
3 РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСПОЗНАВАНИЯ ПРИЧИН	69

ОТКЛОНЕНИЙ В РАЗВИТИИ РАСТЕНИЯ ALOE ARBORESCENS L. С ПРИМЕНЕНИЕМ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

3.1 Цель и задачи исследования	69
3.2 Материалы и методы исследования	70
3.2.1 Разработка модели классификатора для автоматической классификации растений Aloe Arborescens L.	70
3.2.2 Подготовка исходного набора данных и обучение модифицированной нейронной сети	73
3.2.3 Апробация разработанной модели классификатора	75
3.3 Результаты исследований по разработке модели автоматической классификации растений Aloe Arborescens L. по типу отклонения в его развитии	76
3.3.1 Результаты разработки модели классификатора для автоматической классификации растений Aloe Arborescens L.	76
3.3.2 Результаты подготовки исходного набора данных и обучения модифицированной нейронной сети	78
3.3.3 Результаты апробации разработанной модели классификатора в ходе эксперимента по выявлению отклонения от нормального роста Aloe Arborescens L.	78
3.4 Обсуждение результатов, полученных в ходе разработки системы распознавания отклонений от нормального роста Aloe Arborescens L. с использованием алгоритмов машинного обучения	80
Вывод по третьему разделу	81
4 РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ РОСТА ЛЕКАРСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ГИДРОПОННЫХ СИСТЕМ	84
4.1 Изучение технических характеристик и объема поставки существующих автоматик для гидропонных систем	84
4.2 Особенности автоматизации с использованием модуля автоматического фотографирования растений	88
4.3 Описание алгоритмов автоматизированного управления процессом роста лекарственного растения в условиях гидропонной системы	88
4.4 Структурная схема адаптивной системы управления скоростью роста растения Aloe Arborescens L. с эталонной моделью	96
4.5 Архитектура сбора и обработки данных	99
4.6 Разработка пользовательского интерфейса для автоматизированной	101

системы управления	
Вывод по четвертому разделу	109
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	111
СПИСКИ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	115
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Авторское право	122

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты:

Постановление Правительства Республики Казахстан. Об утверждении государственной программы «Цифровой Казахстан»: утв. 12 декабря 2017 года, №827.

Приоритетное направление развития науки Казахстана: «Устойчивое развитие агропромышленного комплекса и безопасность сельскохозяйственной продукции».

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

VGG16	– Visual Geometry Group (16 слоев)
NFT	– Nutrient Film Technique
КПД	– коэффициент полезного действия
DWC	– Deep Water Culture
GHE	– General Hydroponics Europe
TDS	– Total Dissolved Solids
ГСНС	– глубокие сверточные нейронные сети
СПО	– специализированное программное обеспечение
ЭМ	– эталонная модель
ИМ	– исполнительный механизм
РО	– регулирующий орган
ОУ	– объект управления
БФ	– блок фотографирования

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Ускоренное развитие информационных технологий, вычислительной техники и успехи математических дисциплин предоставляют новые возможности ученым для разработки метода управления продуктивными процессами растений.

Своевременное выявление и точная диагностика недостатка питания растений способны предотвратить снижение урожая. В связи с этим в период вегетации лекарственных растений проводится инспекция участков, отбор листьев и визуальная оценка их морфологических параметров по методике испытаний на отличимость, однородность и стабильность. Визуальная оценка является субъективной и малоинформативной, что сказывается на правильности и своевременности диагностики отклонения от нормы.

В решении этой проблемы важное значение имеет разработка более совершенного информационно-аналитического способа оценки морфологических параметров листьев лекарственного растения с использованием компьютерной установки для автоматизированной оценки возможного отклонения от нормального роста.

В основе метода управления продуктивностью должны стать математические модели продукционных процессов, к которым относится фотосинтетическая деятельность растений, рост и накопление биомассы.

В настоящее время актуально развитие метода управления продуктивностью для растениеводства в защищённом грунте, установках искусственного климата и в условиях гидропоники. Основной задачей тепличного улучшения растениеводства является производство растений вне зависимости от времени года. Наиболее перспективным по рационально используемой территории и снижению затрат труда является способ выращивания на малообъемной гидропонике. Малообъемная технология выращивания растений в теплицах предусматривает создание оптимальных водно-воздушных, питательных, температурных параметров в корнеобитаемой зоне растений.

В связи с этим, **целью** настоящей диссертационной работы является разработка математических моделей и алгоритмов автоматического управления продуктивностью роста лекарственного растения в условиях гидропонных систем.

Задачи исследования:

- исследовать существующие подходы к моделированию роста растений в условиях гидропонных систем;
- исследовать результаты применения систем распознавания образов для автоматизации процесса классификации объектов растениеводческого производства;
- разработать математическую модель продуктивности роста лекарственного растения в зависимости от изменений параметров системы;

- разработать метод распознавания причин отклонения в развитии растений с применением возможностей машинного обучения;
- провести интерпретацию и содержательное исследование результатов распознавания причин отклонений в развитии растения *Aloe Arborescens* L.;
- разработать модуль автоматического контроля роста для обеспечения главной обратной связи в автоматизированной системе управления процессом роста лекарственных растений;
- разработать алгоритм управления автоматизированным ростом лекарственных растений в условиях гидропонных систем и структурную схему информационно-аналитического сопровождения при выращивании лекарственных растений;
- разработать интуитивно понятный интерфейс для автоматизированного управления ростом растений.

Объектом исследования является рост лекарственного растения *Aloe Arborescens* L.

Предмет исследования – процессы контроля и управления продуктивностью роста лекарственного растения в условиях гидропонных систем (модели, методы и алгоритмы процесса контроля и управления продуктивностью роста лекарственного растения в условиях гидропонных систем).

Методы исследования. В процессе реализации диссертационных исследований применялись методы параметрической идентификации, методы обработки и анализа полученных экспериментальных данных, методы имитационного моделирования, методы машинного обучения.

Научная новизна:

- Разработана математическая модель роста лекарственного растения *Aloe Arborescens* L. с учетом двух основных факторов, влияющих на рост растения;
- Разработана модель классификатора, позволяющая применить нейронную сеть VGG16 для решения задачи автоматической классификации растений *Aloe Arborescens* L.;
- Разработана структурная схема информационно-аналитического сопровождения при выращивании лекарственных растений;
- Разработан модуль автоматического контроля роста, который на основании результатов моделирования роста и классификации лекарственного растения *Aloe Arborescens* L. позволяет осуществить главную обратную связь в автоматизированной системе управления процессом роста лекарственных растений.

Теоретическая значимость

Результаты исследования логистической модели роста, модель классификатора и модуль автоматического управления ростом лекарственного растения *Aloe Arborescens* L. могут быть использованы в изучении различных аспектов функционирования растительных организмов, нахождении причины и

следствия тех или иных процессов, составлении прогнозов, а также для разработки систем автоматизированного управления процессом роста растений в условиях гидропонных систем.

Практическая значимость

Разработанный алгоритм автоматической оценки морфологических параметров лекарственного растения создаст основу для дальнейшего развития и совершенствования технологических процессов вегетации. Применение компьютерного распознавания отклонений от нормального роста растений позволит повысить эффективность агротехнологий за счет снижения трудозатрат и точность оценки качественных характеристик растений.

Положения диссертации, выносимые на защиту:

- математическая модель роста лекарственного растения *Aloe Arborescens* L. в условиях гидропоники;
- модель классификатора для автоматической классификации растений *Aloe Arborescens* L.;
- модуль автоматического контроля роста лекарственного растения *Aloe Arborescens* L.;
- структурная схема адаптивной системы управления скоростью роста растения *Aloe Arborescens* L. с эталонной моделью;
- алгоритмы управления ростом *Aloe Arborescens* L. в условиях гидропонных систем;
- интуитивно понятный интерфейс для автоматического управления ростом растений.

Апробация работы. Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на научных конференциях:

- VI Международная студенческая научно-практическая конференции «Молодежь и наука-2019» СКГУ им. М.Козыбаева (2019 г.).
- VII Международная научно-практическая конференция «Global Science and Innovations 2019: Central Asia» в рамках издания Международного научного журнала «GLOBAL SCIENCE AND INNOVATIONS 2019: CENTRAL ASIA», Нур-Султан, Казахстан, 25-28 сентября (2019 г.).
- Международная научно-практическая конференция «Стандартизация – инструмент повышения конкурентоспособности и интеграции казахстанской продукции в мировую экономику», Нур-Султан, Казахстан, 24 ноября (2019 г.).

Публикации. По теме исследования опубликовано 7 научных статей, из них 3 статьи в сборниках международных конференций, 3 статьи в журналах, рекомендованных КОКСОН МОН РК, 1 статья в журнале, индексируемом в базе SCOPUS, а также получено 1 авторское свидетельство на объект интеллектуальной собственности.

Личный вклад автора заключается в проведении исследований, обосновывающих основные положения, выносимые на защиту, а также значимая роль при обобщении и анализе полученных результатов.

Структура диссертации. Диссертация имеет классическую структуру: вводная часть, основная часть (четыре главы), заключение, список использованных источников и приложение. Работа изложена на 122 страницах компьютерного текста, включает 28 рисунков, 17 таблиц и 98 наименований библиографических источников.

Во введении обоснован выбор темы исследования, раскрыта актуальность разработки метода управления продуктивностью роста лекарственных растений в условиях гидропонных систем, сформулирована цель исследования, определяющие её задачи, представлены объект и предмет исследования, раскрыты научная новизна, практическая значимость работы.

В первой главе проведено исследование существующих теоретических подходов к математическому описанию продукционных процессов, к моделированию динамики накопления биомассы растений и биологически значимых элементов в вегетативных органах. Следующим этапом изучена специфика выращивания лекарственных растений гидропонными методами, а именно исследованы условия роста наиболее распространенных лекарственных растений, рассмотрен опыт применения гидропоники в выращивании растений и проведен анализ международного опыта создания и управления автоматизированными гидропонными устройствами основных мировых производителей. Также, исследовано применение систем распознавания образов для автоматизации процесса классификации объектов растениеводческого производства и выявления отклонений в развитии растений.

Во второй главе экспериментально доказана применимость логистической модели для описания процесса роста растения *Aloe Arborescens* L. с учетом влияния внешних факторов. На основании экспериментальных данных была параметризирована логистическая модель и построена эталонная S-образная кривая. Полученная математическая модель будет полезной в расчете оптимальных сроков сбора урожая и в наблюдении за тенденцией роста растений. Таким образом, предложен приемлемый способ, который способен произвести расчет площади листовой поверхности. При этом, сравнив текущее значение с эталонным можно сделать вывод о состоянии роста растения.

В третьей главе разработан метод распознавания причин отклонений в развитии роста растения *Aloe Arborescens* L. с применением возможностей машинного обучения. Описан процесс подготовки экспериментальных образцов для обучения нейронной сети. Приведены результаты апробации и исследований по разработке модели автоматической классификации растений по типу отклонения в его развитии. Сделан вывод о том, что разработанная система может быть использована для реализации главной обратной связи системы автоматического управления гидропонной установкой.

Четвертая глава посвящена алгоритмам управления автоматизированным ростом лекарственных растений в условиях гидропонных систем с применением результатов, полученных во второй и третьей главах.

Представлена структурная схема адаптивной системы управления скоростью роста растения *Aloe Arborescens* L. с эталонной моделью (объект, на который получено свидетельство об авторском праве (Приложение А)). Посредством архитектуры сбора и обработки данных описана организация автоматизированной работы гидропонной системы.

В заключении представлены результаты исследований, включающие основные выводы по итогам диссертационного исследования.

1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ К РАЗРАБОТКЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РОСТА И МЕТОДА РАСПОЗНАВАНИЯ ПРИЧИН ОТКЛОНЕНИЯ ОТ РОСТА ЛЕКАРСТВЕННОГО РАСТЕНИЯ (СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ)

1.1 Исследование существующих теоретических подходов к математическому описанию продукционных процессов

В работах Самохваловой Е.В. «Биологические функции и моделирование продукционного процесса зерновых культур в условиях Самарской области» [1] на основе результатов наблюдений трех лет проводится исследование и оценивание точности моделирования продукционных процессов озимой, яровой пшеницы и ячменя. Для этого применялись управляемые и неуправляемые биологические параметры.

Для моделирования продукционных процессов было использовано единое для всех биологических функций аналитическое выражение [1, с. 241]:

$$f = a_1 \exp \left[-a_2 \left(\frac{\sum T_{ef} - a_3}{100} \right) \right], \quad (1)$$

где $\sum T_{ef}$ - сумма эффективных температур воздуха, играющая роль биологического времени, a_1 - коэффициент, соответствующий максимальному значению функции, a_2 - коэффициент, характеризующий «кривизну» графика функции, a_3 - сумма эффективных температур, при которой достигается максимум функции [1, с. 241].

Коэффициенты a_1, a_2, a_3 биологических функций для листьев, стеблей и колосьев каждой из рассматриваемых культур найдены экспериментально методом регрессионного анализа данных. С использованием полученных биологических функций была построена имитационная модель формирования урожая, которую можно использовать в различных агрометеорологических условиях [1, с. 243].

В работе Рулева О.В. «Модель продукционного процесса сельскохозяйственных культур в орошаемых агролесоландшафтах» [2] отличительным является «системный подход с классическим описательным, накопительным этапом, основанным на «фактических», эмпирических методах построения» [2, с. 3]. Сделан вывод, что «все сельскохозяйственные культуры при орошении развиваются по экспоненте. Применение регрессионного анализа позволило описать фактические данные единым уравнением экспоненциальной зависимости вида» [2, с. 4]:

$$y = a * e^{-bx}. \quad (2)$$

Между элементами системы наблюдается сильная степень связи, о чем свидетельствует рассчитанный коэффициент корреляционных отношений $R=0,80-0,99$.

Предложенная экспоненциальная модель отличается логичностью описания, а также экспериментально доказано, что функция является адекватной описываемому явлению. Критерием адекватности считается практика и эксперимент. «С помощью такой модели можно расширить круг представлений о системе» [2, с. 4].

«Разработка более простой в описании модели, предоставляющей возможность прогнозирования урожая при определенных погодных условиях, должном поливе и содержании необходимых минеральных компонентов» [3], является наиболее удобной в практическом применении. Примером такой модели является схема роста пастбищной травы, описанная Ризниченко Г.Ю. и Рубиным А.Б. в учебнике для бакалавриата и магистратуры «Математические методы в биологии и экологии. Биофизическая динамика продукционных процессов» [3, с. 100].

Модель роста травы представлена двумя дифференциальными уравнениями для переменных W_G и W_S :

$$\begin{aligned}\frac{dW_S}{dt} &= \varphi\theta P - \frac{\mu W_G}{Y} - \gamma W_G, \\ \frac{dW_G}{dt} &= \mu_m \frac{W_G W_S}{W_G + W_S} - \gamma W_G - \beta W_G,\end{aligned}\quad (3)$$

где W_G - запасаемая масса ($\text{кг}/\text{м}^2$), W_S - структурная масса ($\text{кг}/\text{м}^2$), $P = \int_0^h P_c dr$, P_c - мгновенные значения интенсивности в пределах долготы дня, $\varphi, \theta, \mu, \mu_m, \gamma, \beta$ - параметры, взятые с экспериментальных данных [3, с. 103].

Отличительным признаком выше описанной модели является описание процесса структурной и запасаемой массами сухого вещества, при этом рассматривается один морфологический элемент - стебель.

Далее рассмотрим описание комплексной динамической модели агроценоза яровой культуры, построенной в рамках диссертации на тему «Математическое моделирование роста и продуктивности агроценозов» автором Поленок С.П. [4]:

$$\begin{cases} x_i(t+\tau) = \{x_i(t) + e_i(t)y[X(t), V(t)] \cdot \tau\} \cdot (1 - w_i), \\ \sum_{j=1}^n e_j(t) = 1; e_i(t) \geq 0, i = \overline{1,4}; 0 \leq t \leq t_N, t = m \cdot \tau, m = 0, 1, \dots \end{cases} \quad (4)$$

где « $X(t) = (x_1(t), \dots, x_4(t))$ - вектор состояния посева; $x_i(t), (i = \overline{1,4})$ - биомасса листьев, стеблей, корней и колосьев на единице площади поля; $e_j(t), (j = \overline{1,n})$ - прирост биомассы в момент времени t ; $e_i(t), (i = \overline{1,4})$ - доли новой биомассы, которые идут в листья, стебли, корни и колосья соответственно; $V(t) = (V_1(t), \dots, V_4(t))$ - вектор параметров внешней среды; $V_1(t)$ - интенсивность фотосинтетически активной радиации ($\text{кал} / \text{м}^2 \text{сут}$); $V_2(t)$ - влажность почвы (%); $V_3(t)$ - концентрация CO_2 в воздухе ($\text{г} / \text{м}^3$); $V_4(t)$ - среднесуточная температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$), τ - шаг по времени, который в модели равняется одним суткам; $w_i, (i = \overline{1,4})$ - коэффициент относительной скорости отмирания для листьев, стеблей, корней, и колосьев соответственно; t_N - длина моделируемого периода вегетации, причем конец вегетации t_N определяется в модели как накопление некоторой суммы эффективных температур TVEG, то есть $ST(t_N) \geq TVEG, ST(t_N - \tau) < TVEG$, где $ST(t) = \sum_0^4 (T_j - 5)$ - сумма эффективных температур, T_j - среднесуточная температура j -го дня» [4, с. 5].

В данной математической модели для нахождения ростовых функций растений используются общебиологические принципы оптимальности, ростовые функции растений задаются в неявной форме – в виде принципа оптимального управления [4, с. 6]. Система уравнений может иметь практическое применение для расчета оптимальных условий формирования урожая не только яровых, но и других сельскохозяйственных культур.

В настоящее время строятся математические модели, описывающие отдельные подсистемы продукционного процесса растений. Это связано с наличием у рассматриваемой системы свойства эмерджентности, то есть существования таких признаков, которые отсутствуют при рассмотрении ее отдельных компонентов [5].

Далее приводится пример описания математической модели из книги Ризниченко Г.Ю., Рубин А.Б. «Математические модели биологических продукционных процессов» [3, с. 171], где цель выращивания сводится к культивированию одного из органов растения:

$$M^*(\tau + \Delta\tau) = M^*(\tau) + \Delta\mu^* + \Delta B^*, \quad (5)$$

где « M^* - биомасса хозяйственно полезного органа, $\Delta\mu^*$ - приток в него вновь созданных органических веществ; ΔB^* - приток органических веществ, ранее запасенных в других органах. $\Delta\mu^*$ пропорционально фотосинтезированной за время $\Delta\tau$ биомассе в целом растении ($\Delta\mu$)» [3, с. 172]:

$$\Delta\mu^* = a^* \Delta\mu, \quad (6)$$

где « $a^* = \Delta\mu^* / \Delta\mu$ - параметр продуктивности, характеризующий распределение вновь созданных органических веществ по органам (ростовая функция)» [3, с. 172]. «Она определяет, какая доля прироста всего растения в данный момент времени выделяется на прирост определенного органа» [3, с. 173].

Такая модель имеет практическую ценность при выращивании таких растений, где в создании биомассы участвуют только некоторые органы. Недостаток выше упомянутой математической функции – отсутствие учета влияния таких внешних факторов, как свет, вода и т.д.

«Существует большое количество воздействий внешней среды, которые на прямую не осуществляют обмен веществ, рост и развитие растений, но негативно влияют на систему в целом» [6]. Рассмотрим труды И.М. Михайленко, Е.В. Канаш, В.Н. Тимошин «Модели линейного роста растений в условиях окислительного стресса, вызванного действием УФ-В радиации» [7].

«Основываясь на экспериментальных данных, авторы разработали методику линейного роста растений на примере пшеницы в условиях окислительного стресса, вызванного УФ-В радиацией» [7, с. 19]. «Функция представляет собой сумму двух компонент – линейный рост в оптимальных условиях $x_M(t)$ и величина, на которую вследствие воздействия отклоняются от контроля линейные размеры объекта (функцию стресса) $s(t)$ » [7, с. 20]:

$$x_s(t) = x_M(t) + s(t). \quad (7)$$

Модель линейного роста в оптимальных условиях имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} x_M &= p_1 x_M(t) + p_2 v(t) + p_3 \varphi(t) + p_1 u^*(t) + \zeta(t), \\ t &\in (0, T); x(0) = x_0 \\ y_M(t) &= x_M(t) + \zeta_x(t), \end{aligned} \quad (8)$$

где « x_M - моделируемая величина линейного роста, мм; v - температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$; φ - величина фазированной антенной решетки, Bm / M^2 ; $\zeta(t)$ - случайная ошибка моделирования, имеющая нулевое среднее и неизвестную дисперсию σ_M^2 ; $y_M(t)$ - измеряемые линейные размеры объекта в контроле; $\zeta_x(t)$ - ошибка, с которой может быть определена величина $y_M(t)$; $u^*(t)$ - интенсивность естественной УФ-В радиации или фоновое значение УФ-В радиации в контроле, Bm / M^2 » [7, с. 21].

Данную динамическую модель можно применить и при условии других стрессовых факторов, влияющих на систему.

Структура, сложность и форма представления модели продукционного процесса растений оцениваются в зависимости от предмета и цели моделирования [8]. Рассмотрим одну из функциональных моделей, являющуюся достаточно подробной для прикладных целей. Модель Симона, разработанная Р.А. Полуэктовым [9], является имитационным методом описания роста растения. Принципиальное отличие SOYMOD от других моделей - разделение модели на менее объемные блоки, каждый из которых решает свою математическую задачу, за счет чего увеличивается количество входных и выходных данных. «Система характеризуется некоторым набором вертикальных переменных: радиация, температура и влажность воздуха в посеве и почве» [9, с. 35].

Действительно, с помощью математической модели продуктивности стало возможным оценивать влияние каждого фактора на жизнедеятельность растений, тем самым повысить эффективность производства. «Математическая зависимость между внешними факторами и продукционным процессом позволяет оптимизировать вегетацию методом подбора необходимых сочетаний параметров в целях получения максимального «выхода» в системе» [10].

В качестве примера рассмотрим модель развития огурца сорта Московский тепличный, описанную автором С.А. Попова в научном труде «Математическое моделирование продуктивности растений как средство повышения эффективности энергосбережения» [10, с. 141]. «Для оценки влияния каждого фактора на жизнедеятельность растений разработана математическая модель, полученная в рамках многофакторного эксперимента» [10, с. 142].

$$\begin{aligned} \Phi = & a_0 + a_1 E_1 + a_2 t_1 + a_3 T_2 + a_4 \phi_1 + a_5 \phi_2 + a_6 \varphi_1 + a_{11} E_1^2 + a_{12} E_1 t_1 + a_{13} E_1 T_2 + a_{14} E_1 \phi_1 + \\ & + a_{15} E_1 \phi_2 + a_{16} E_1 \varphi_1 + a_{22} t_1^2 + a_{23} t_1 T_2 + a_{24} t_1 \phi_1 + a_{25} t_1 \phi_2 + a_{26} t_1 \varphi_1 + a_{33} T_2^2 + a_{34} T_2 \phi_1 + \\ & + a_{44} \phi_1^2 + a_{45} \phi_1 \phi_2 + a_{46} \phi_1 \varphi_1 + a_{55} \phi_2 \varphi_1 + a_{66} \varphi_1^2, \end{aligned} \quad (9)$$

где « Φ – интенсивность дневного фотосинтеза, мг $CO_2 / \partial m^2 \partial t$;

E_1 - текущее значение освещенности, клк;

t_1 - текущее значение дневной температуры в культивационном помещении, $^{\circ}C$; T_2 - среднее значение температуры предыдущей ночи, $^{\circ}C$; ϕ_1 - длительность фотопериода, ч; ϕ_2 - возраст растения, сутки; φ_1 - текущее значение влажности воздуха в теплице, %; a_0, a_1, a_2 и т.д. – коэффициенты регрессии математической модели» [10, с. 144].

«На основании данного уравнения регрессии можно построить графическую зависимость и найти экстремум функции. При значениях

полученных переменных косвенный показатель продуктивности будет максимальной величиной» [10, с. 145].

Температурный и световой режимы могут отличаться для разных культур, поэтому управлять микроклиматом по одной стандартной модели является проблематичным [11]. В связи с постоянной тенденцией выведения усовершенствованных сортов возникает необходимость в периодическом обновлении модели.

«Отражением процесса роста растения являются биометрические показатели, которые достаточно просто фиксировать во времени» [12]. «Полученные данные могут быть использованы при разработке алгоритмов управления продуктивностью растений. Задача осложняется тем, что количественные процессы преобразования вещества и энергии в растении происходят наряду с регуляционными, которые инициируют распознаваемые качественные изменения в структуре или поведении организма растения в зависимости от текущего внутреннего состояния или складывающихся внешних условий» [13].

«В работе С.А. Ракутько и А.Н. Васькина «Математическое моделирование биометрических показателей растений салата (*Lactuca Sativa* L.)» показана важность эмпирических моделей продукционного процесса растений, выращиваемых в условиях светокультуры. Значения биометрических показателей для n -го листа растения салата аппроксимировали зависимостями вида» [14]:

$$Y(n, T) = Y_{\max} e^{\frac{(n - A_y)^2}{B_y}}, \quad (10)$$

где « $Y_{\max}$, A_y , B_y - коэффициенты, зависящие от возраста растения T [14, с. 376]. Значения этих коэффициентов представлены линейной зависимостью от возраста растения. Например, $Y_{\max} = \alpha T + \beta$, α, β - постоянные коэффициенты, полученные экспериментальными данными» [14, с. 377].

Построение математической зависимости между условиями внешней среды и продукционным процессом дает возможность оптимизировать развитие растения, подбирая необходимую вариацию управляемых параметров и добиваясь при этом максимальной продуктивности.

Исходя из того, что агроэкологические процессы отличаются сложностью описания, необходимо выделять важные факторы, взаимодействие которых качественно влияет на систему в целом [3, с. 175]. Существует некоторое количество моделей, описывающих рост популяции. Они основываются на «принципе лимитирующих факторов». Суть данного принципа принадлежит немецкому агрохимику Юстусу Либиху [3, с. 175]. «Математическая теория описания систем с лимитирующими факторами разработана И.А. Полетаевым и его школой (Полетаев, 1966, Гельдман, 1970)» [3, с. 176]. «Автором разработан

класс дискретно-непрерывных моделей, которые представляются в виде систем дифференциальных уравнений, зависящих от таких переменных, как момент времени и значение решения» [3, с. 176].

«Метод описания элемента экологической модели как L-системы можно проиллюстрировать на примере простой модели роста растения (Полетаев, 1973)» [3, с. 180]. В результате протекания процесса роста и основного обмена (дыхания) количество биомассы меняется во времени вместе с размерами растения.

Процесс роста биомассы растения описывается уравнением:

$$\frac{dx}{dt} = \beta_1 P_1 - \alpha_2 P_2, \quad (11)$$

где P_1, P_2 - процессы, протекающие в системе, E – свет, F – некоторое вещество, которое дает прирост биомассы x ; β_1, α_2 – параметры функции.

Для определения зависимости P_1 и P_2 от текущего состояния системы и внешней среды E и F растение рассматривается как система с лимитирующим фактором. В модели интенсивности процессов P_1 и P_2 запишутся в виде [3, с. 180]:

$$P_1 = \min\{x, E, F\}, P_2 = \min(x). \quad (12)$$

Моделирование физиологических процессов растений с использованием систем с лимитирующим фактором предоставляет возможности для более точной формулировки и проверки гипотез относительно влияния различных факторов на продуктивность растений [15].

Результаты. По результатам проведенного обзора методов моделирования продукционных процессов растений можно выделить три основных подхода к моделированию:

1) применение экспоненциальной модели для описания скорости прироста массы растения (массы полезного компонента или одного из вегетативных органов растения). Согласно этой модели, скорость прироста экспоненциально убывает во времени. Из рассмотренных нами работ это наиболее популярный метод. При этом в каждой из рассмотренных в статье работ применялся свой собственный метод математического описания эмпирических коэффициентов экспоненциального уравнения, учитывающих влияние различных внешних факторов на скорость роста растения. Интегрируя данное уравнение во времени получим кривую с насыщением, описывающую изменение массы растения во времени. Для того, чтобы эта модель учитывала уменьшение массы растения (снижение массы полезного компонента) вследствие дыхания и старения растения, необходимо, чтобы эмпирические коэффициенты уравнения являлись функциями от времени.

2) применение дифференциального уравнения прироста массы растения в единицу времени (дифференциальное уравнение материального баланса, учитывающее как фактический прирост массы растения (или массы полезного компонента), так и его уменьшение вследствие различных физиологических процессов). В данном случае, внешний вид кривой изменения массы во времени никак не регламентируется. В отдельных работах для определения текущей массы растения предлагается использовать фактически интеграл от подобного дифференциального уравнения.

3) построение регрессионных моделей, учитывающих влияние на массу растения (или массу полезного компонента) всех внешних факторов. При этом время рассматривается в качестве одного из внешних факторов. Внешний вид кривой изменения массы растения во времени никак не регламентируется, как и в предыдущем подходе к моделированию продукционных процессов растений.

Для целей автоматического управления продукционными процессами растения в условиях гидропоники предпочтительнее использовать интеграл от дифференциального уравнения материального баланса. Т.е., зная «предысторию» роста растения вплоть до данного момента, рассчитывать прирост массы растения в ближайший момент времени. И, если рассчитанное с помощью модели приращение массы растения окажется больше или меньше фактически наблюдаемого при данных значениях внешних факторов, то можно будет уточнять данную модель на каждом этапе роста.

Обсуждение. При исследовании продукционных процессов в биологических системах плодотворными оказались методы общесистемного подхода с выявлением характера процесса. В ходе исследований установлено, что «построение адекватной математической модели требует знания некоторого набора параметров системы, которые могут быть определены только из наблюдения и эксперимента» [1-15]. Наиболее часто в публикациях встречаются три основных вида математических моделей: экспоненциальные, дифференциальные и регрессионные.

Все рассмотренные в публикациях примеры моделирования продукционных процессов показали высокую корреляцию между экспериментальными данными и результатами математического моделирования. Это показывает, что все рассмотренные методы моделирования имеют право на существование.

Анализ предложенных моделей роста, полученных для продукционных процессов с управляемыми и неуправляемыми внешними параметрами, позволил сделать вывод о том, что динамические модели дают более высокую точность и могут быть использованы в прикладных целях.

Рассмотренные подходы к моделированию планируется применить для продукционных процессов растений в условиях гидропонных систем, в которых все внешние параметры являются управляемыми.

1.2 Моделирование динамики накопления биомассы растений

Достижения в области математического и компьютерного моделирования представляют возможность усовершенствовать знания о состоянии системы, а также управлять процессами в различных областях наук. Моделирование роста растений позволяет нам проверять гипотезы и проводить виртуальные эксперименты, касающиеся процесса роста растений, которые могли бы занять годы в природных условиях.

Модели сельскохозяйственных культур дают количественную информацию, благодаря которой можно значительно оптимизировать производство и улучшить контроль за ростом. Математические модели должны основываться на физических и химических знаниях о том, где и в каких условиях произрастает изучаемое растение, а также физиологические процессы, протекающие в нем.

Рассмотрим работу, основанную на обобщенной функции роста, которая является наиболее гибкой и может быть полезна в проблеме выбора модели. В публикации Purnachandra Rao Koya, Ayele Taye Goshu «Generalized Mathematical Model for Biological Growths» [16] содержится математическое представление относительного роста, описанного дифференциальным уравнением или уравнением состояния скорости [16, с. 42]:

$$\frac{df(t)}{dt} = r_t f(t), \quad (13)$$

где $f(t)$ - функция роста, r_t - функция относительной скорости во времени. Авторы предлагают единую обобщенную модель роста, названную функцией роста Коуа-Goshu, в качестве решения уравнения (13): $f(t) = A_L + (A - A_L) \left[1 - Be^{-k([t-\mu]^\delta)} \right]^m$. Здесь параметры определены следующим образом: $B = 1 - \left(\frac{A_\mu - A_L}{A - A_L} \right)$, $A_\mu: \lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = f_\infty$, A - верхняя асимптота $f(t)$; A_L : нижняя асимптота $f(t)$; $A_\mu = f(\mu)$: параметр скорости роста; μ : сдвиг времени, постоянное значение; δ : шкала времени, постоянное значение; ν, m : параметры формы функции роста, $m \neq 0, \nu \neq 0$ [16, с. 45].

Такие известные модели, как Logistic, Generalized Logistic, Gompertz, Brody, Monomolecular, Mitscherlich, Von Bertalanffy, Richards, Generalized Weibull and Weibull [16, с. 50] являются частными случаями функции роста Коуа-Goshu. Таким образом, разработанная обобщенная функция является приспособляемой к ранее разработанным моделям роста.

Для оценки продуктивности растения за весь период M. S. Malik, C. Surendran and K. Kailasham в публикации «A Mathematical Model for Predicting the Growth of Eucalyptus Globulus under Agroforestry Plantation» [17]

(Математическая модель для прогнозирования роста Эвкалипта Глобус при Агроресоводческой Плантации) применили общеизвестные модели. В ходе проведенных экспериментов и вычислений было установлено, что логистическая модель роста является наиболее подходящей для прогнозирования роста *Eucalyptus Globulus* на этапах посадки, прополки и удобрения почвы [17, с. 201]:

$$Y_i = \frac{A}{[1 + \exp(B + Ct_i)]} + e_i, \quad (14)$$

где Y_i - показатель роста Эвкалипта Глобус ($m^3 a^{-1}$), t_i - период роста Эвкалипта Глобус (месяц), B , C , D - параметры для оценки, e_i - стохастическая ошибка [17, с. 203].

Оценочные показатели корреляции логистической модели роста были наиболее близки к значимости и указали на достоверность соответствия.

Рассмотрим экспоненциальную модель, которая была использована для моделирования накопления биомассы, предложенную Allen R. Overman, Kelly H. Brock A «Model of Growth and Nutrient Uptake by Tobacco» [18] (Модель роста и поглощения питательных веществ табаком). Развернутая модель роста используется для описания накопления биомассы во времени с учетом фотосинтеза:

$$Y = A * Q, \quad (15)$$

где Y - накопленная биомасса, A - коэффициент урожая, $Q = \left\{ (1 - kx_i) [erfx - erf x_i] - \frac{k}{\sqrt{\pi}} [\exp(-x^2) - \exp(-x_i^2)] \right\} * \exp(\sqrt{2}\sigma c x_i)$ - величина роста с безразмерным временем x , связанным с календарным временем t ;

$x = \frac{t - \mu}{\sqrt{2}\sigma} + \frac{\sqrt{2}\sigma c}{2}$, где μ - календарное время до среднего распределения солнечной энергии; $\sqrt{2}\sigma$ - время распространения функции движения энергии; c - коэффициент старения функции; k - коэффициент распределения между светосборным и структурным компонентами системы; $x = x_i$ соответствует $t = t_i$

- время начала значительного роста растения; $erfx = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-u^2) du$, где u - переменная интегрирования [18, с. 7].

С помощью предложенной модели было установлено наличие: линейной корреляции между накоплением биомассы и величиной роста табака; гиперболической связи между поглощением питательных веществ и накоплением биомассы.

Также математическую модель, описанную для роста табака, авторы Allen R. Overman, Richard V. Scholtz III в работах «Accumulation and partitioning of biomass by soybean» [19] (Накопление и распределение биомассы соей) и «Accumulation of Biomass and Mineral Elements with Calendar Time by Corn: Application of the Expanded Growth Model» [20] (Накопление биомассы и минеральных компонентов кукурузой в течение календарного времени: Применение развернутой модели роста) применили для анализа накопления биомассы соевых бобов и кукурузы соответственно. Развернутая модель роста дает адекватное описание накопления биомассы растением за некоторое время с учетом вариации состава почвы с целью определения чувствительности на минеральные компоненты.

Разработанная комплексная теория роста с необходимых набором параметров системы может быть применима для широкого спектра видов сельскохозяйственных культур.

Kenji Shirai, Yoshinori Amano «Mathematical Model of Plant Leaf Area Growth» [21] (Математическая модель роста листьев растений) отмечают, что теоретически возможно вывести оптимальный метод управления, если начать моделирование процесса роста с билинейных дифференциальных уравнений с частными производными и разработать строгую линейную модель:

$$\begin{aligned} \frac{d\xi}{dt} + \nu \frac{d\xi}{dx} &= \frac{P(t)\alpha A}{L} (\theta_b(t, x) - \xi(t, x)) \equiv W(t)(\theta_b(t, x) - \xi(t, x)), \\ P(t) &\cong \frac{K_p \cdot P_f \cdot P_s}{C_f \cdot S_f}, \\ W(t) &\equiv \frac{P(t)\alpha A}{L}, \end{aligned} \quad (16)$$

где K_p , P_f , P_s , S_f и C_f - обозначают коэффициент преобразования энергии, плотность мощности излучения, площадь излучения, коэффициент подачи питательных веществ и эффективность передачи соответственно.

Такие часто анализируемые факторы, как фотосинтез и дыхание, не всегда являются основными причинами различия скорости роста [21, с. 3]. Разработанная модель сосредоточена на связи между ростом и интенсивностью света. Авторы представляют анализ роста как нисходящий метод, в котором скорость роста факторизована. Существует множество оснований, влияющих на темп роста растений, и сложно определить конкретную причину в каждом индивидуальном случае.

Исследование Agnieszka Szparaga, Slawomir Kocira, результаты которого представлены в статье «Generalized logistic functions in modelling emergence of *Brassica napus* L.» [22] (Обобщенные логистические функции в моделировании всхода *Brassica napus* L.) посвящены определению возможности применения обобщенных логистических функций для прогнозирования всхода *Brassica*

parus L. после обработки семян растительным экстрактом корней *Taraxacum officinale* в условиях контролируемой среды. Способность предвидеть время появления всходов является элементом интегрированной системы управления растениеводством. В связи с этим, авторы предлагают следующее описание модели роста растения в контролируемых лабораторных условиях, где температура воздуха и влажность почвы поддерживались на оптимальном уровне [22, с. 242]:

$$N(t) = K * [1 + Q * \exp(-B * (t - C))]^{-\nu}, \quad (17)$$

где t - время, K - параметр функции, выражающий асимптотическое значение числа всходов за время; Q - параметр функции, связанный с происхождением кривой роста $N(t)$, B - скорость роста (1/день), C - параметр, который отвечает за временной сдвиг кривой, ν - параметр, отвечающий за относительное расположение точки перегиба кривой [22, с. 243].

На основании результата оценки точности и эффективности моделирования сделан вывод о том, что обобщенные логистические функции дают чрезвычайно хорошее соответствие проведенным экспериментам ($r = 0,999$, $ef = 0,998$) [22, с. 244] и могут быть применены для контроля в целях прогнозирования всхода *Brassica napus* L. Накопление биомассы является хотя главным и определяющим, но не единственным проявлением роста популяции. Описание процессов микробиологического синтеза поэтому кроме раскрытия кинетики накопления биомассы должно также включать описание закономерностей аккумуляирования биологически значимых элементов в вегетативных органах растений.

Результаты. По результатам проведенного обзора методов моделирования продукционных процессов растений можно выделить два основных подхода к моделированию:

1) применение дифференциального уравнения прироста массы растения в единицу времени (дифференциальное уравнение материального баланса, учитывающее как фактический прирост массы растения (или массы полезного компонента), так и его уменьшение вследствие различных физиологических процессов). Решениями таких уравнений являются интегральные кривые, корни которых асимптотически приближаются к стационарному состоянию. В данном случае, внешний вид кривой изменения массы во времени никак не регламентируется.

2) применение логистической модели для прогнозирования контроля всхода растения в контролируемой среде. Логистический подход является эффективным методом в управлении протекающими потоками в растении, основывается на количественных оценках путем подгонки данных к логистической кривой. С помощью логистических функций можно описать

целый ряд факторов, одна группа которых способствует развитию процесса, а другая, наоборот, препятствует росту.

Обсуждения. Все рассмотренные модели учитывают различные ключевые функциональные процессы, протекающие в организме растения, а также внешние факторы, влияющие на рост. Для этих целей разрабатываются всевозможные подходы и инструменты, основанные на разных точках зрения. Этот выбор, однозначно, определяется научными и практическими целями. В свою очередь, обратная связь в такой системе экспериментальных исследований принесет новые знания о функционировании растения. Таким образом, разнообразие методов моделирования поможет найти ведущий процесс, усовершенствовав который можно будет стимулировать рост растения.

При разработке продукционных моделей лучше использовать в качестве основы дифференциальные уравнения динамики системы. Стоит отметить, что реализация модели только на основе дифференциальных уравнений в частных производных, которая бы учитывала все необходимые факторы, является сложным процессом в практическом применении. Поэтому имеет смысл совмещение дифференциальных моделей с регрессионным многофакторным анализом.

1.3 Моделирование динамики накопления биологически значимых элементов в вегетативных органах растений

Модели сельскохозяйственных культур дают количественную информацию, благодаря которой можно значительно оптимизировать производство и улучшить контроль за ростом. Математические модели должны основываться на физических и химических знаниях о том, где и в каких условиях произрастает изучаемое растение, а также физиологические процессы, протекающие в нем.

В целях получения возможности оценивания наиболее перспективных направлений в исследовании необходимым является проведение общего обзора существующих методов моделирования динамики накопления биологически значимых элементов, учитывающих взаимодействие между функциональными процессами растений и абиотические факторы.

В работе Antonio Juárez-Maldonado, Adalberto Benavides-Mendoza, Karim de-Alba-Romenus, América B. Morales-Díaz «Dynamic modeling of mineral contents in greenhouse tomato crop» [23] (Динамическое моделирование содержания минералов в тепличных культурах томатов) отмечена необходимость применения математической модели, которая позволит улучшить текущие знания о системе. За основу динамической модели содержания минеральных компонентов была взята математическая модель роста томата [23, с. 114,24].

$$\begin{aligned}
\frac{dB}{dt} &= P_g - b \left(fg_F W_F + vg_L \frac{W_L}{z} \right) - bR \\
\frac{dW_F}{dt} &= bg_F W_F - (1-b)r_F W_F - h_F W_F \\
\frac{dW_L}{dt} &= bg_L W_L - (1-b)r_L W_L - h_L W_L \\
\frac{dD_p}{dt} &= d_1 + d_2 \ln \left(\frac{T_g}{d_3} \right) - \ln \left(\frac{T_g}{d_3} \right) - d_4 t - h \\
\frac{dW_{HF}}{dt} &= h_F W_F \\
\frac{dW_{HL}}{dt} &= h_L W_L,
\end{aligned} \tag{18}$$

где B - баланс массы в процессе ассимиляции, W_F - сухая масса плода, W_L - сухая масса листьев, D_p - стадия развития, W_{HF} - сухая масса собранных плодов, W_{HL} - сухая масса собранных листьев, P_g - фотосинтез, $b = \begin{cases} 0, B = 0 \\ 1, B = 1 \end{cases}$, f - коэффициент, необходимый для ассимиляции, g_F - относительная скорость роста плода, $R = r_F W_F + r_L \frac{W_L}{z}$, r_F - относительная частота дыхания плода, r_L - относительная частота дыхания листа, z - фракция листьев вегетативной сухой массы, h - коэффициент урожайности, d_1, d_2, d_3, d_4 - параметры скорости развития растения, T_g - температуры почвы в теплице [23, с. 115].

Данная модель является подробной, имеет физический смысл, так как представляет описание ассимиляции между различными органами растения и развитием в целом.

В целях моделирования минерального состава в культуре томата построены 24 регрессионные функции каждого из 6 минералов «(N, P, K, Ca, Mg, S) для четырех органов растения (лист, стебель, плод и корень). Отмечено, что 11 моделей являются линейными, 10 квадратных, 2 кубических и 1 уравнение четвертого порядка» [23, с. 116].

Регрессионная модель, как промежуточный результат динамического моделирования, позволяет более эффективно управлять внесением удобрений, чтобы снизить производственные затраты и воздействие на окружающую среду от чрезмерного использования.

Взяв за основу предыдущую модель [23, с. 117] развития растения авторы Lino J. Ramírez-Pérez, América Berenice Morales-Díaz, Karim de Alba-Romenus, Susana González-Morales, Adalberto Benavides-Mendoza and Antonio Juárez-Maldonado в статье «Determination of Micronutrient Accumulation in Greenhouse

Cucumber Crop Using a Modeling Approach» [25] (Определение накопления микроэлементов в культуре огурца в условиях теплицы с применением модельного подхода) описали результаты исследования, которые доказывают промышленную эффективность выращивания огурца в условиях теплицы в целях накопления необходимого количества и контроля содержания микроэлементов. В качестве входных элементов взяты температура, свет и концентрация углерода [25, с. 5]:

$$W_{HF} = h_F * W_F * yF_C, \quad (19)$$

где h_F – функция коэффициента урожая огурца, W_F – сухая масса плода, yF_C – отношение общей массы плода к общей массе листьев, W_{HF} – сухая масса всего урожая.

С помощью данной модели роста была установлена линейная взаимосвязь между накоплением микроэлементов и функцией роста урожая:

$$TAM = BT * ACM, \quad (20)$$

где TAM – общее накопление каждого элемента в определенное время, BT – общая биомасса растения в рассматриваемое время (кг), ACM – среднее значение содержания микроэлементов, основанной на сухом весе ($мг\ кг^{-1}$).

Уравнение (20) является дополнением к модели роста в целях моделирования накопления каждого микроэлемента в культуре огурца.

Динамическая модель роста обладает высоким показателем эффективности (0,95), может быть полезна для определения адекватных стратегий в управлении выращивании огурца в условиях теплицы [25, с. 7].

Следующее исследование Karla Vilaça Martins, Durval Dourado-Neto, Klaus Reichardt, Quirijn de Jong van Lier, José Laércio Favarin, Felipe Fadel Sartori, Guilherme Felisberto and Simone da Costa Mello «Preliminary Studies to Characterize the Temporal Variation of Micronutrient Composition of the Above Ground Organs of Maize and Correlated Uptake Rates» [26] (Предварительные исследования для характеристики изменения во времени состава питательных микроэлементов надземных органов кукурузы и соотнесенных скоростей поглощения) предлагает методологию для характеристики состава различных органов и добычу, распределение и экспорт микроэлементов в ходе развития кукурузы. Традиционная методология удобрения, основанная на анализе почвы, рассматривает растение как экстрактор питательных веществ. Авторы предлагают модель для улучшения данной методологии, основываясь на временной изменчивости скорости поглощения питательных веществ. Такая модель основывается на кривой роста растения, представленной в виде накопленной массы общего сухого вещества растений на площади. Следующее

эмпирическое уравнение D представляет собой функцию Сигмоида (уравнение S-образной кривой) от переменной t:

$$D = k_1 + \frac{k_2 k_4^2}{k_4^2 + (t - k_3)^2}, \quad (21)$$

где k_1, k_2, k_3, k_4 - эмпирические параметры подгонки, откалиброванные экспериментальными данными путем минимизации ошибок суммы квадратов [26, с. 8]. Форма полученной сигмоидальной кривой показало увеличение накопления сухой массы с увеличением скорости на этапах вегетативного роста и понижение скорости на этапах репродуктивного роста.

Предложенная модель может быть использованная как основа для расчета и дальнейшего улучшения концентрации питательных микроэлементов в кукурузе и других культурах.

Целью работы «A Simple Model for Nitrogen-limited Plant Growth and Nitrogen Allocation» [27] (Простая модель для Азот-ограниченного роста растений и Распределение Азота) авторов A.W.M. Verkroost and M.J. Wassen является разработка простой модели роста, которая количественно определит взаимоотношения между распределением и концентрацией азота в растении.

Скорость роста в расчете на сухую массу пропорциональна приросту углерода (Hilbert, 1990) [27, с. 871] и этот прирост пропорционален приросту углерода в процессе фотосинтеза. Исходя из этого, темп роста является пропорциональным к количеству фотосинтетического азота [27, с. 872]:

$$\frac{dB}{dt} = k_3 k_4 N_1, \quad (22)$$

где B – биомасса (сухая масса растения), N_1 – содержание азота в листьях, k_3, k_4 – эмпирические параметры функции [27, с. 873].

В ходе проведенных вычислений было установлено, что распределение азота в органы растения совпадает с распределением биомассы.

Растения способны адаптироваться к изменяющимся условиям окружающей среды. Например, при ограничении поставок некоторого питательного вещества, регулирующая сеть избирательно способствуют относительному росту органов. Поэтому для оптимального развития растения в целом биомасса корней и побегов должна быть сбалансирована. Чтобы получить представление о данном механизме «Chrystel Feller, Patrick Favre, Ales Janka, Samuel C. Zeeman, Jean-Pierre Gabriel, Didier Reinhardt в статье «Mathematical Modeling of the Dynamics of Shoot-Root Interactions and Resource Partitioning in Plant Growth»» [28] (Математическое моделирование взаимодействия побег-корень и распределение ресурсов в росте растения)

разработали математическую модель, представляющую процесс роста корня и побега, и их взаимодействие посредством обмена субстратов сахара и фосфата.

Модель роста побега:

$$V^{sh'}(t) = g_{\max}^{sh} M_{g,sh}(V^{sh}(t)) S_{g,sh,su}^+(C_{su}^{sh}(t)) S_{g,sh,ph}^+(C_{ph}^{sh}(t)), \quad (23)$$

где $g_{\max}^{sh}$ – физический параметр; $M_{g,sh}(V^{sh}(t))$ – (функция Моно, представляющая собой математическую модель роста микроорганизмов)

$M(x) = \frac{x}{m+x}, x \geq 0$, m – положительный параметр, $M(m) = \frac{1}{2}$; $V^{sh}(t)$ – объем

побега во времени; $S^+(x) = \begin{cases} \frac{(x-u)^2}{a+(x-u)}, & x \geq u \\ 0 & , \text{ где } a > 0, u \geq 0 \end{cases}$ – параметры; $C_{su}^{sh}(t)$ – растворимые сахара, $C_{ph}^{sh}(t)$ – фосфаты.

Модель роста корня:

$$V^r(t) = g_{\max}^r M_{g,r}(V^r(t)) S_{g,r,su}^+(C_{su}^r(t)) S_{g,r,ph}^+(C_{ph}^r(t)), \quad (24)$$

где $g_{\max}^{sh}$ – физический параметр; $M(x) = \frac{x}{m+x}, x \geq 0$, m – положительный параметр, $M(m) = \frac{1}{2}$; $V^{sh}(t)$ – объем корня во времени; $S^+(x) = \begin{cases} \frac{(x-u)^2}{a+(x-u)}, & x \geq u \\ 0 & , \text{ где } a > 0, u \geq 0 \end{cases}$ – параметры; $C_{su}^r(t)$ – растворимые сахара, $C_{ph}^r(t)$ – фосфаты [28, с. 871].

Разработанная математическая модель является важным инструментом для распределения ресурсов между побегом и корнем при манипулировании производством растений, хотя обладает сложностью взаимодействия путей в регулирующей сети.

По результатам проведенного обзора методов моделирования накопления биологически значимых элементов можно сделать следующие выводы:

1) с точки зрения «математического анализа специфика моделей биологических систем состоит в том, что переменные, задающие состояние системы, законоопределены» [3, с. 179]. При разработке продукционных моделей лучшим методом является применение качественной теории дифференциальных уравнений. Стоит отметить, что реализация модели только на основе дифференциальных уравнений в частных производных, которые бы учитывали все необходимые факторы, является сложным процессом в практическом применении. Поэтому имеет смысл применение дифференциальных моделей с регрессионным многофакторным анализом.

2) все рассмотренные модели учитывают различные ключевые функциональные процессы, протекающие в организме растения, а также внешние факторы, влияющие на рост. Для этих целей разрабатываются всевозможные подходы и инструменты, основанные на разных точках зрения. Этот выбор, однозначно, определяется научными и практическими целями.

3) все представленные модели могут быть использованы в качестве основы для дальнейшего улучшения процесса накопления биологически значимых элементов растением. Кроме того, применяя данные модели можно определить потребность в микроэлементах.

1.4 Выращивание лекарственных растений гидропонными методами

1.4.1 Исследование условий роста наиболее распространенных лекарственных растений

«В настоящее время выращивание лекарственных растений как бизнес – очень выгодное и востребованное дело. В первую очередь этим товаром интересуется фармацевтическая промышленность. Эта отрасль всегда процветает. К тому же спрос на натуральные препараты повысил потребность производителей в травах. При этом резко упала возможность собирать травы в дикой природе. Если раньше организовывалась массовая закупка трав у населения, то сейчас у него все меньше возможностей проводить сбор трав на лугах, в полях, степях и прочее. Все свободное пространство выкупается под различные нужды, возделывается, отчего площади роста полезных трав сокращаются. Поэтому целенаправленная культивация лекарственной травы сегодня все больше востребована на рынке. Причем в фармацевтической промышленности востребованы различные части растений в зависимости от вида: корни; цветы; плоды; кора; листья; стебли» [29].

«Гидропоника одновременно с эффективностью выращивания растительных культур приносит и некоторые трудности для человека, использующего данную технологию. Одним из недостатков является высокая стоимость всего необходимого оборудования. При обычном выращивании в почве уход за растением не требует больших трудовых затрат, если природные условия благоприятны. Но в гидропонике растения под гораздо большим контролем со стороны человека. Необходимо постоянно проверять их для того чтобы убедиться, что они растут в тех условиях, которые им необходимы. Дозирование питательных веществ требует большой внимательности и осторожности, так как неправильное соотношение веществ в растворе может привести к неправильному росту растений, а также причинить и непоправимый урон их жизнедеятельности. Также, в гидропонных системах растения имеют небольшие корневые системы, из-за чего они не всегда могут хорошо себя поддерживать. Для тяжелых плодовых растений вероятно потребуются довольно сложные формы поддержки» [30].

По результатам различных исследований было выявлено то, что использование гидропонной культуры в промышленных условиях является рациональным, экономным, за счет оптимизации производственных функций, и отличается получением большего урожая. Например, результаты разных исследований использования гидропонной культуры для разного растениеводства показали преимущества в способности контролировать потребление основных питательных веществ, а также окружающей среды маслянистого рапса (*Brassica napus* L.) и латука посевного (*Lactuca sativa*). Результаты этих исследований показали, что контролировать потребление питательных веществ в среде намного проще для получения больше урожая.

Алоэ:

- на протяжении десятилетий Алоэ входит в топ-20 самых продаваемых трав, стабильно растущих со скоростью, превышающей отрасль;
- входит в топ-10 в разработке новых продуктов и напитков в качестве важного ингредиента для здоровья пищеварительной системы и ухода за кожей;
- топ-10 рейтинга алоэ в мировом выпуске новых продуктов;
- традиционные полезные свойства алоэ подкреплены почти 700 опубликованными научными и клиническими исследованиями;
- алоэ вера содержит более 200 биологически активных аминокислот, витаминов, антиоксидантов, минералов, ферментов и стероидов;
- алоэ является неотъемлемой частью традиционной медицины в Индии и традиционной китайской медицины по всей Азии;
- алоэ занимает второе место в списке наиболее традиционно и часто используемых ингредиентов как в латиноамериканской культуре, так и в азиатской культуре [31].

«Выращенное гидропонными методами алоэ образует невысокий стебель с многочисленными отростками. Листья длинные, мясистые, сидячие, по краям зубчатые, серо-зеленой окраски» [31, с. 19]. Необходимые условия для роста данного растения указаны в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Благоприятные условия для роста алоэ

Режим полива	Температура	Освещение	Субстраты	Состав питательного раствора	Грунт
Умеренный	19-25°C	Полутень или яркое солнце ему замечательно подойдут, но от прямых солнечных лучей его лучше притенить	Вермеккулит, керамзит, песок	В 2,5 л воды размешивают 0,5 г сернокислого кальция; 0,5 г сернокислого магния; 1 г азотнокислого калия; 0,25 г сернокислого железа и 0,25 г суперфосфата. Данным составом осуществляется полив большинства суккулентов [32].	Инертный

По внешнему виду растения можно определить, насколько оно обеспечено необходимым питанием. Здоровое алоэ радуется взгляду крепким стволом с зелеными мясистыми листьями. Если аккуратно отрезать один из них, то внутри будет видно сочное содержимое светло-зеленого цвета. Если кончики листьев начали желтеть и требуется их срочная подрезка. При нехватке удобрений ствол алоэ становится тонким и слабым, а листья – мелкими и бледными, нижние части начинают отмирать и опадать [32].

Matricaria recutita (Ромашка). Ромашка является одним из наиболее широко используемых лекарственных растений в мире и зарегистрирована в фармакопеях 26 стран. Ромашка обладает широкими возможностями в различных климатических и почвенных условиях и выращивается как ароматическое растение во многих странах мира. Годовое мировое потребление цветов ромашки составляет более 4000 тонн. Ромашка занимает первое место в списке наиболее традиционно и часто используемых ингредиентов в латиноамериканской культуре. Особенности условий роста данного лекарственного растения описаны в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Благоприятные условия для роста *Matricaria recutita*

Режим полива	Температура	Освещение	Субстраты	Состав питательного раствора	Грунт
Умеренный	19-25 °C	Ярко освещенное место	Торф, биогумус, перлит [33]	РН 6,5-7,5 Раствор Хогланда [34]: N 210 ppm K 235 ppm Ca 200 ppm P 31 ppm S 64 ppm Mg 48 ppm B 0.5 ppm Fe от 1 до 5 ppm Mn 0.5 ppm Zn 0.05 ppm Cu 0.02 ppm Mo 0.01 ppm	Инертный

Potentilla alba (Лапчатка белая). В таблице 1.3 указаны рекомендуемые условия для выращивания лапчатки белой на гидропонике.

Таблица 1.3 – Благоприятные условия для роста лапчатки белой

Режим полива	Температура	Освещение	Субстраты	Состав питательного раствора	Грунт
Умеренный, несколько раз в неделю	24–26 °С	16 ч – день, 8 ч – ночь	Торф, песок	РН 5,6-5,8 Раствор Murashige and Skoog, содержащей ¼состава макросолей, ¼ состава микросолей, витамины, хелата железа и кальция хлористого	Инертный

«С целью получения растительного лекарственного сырья использовали гидропонную установку типа «Минивит» (А/О «ДОКА» г. Зеленоград, Московская область). Средняя масса высаживаемого растения-регенеранта в гидропонику составляла 0,25 г. На площади 1 м² выращивали 750 растений. При круглогодичном выращивании количество биомассы лекарственного растительного сырья лапчатки белой по данному способу в условиях гидропонной установки «Минивит» составляло 10,05 кг/ м² по сырой массе за один год» [35]. Лапчатка белая чувствительная к засухе, засолению, на щелочных растворах желтеют листья [35].

Далее в таблице 1.4 представлены условия произрастания копеечника чайного (*Hedysarum neglectum*) и укропа (*Anethum graveolens* L.).

Таблица 1.4 – Благоприятные условия выращивания трав *Hedysarum neglectum* и *Anethum graveolens* L.

Растение	Режим полива	Температура	Освещение	Субстраты	Состав питательного раствора	Грунт
1	2	3	4	5	6	7
Копеечник чайный	Умеренный, несколько раз в неделю	19–25 °С	Ярко освещенное место	Торф, песок	РН 5,6-5,8 ¼ раствора Murashige and Skoog [36]	Инертный

Продолжение таблицы – 1.4

1	2	3	4	5	6	7
Укроп	Умеренный, несколько раз в неделю	24- 28 °С	Ярко освещенное место, продолжительный световой день	Керамзит, сверху присыпается вермекулит	РН 6,4-6,8 В зимний период соотношение питательных элементов следующее (мг/л): • азота – 180; • фосфора – 50–70; • калия – 360; • магния – 50–60; • кальция – 80–100. В летний период (мг/л): • азота – 140; • фосфора – 50–70; • калия – 220; • магния – 40–55; • кальция – 80 [37].	Инертный

«Для выращивания необходимо взять небольшие горшки с крупными отверстиями в днище, можно использовать горшочки для рассады. Их наполняют керамзитом, который засыпается слоем вермикулита, после чего в него помещают семена. Во время проращивания питательный раствор пока не требуется, достаточно поливать горшочки обычной водой и накрывать пленкой, чтобы получилась мини-теплица» [37].

«После того как появились всходы, пленку убирают, и горшки с ростками помещают в трубы с питательным раствором» [37].

«Насос должен автоматически запускаться раз в час и работать 20 минут, после чего остаток раствора будет вновь уходить через сливные шланги в емкость. Этого достаточно, чтобы корневая система получила хорошее питание, и укроп начал быстро расти» [37].

«Проточный метод отлично подойдет для выращивания и других видов пряных трав: петрушки, базилика, кориандра и прочих» [37].

«Желательно выбирать кустистые сорта с поздним цветением. Они позже дают зонтики, и можно будет несколько раз собирать урожай зеленых побегов. Однако при этом очень важно освещение: если световой день будет коротким, растение начнет цвести слишком рано. Если ростки стали слишком длинными и тонкими – это сигнал о том, что им не хватает света. Лампы нужно опустить ниже, они могут находиться на расстоянии 10-15 см. от грядки. При сборе урожая нежелательно полностью снимать ветки одного растения: лучше срезать крупные ветки с разных кустов. Если растение дало зонтики, его можно полностью убирать и использовать в пищу, а на его место посадить новый росток. Растения могут погибнуть от слишком обильной подкормки» [37].

Базилик (*Ocimum*). Базилик прекрасно растет практически во всех гидропонных системах. Для выращивания базилика высшего качества в коммерческих теплицах отлично подходит метод NFT. Для домашнего выращивания лучше подойдут система периодического затопления или плавающей платформы. Базилик лучше всего выращивать из семян. Необходимо регулярно прищипывать кончики роста, чтобы базилик сохранял густую форму и продолжал непрерывный рост. Базилик прекрасно подходит для новичков в сфере гидропоники. В таблице 1.5 обозначены основные условия для нормального роста базилика.

Таблица 1.5 – Благоприятные условия для роста *Ocimum*

Режим полива	Температура	Освещение	Субстраты	Состав питательного раствора	Грунт
Умеренный, исключить переувлажнение	16-20 °C	6-8 часов дневного света	Керамзит, торф	pH 5,5-6,0 Система удобрений Hydroponics Kit [38]	Инертный

Это растение не требует очень строгих параметров питательного раствора и растет практически в любой системе гидропоники [38].

1. При выращивании базилика необходимо поддерживать необходимый уровень влажности помещения, периодически обеспечивая проветривание. Это условие поможет избавить растение от болезней.

2. Если рассада базилика покрылась сине-красными пятнами, значит растению не хватает фосфора.

3. Если же на листьях появились ожоги, значит растение пострадало от яркого света.

4. Если стебли базилика вытянулись, значит необходимо сократить количество азотных подкормок и уменьшить полив или обеспечить больше света. Другим признаком нехватки света является бледность листьев.

5. Если верхушки базилика пожелтели, значит растению не хватает азота [38].

Шалфей (Salvia). «Шалфей - это полудеревянистый вечнозеленый кустарник высотой 60-120 см. Целесообразно возобновлять его посадки каждые четыре года. Площадь питания 45х45 см. Лучше всего размножается черенками, которые укореняются в песке» [39].

«Листья верхней части побегов сразу после цветения отличаются высоким качеством. По мере приближения зимы качество листьев ухудшается. В это время следует обрезать растения на высоте 15 см от поверхности субстрата. Растение выдерживает морозы до 27° ниже нуля, но плохо переносит продолжительные холодные ветры» [39]. В таблице 1.6 представлены основные требования к росту шалфея.

Таблица 1.6. – Основные требования к условиям роста Salvia

Режим полива	Температура	Освещение	Субстраты	Состав питательного раствора (мг/л)	Грунт
Умеренный	21 — 26°C	Более 11 часов в сутки	минеральную вату «Гродан», перлит, керамзит, синтепон	pH 5,5-6,0 N 200-220 P 70-90 K 280-320 Ca 170-190 Mg 65-70 Fe 3 Mn 1,2 Cu 0,2 B 0.5 Zn 0,4 Mo 0,06	Инертный

«Наиболее широко распространен в культуре вид *Salvia officinalis* с пурпурными цветами. Для размножения следует отбирать широколистные формы. Выращивают также далматский белоцветковый и розовоцветковый шалфей. Максимальный урожай получают на третий год культуры. Две срезки в год дают от 4 до 6 т сухих листьев с 1 га. Шалфей культивируют в грядах с боковыми стенками, но без дна и дают ему сухую питательную смесь» [39].

Значение электропроводности ЕС рабочего раствора следует поддерживать в районе 2.5, а значение pH 5.5 — 6.0. Если длительность светового периода менее 11 часов в сутки, то следует увеличить концентрацию до 3.0—3.6, но удерживать концентрацию азота на уровне 200-240 ppm. При

этих условиях даже небольшая корневая система обеспечивает эффективное поступление питательных веществ растению. Более высокое Е.С. обеспечивает адекватнее питание даже с более малой системой корня [40].

После высадки семян, следует подавать раствор половинной концентрации, с рН 5.8, однако концентрацию фосфора рекомендуется поддерживать на уровне 80 ppm. После прорастания семян, при появления первых оформившихся корешков можно начинать использовать раствор полной силы [40].

Освещение. Для продуктивного роста, лучше всего подходят металл-галоидные лампы. Интенсивность 250/400W на m^2 . Можно использовать и люминесцентные лампы, но у них ниже КПД [40].

Технологии. Для выращивания зелени чаще всего используются: капельный полив, техника питательного слоя, периодика, аэропоника [40].

Влажность. Не критично.

В качестве субстрата можно использовать минеральную вату «Гродан», перлит, керамзит, синтепон. Часто выращивают зелень в индивидуальных стаканчиках с торфяной смесью на капельном поливе [40].

Типичные ошибки. Не стоит высаживать вместе несколько различных эфиромасличных культур, так как они будут сильно угнетать друг друга [40].

Мята. «Мята не любит излишней влажности, но вместе с тем «пьет» достаточно много. Для нее идеально подходят установки по принципу глубоководного метода, так называемые DWC» [41].

«Приготовление питательного раствора для мяты — очень важное дело. Наши растения должны давать много листьев, это их главная задача. Из этого и стоит исходить при выборе добавок, удобрений и прочего. Здесь важно понимать, что нам нужны удобрения для роста растения, например, Bio Bloom, которого вполне можно добавить 10 мл на 10 литров раствора, но со стимуляторами цветения нужно быть очень осторожными — их добавляют в раствор не более, чем 3 грамма на 10 литров, так как цвести мяте незачем, она должна в первую очередь давать пышную зелень. Это основные правила приготовления питательного раствора для мяты, все остальное — как и для других специй и зелени» [41].

«Освещение растений. Зелень этой культуры любит хорошее освещение. Поэтому успешно выращивать мяту на подоконнике без дополнительных усилий можно разве что солнечным летом. Но когда световой день становится короче, совершенно необходима досветка. Обычно осенью, зимой и ранней весной мяту досвечивают в течение 5-6 часов дополнительно. Тогда зелень хорошо растет» [41]. В таблице 1.7 указаны основные характеристики по выращиванию данной травы.

Таблица 1.7. – Благоприятные условия в выращивании мяты

Режим полива	Температура	Освещение	Субстраты	Состав питательного раствора	Грунт
Умеренный	20 — 23°C	14-18 часов в сутки	Вермекулит, торф	pH 6.5–7.0 Bio Bloom Азот (N) - 2,0 % Фосфор (P ₂ O ₅) - 6,0 % Калий (K ₂ O) - 3,5 %	Инертный

«Обычно культивируют зеленую мяту, но если имеются корни, лучше выращивать круглолистную мяту (*M. Rotundifolia*). Сорт круглолистной мяты мало известен, но он далеко превосходит все другие сорта, так как он обладает прекрасным запахом, большой мощностью роста и высокой устойчивостью к ржавчине. Растения этого сорта быстрее высыхают, а листья лучше сохраняют зеленую окраску. Мяте нужно много влаги, поэтому лучшей средой для нее являются вермикулит или торф, которые следует всегда поддерживать во влажном состоянии» [42]. Автор книги «Промышленная гидропоника» М. Бентли [42] рекомендует вносить 450 г. сухой смеси удобрений на стандартный поддон площадью 18 кв.м.

1. От переизбытка влаги листья мяты желтеют.
2. Если листья мяты вялые, значит не хватает полива.

Руккола (*Eruca sativa*). Преимущества гидропоники перед простым грунтовым выращиванием для рукколы заключается еще и в том, что по своей природе она склонна впитывать из окружающей среды, почвы, влаги нитраты и соли тяжелых металлов [43].

Руккола прекрасно растет практически во всех гидропонных системах: методом плавающей платформы, техникой питательного слоя и другими, системой капельного орошения. Самый распространенный способ – проточный [43].

Оборудование:

- система: «Модернизируем горшок Click and Grow под систему DWC»;
- свет: «LED светильник для гидропоники на основе радиатора от старой видеокарты» [43].

Правильный состав раствора – это основа гидропоники. Воду из водопровода для него фильтруют. Раз в три недели питательный раствор меняют, так как в нем скапливаются остатки растений, загрязняющие систему и вызывающие загнивание корней [43]. В таблице 1.8 представлено ознакомление с условиями роста данного растения.

Таблица 1.8 – Благоприятные условия роста *Eruca sativa*

Режим полива	Температура	Освещение	Субстраты	Состав питательного раствора	Грунт
Обильный частый полив	16 — 20°C	12-16 часов в сутки	Керамзит	Система удобрений Hydroponics Kit	Инертный

Все зеленные растения не любят высоко концентрированный состав. Для рукколы необходим рН-нейтральный раствор. Самый подходящий для него состав – питательная смесь для салатов. Для ускорения появления зелени пару раз можно добавить стимуляторы роста. Листья рукколы могут начать желтеть, что свидетельствует о хлорозе [43].

Результаты. Существуют некоторые признаки, характерные для большинства растений:

1) толстолистость и мелколистость являются признаками светолюбивого растения, а тонкие и широкие листья определяют тенелюбивое растение.

2) низкие температуры и высокая влажность замедляют транспирацию, вследствие чего снижается поступление минеральных веществ, что приводит к торможению растяжения клеток, их дифференциации на ткани и соответственно, уменьшению роста и несвойственной растению мелколистности.

3) образование крупных воздухоносных полостей на стеблях и листьях свидетельствует о кислородном голодании растения, вызванного обилием воды в субстрате и т.д.

На основании описанных выше рекомендаций на рисунке 1.1 представлен алгоритм словесно описанных предложений по выращиванию большинства светолюбивых лекарственных растений.

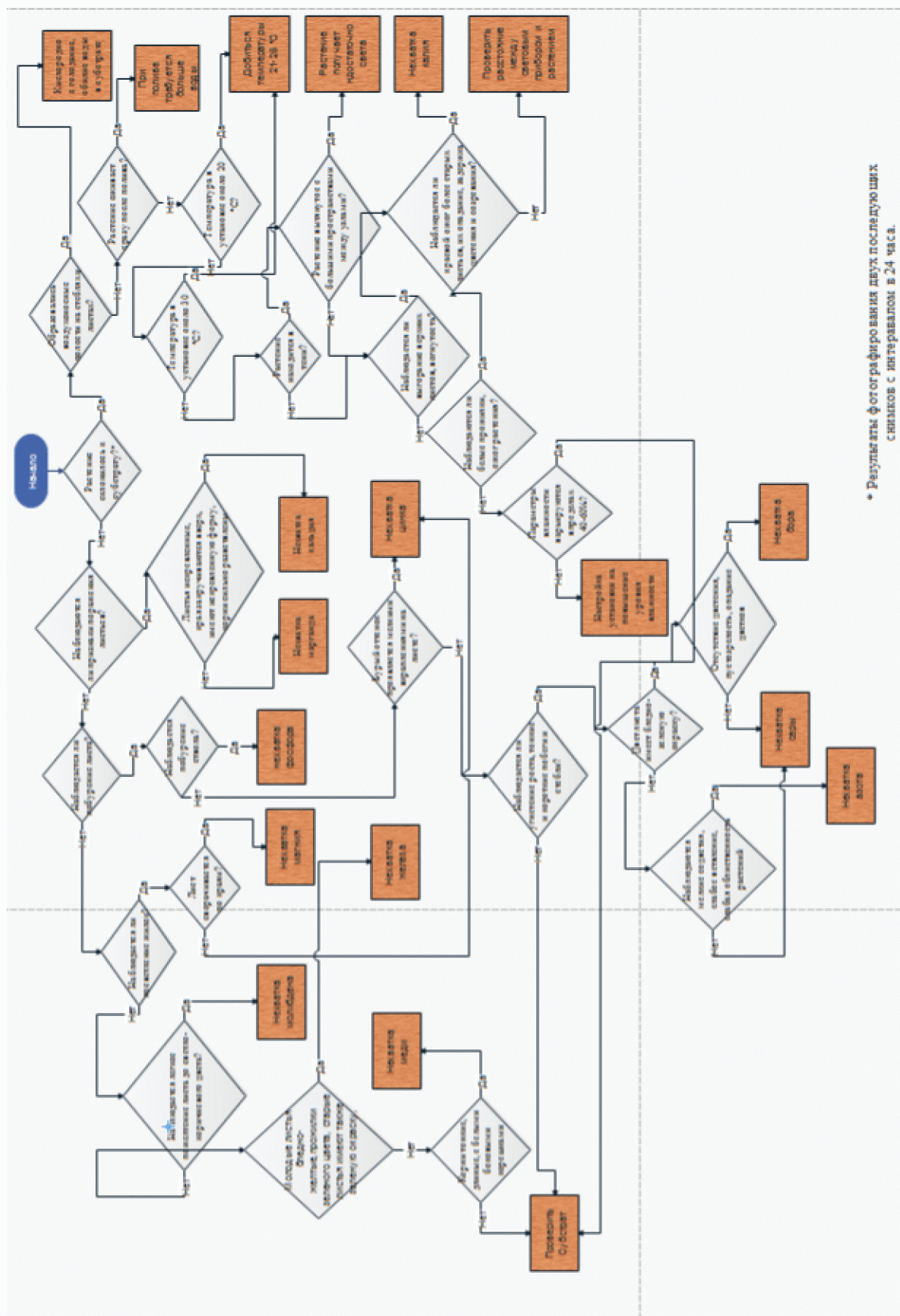


Рисунок 1.1 – Алгоритм описания предложений в процессе выражения большинства

Ниже представлен рисунок 1.2, на котором отражен разработанный обобщённый алгоритм, основанный на входных данных.

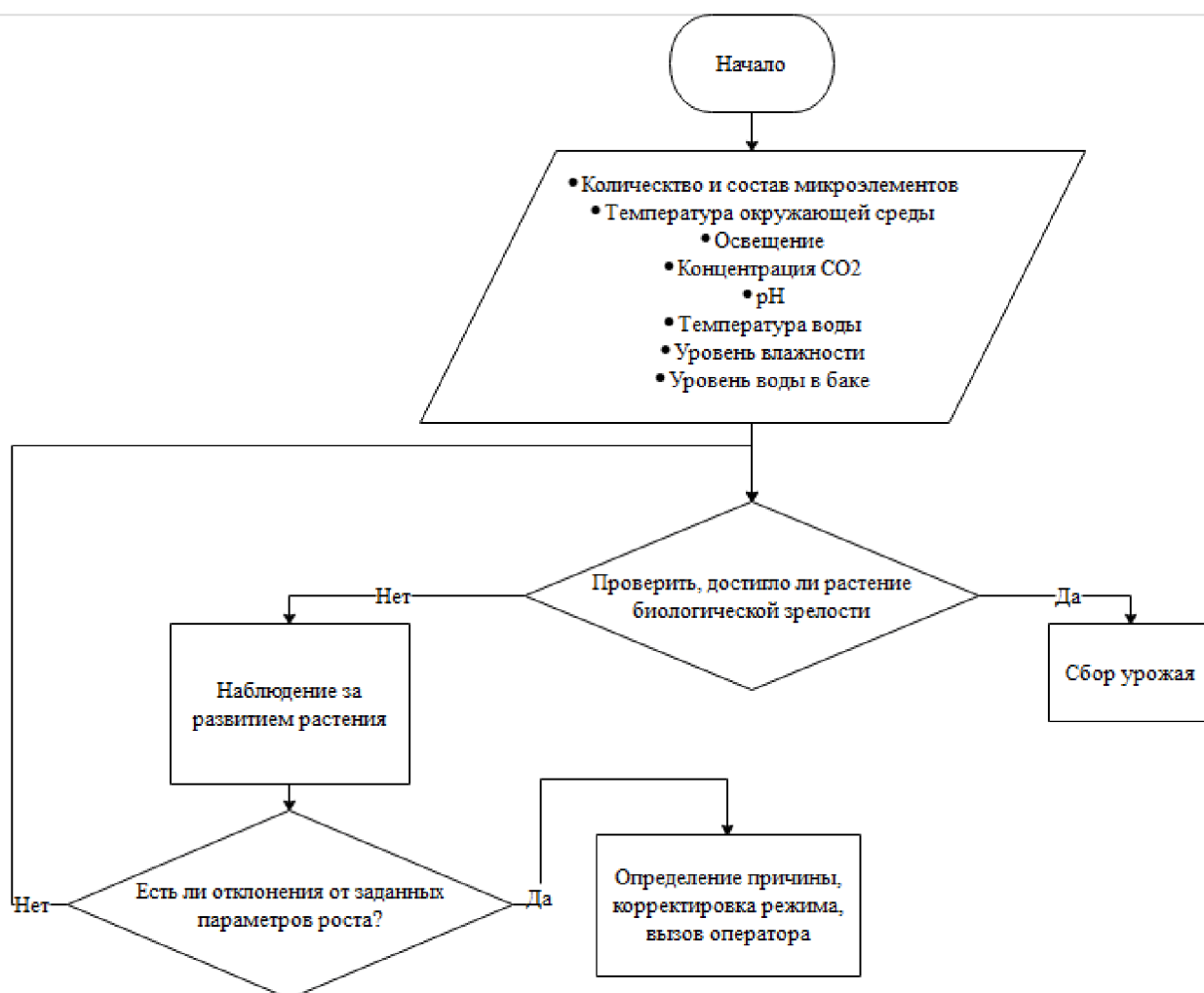


Рисунок 1.2 – Блок-схема алгоритма выращивания растений в условиях гидропонного предприятия.

Обсуждения. Массовое использование препаратов на основе натуральных компонентов проблему: ограниченное количество природных компонентов. Чрезмерное использование растений в целы промышленного производства приводит к определенным экологическим проблемам. Поэтому «важнейшей задачей для развития фармацевтической и пищевой промышленности, лесного комплекса и смежных отраслей является обеспечение возобновляемым сырьём необходимыми свойствами. Независимость влияния различных факторов среды (климат, сезон, погода, почвенные условия, вредители), более высокий выход и качество, возможность сертификации продукции делают привлекательной эту технологию выращивания в условиях гидропоники для производителей. Производство при четкой организации является экологически чистым, а продукт – свободным от гербицидов и тяжелых металлов» [29].

Эффективность системы, основанной на гидропонике, в значительной степени зависит от ее конструкции и способа управления применением воды и питательных веществ. Теплицы, как правило, не имеют точного контроля внутреннего климата и мониторинга параметров воды и питательных веществ. Таким образом, регулирование посредством автоматизации среды выращивания продукта в гидропонных системах имеет важное значение.

В частности, температура и влажность внутри теплицы не проверяются регулярно, что приводит к нежелательным ситуациям. Проведенные исследования показали, что для планирования и реализации системы автоматизации, специально предназначенной для теплиц, прежде всего необходимо иметь достаточно знаний о производстве тепличных растений.

Большинство производителей тепличных растений не используют системы автоматизации. Следовательно, невозможно сэкономить время и рабочую силу, а также невозможно получить продукцию высокого качества. Чтобы минимизировать все эти недостатки, крайне важно использовать системы автоматизации. Автоматическое управление позволяет широко использовать информационные и управляющие системы, чтобы минимизировать человеческий вклад в бизнес и процессы. В связи с тем, что системы автоматизации развиваются в результате длительных периодов исследований и благодаря опыту, они являются дорогостоящими с точки зрения затрат на установку.

В мире, где технологии развиваются быстрыми темпами, технологические достижения в области сельского хозяйства также растут высокими темпами. Этот прогресс еще больше ускорит распространение использования компьютеризированных систем автоматизации.

1.4.2 Опыт применения гидропоники в выращивании лекарственных растений

Лекарственные растения все чаще выращивают в промышленных масштабах, чтобы удовлетворить большой спрос на природные средства. Эти виды, как правило, выращиваются в открытом грунте, что приводит к значительной годовой изменчивости как в производстве биомассы, так и в содержании активных компонентов. Выращивание лекарственных растений в контролируемой среде улучшает концентрацию биологически активных веществ. Основными растениями, культивируемыми в такой системе, являются овощи или другие растения, используемые в пищевой промышленности.

Гидропонные системы представляют собой технологию выращивания растений с использованием воды и питательных веществ. Гидропонная технология может применяться для производства высококачественного растительного материала в течение всего года с учетом возможности контролировать условия выращивания и стимулировать вторичный метаболизм путем соответствующих манипуляций с минеральным питанием. Целью выращивания лекарственных растений в гидропонных системах является

достижение несравненного роста в сочетании с превосходным качеством сельскохозяйственных культур и высоким содержанием биологически активных веществ, преодолев такие проблемы, как неправильная идентификация, генетическая и фенотипическая изменчивость, изменчивость и нестабильность экстракта, токсичные компоненты и загрязняющие вещества [44].

В процессе выращивания лекарственных растений в условиях гидропонных систем можно столкнуться с такими проблемами, как экологические проблемы и искусственное опыление. Контролируя оптимальные параметры для создания благоприятных условий для прорастания можно достичь необходимых результатов. Помимо химических преимуществ, выращивание растений в гидропонных системах помогает защитить флору и сохранить разнообразие видов.

Большая часть растений в медицинских целях собирается из дикой природы, что привело к сокращению и исчезновению популяции. В целях сохранения редких видов растений и биоразнообразия Алтайские ученые разработали технологию, благодаря которой растения «Лапчатка белая» и «Копеечник чайный» можно выращивать на гидропонике, сохранив при этом экологическую безопасность продукции региона [45].

Институт проблем гидропоники имени Г.С. Давтяна выращивает экологически чистые растения в условиях гидропоники. Исследования, проведенными учеными, подтверждают, что «выращенные там лекарственные растения, сохраняя все свойства выращенных в естественной природной среде, являются экологически чистым продуктом, что особенно важно при производстве лекарственных препаратов» [46]. На базе института выращиваются такие лекарственные растения, как алое, валерияна, пустырник и другие. Так, в рамках диссертационной работы «Культивирование *Nuregicum Perforatum* L. сопряженным методом *in vitro* и гидропоники» Варданян А.Н. [46, с. 3] создала гидропонную культуру *N. Perforatum* (зверобой продырявленный). В ходе исследования выявлено, что благоприятный микроклимат гидропонной установки и пористая структура вулканического шлака, где поддерживается необходимая влажность, дают возможность сократить адаптационный период при пересадке микрорастений, без предварительной акклиматизации. На субстрат вулканического шлака приживаемость составила 75% [46, с. 4]. Основы возделывания зверобоя продырявленного традиционным и гидропонным способами сходны, однако гидропоника имеет ряд преимуществ: с единицы площади от двух до шести раз увеличивается урожайность растений, до 40–50% сокращаются расходы воды и труда, существенно ускоряется рост и развитие растений, бутонизация и цветение наступает на 10–15 дней раньше, по сравнению с почвенными растениями [46, с. 5]. В гидропонике оптимальным наполнителем оказался гравий [46, с. 5]. Фитохимическими исследованиями лекарственного сырья выявлено, что условия культивирования, вид гидропонного наполнителя и

возраст растений несомненно влияют на динамику накопления биологически активных веществ. Гидропонные растения, выращенные на наполнителе гравий, выделялись высоким содержанием гиперфорина (12.23 мг/г). Высокие показатели гиперина (0.8 мг/г) 21 наблюдались в сырье контрольного варианта, превышающем его количества в сырье полученном на вулканическом шлаке и гравии в 1.5 и 5 раз соответственно. Высоким содержанием псевдогиперина (0.4мг/г) и суммы флавоноидов (3.8–4.3%) выделялись растения вулканического шлака. Гидропонное лекарственное сырье по содержанию естественных и искусственных РН уступает почвенным, и экологически более чистое. Исследования лекарственного сырья на содержание тяжелых металлов показали, что наименьшее их количество обнаружено в гидропонных растениях, выращенных на наполнителе вулканический шлак, а наибольшее – в почвенных (контроль-Ереван), которые примерно в 2 раза превосходили гидропонные и в 1.2 раза – дикорастущие растения с окрестностей Севана [46, с. 7].

За последнее десятилетие использование лекарственных растений в качестве альтернативы традиционной в Северной Америке значительно возросло. Такие лекарственные растения, как эхинацея, чеснок, желтокорень, женьшень и гинкго билоба являются самыми продаваемыми растениями в данном регионе [47]. Большое количество видов растений локализируются на определенных областях, что ограничивает доступность для промышленных целей. Более того, чрезмерный сбор местных растений и в некоторых случаях вырубка лесов на больших площадях во всем мире способствовали потери многих видов, имеющих высокую терапевтическую ценность (Budzianowski и др. 1993). Как следствие, в настоящее время некоторые растения защищены законом, и сбор их урожая строго запрещен в «дикий природе». В связи с этим, ученые Канады на базе Центра садоводческих исследований университета Лавалья (Квебек, Канада) и компании Hydroserre Mirabel Inc. провели исследование роста девяти растений на гидропонных установках. Большинство выбранных для изучения растений были адаптированы к беспочвенной системе. По истечению 50-120 дней сухая масса корней и побегов тысячелистника, полыни обыкновенной, звездчатки средней, одуванчика лекарственного и валерианы лекарственной во много раз превысила показатели роста в открытом грунте. Согласно результатам, некоторые растения достигли 3,5-5,7 циклов за год [47, с. 298].

Гидропонные травы не только растут быстрее, они имеют значительно больший вкус и аромат, чем травы, выращенные в почве. Согласно исследованиям, проведенным в Университете Миннесоты, известно, что травы, выращенные на гидропонике, содержат на 20-30% больше ароматических масел, чем выращенные в полевых условиях. Поэтому небольшой сад с гидропонными травами может обеспечить непрерывный сбор продуктов для гурманов в относительно небольшом пространстве (SMITH, 2013) [44, с. 89].

В регионе Персидского залива также большим спросом пользуются растения, предназначенные в медицинских целях и для ароматерапии. Ввиду сурового климата, хрупкой экосистемы и ограниченных водных ресурсов, многие лекарственные растения импортируются извне. Для решения данной проблемы на базе Университета Персидского залива (Бахрейн) проведены эксперименты по выращиванию ряда растений в беспочвенной системе с использованием бетонных желобов [48]. Проведенные исследования показали, что растения были хорошо адаптированы к условиям гидропоники, продемонстрировав интенсивный рост и развитие. Экономия воды при этом составила 70% того, что расходуется при почвенном поливе. По истечению 3-5 месяцев общая биомасса шалфея лекарственного, немецкой и иорданской ромашки, тимуса обыкновенного при беспочвенном выращивании составила 264%, 313%, 220%, 215% и 243% соответственно [48, с. 67].

Различные виды гидропонных систем с различными питательными средами являются успешными для производства трав. Например, NFT (Nutrient film technique) отлично подходит для выращивания высококачественного базилика в коммерческих теплицах; системы капельного орошения, использующие минеральную вату, могут производить шестиметровые живые изгороди из розмарина; аэронические системы отлично подходят для выращивания эхинацеи и других лекарственных корнеплодов; и системы затопления и слива с гранулами из расширенной глины чрезвычайно универсальны для производства широкого спектра популярных трав [49].

Заключение и обсуждения. Выбирая гидропонную систему необходимо учитывать:

- 1) вегетативную часть растения, которая будет использоваться для получения необходимого сырья;
- 2) корневую систему, основная цель которой является доставка питательного вещества до органов растения.

Проанализировав цели применения гидропонных систем можно сделать следующие выводы:

- 1) наблюдается восходящая тенденция в выращивании культур с помощью гидропонных установок.
- 2) выращивание культур без почвы, как средство защиты окружающей среды могут быть внедрены повсеместно независимо от климатических факторов.
- 3) рост лекарственных растений в условиях гидропоники отличается интенсивностью.
- 4) для достижения наилучшего результата необходим строгий мониторинг в процессе роста.

Лекарственные растения, культивируемые в условиях гидропоники обладают значительно большей концентрацией, чем те же, в условиях дикой природы.

1.4.3 Анализ международного опыта создания и управления автоматизированными гидропонными системами основных мировых производителей

В настоящее время существует большое количество разных систем, рассчитанных на любые помещения, климатические условия, финансовые возможности. Производством гидропонных установок занимаются такие известные мировые компании, как GHE, AquaPot, Wilma и другие. Выбор на рынке достаточно большой, можно подобрать соответствующее оборудование в зависимости от цели выращивания.

Компания GHE (General Hydroponics Europe) относится к числу самых авторитетных в мире производителей удобрений и питательных составов для гидропоники [50].

General Hydroponics предлагает высококачественные гидропонные системы: от малых размеров до больших установок, от простейших до профессиональных. Эффективные системы при наименьших затратах как времени, так и пространства. Самая распространенная система GHE среди профессионалов, коллекционеров и любителей является AeroFlo [50].

AeroFlo насыщает кислородом питательный раствор, чтобы доставить кислород, воду и питательные вещества в идеальных пропорциях, таким образом создавая такую прикорневую зону, которая превосходит все, что можно найти в природе. Эта система позволяет получать сильные, большие растения и увеличенные урожаи. Для опытных садоводов, ищущих способ получить ранний урожай и увеличить продуктивность площадей выращивания, AeroFlo даст идеальные результаты [51].

AeroFlo – высокотехнологичные аппараты, разработанные для повседневных нужд. Это устройство обеспечивает идеальный уровень кислорода в питательном растворе, позволяя получить лучшие урожаи. Быстрые в сборке и гибкие в конфигурации, эти системы устраняют проблему работы с громоздкими и тяжелыми субстратами. AeroFlo – это модульные и расширяемые системы. Они подходят для всех площадей выращивания [51, с. 1-11].

AeroFlo 80 – аэро-гидропонная система AeroFlo для выращивания салатов, приправ и зелени с небольшой корневой системой и коротким жизненным циклом, рассчитанная на 80 растений [50].

Технические характеристики AeroFlo 80 [50]:

- 8 модулей по 10 горшочков диаметром 55 мм;
- размеры: длина – 100 см, ширина – 80 см, высота – 80 см;
- бак AeroFarm (45 литров);
- количество посадочных мест – 80 шт [50].

RainForest – наиболее мощная и эффективная система от компании GHE, действующая на принципе аэропоники – распыления питательного раствора на корневую систему растений [52].

Система RainForest 72 оснащена распылителем Vortex, который орошает гидропонные горшки снизу, что создает наиболее благоприятные условия для процесса корнеобразования. В данном устройстве можно проращивать семена и выращивать их вплоть до созревания, что позволяет минимизировать стресс растений при пересадке. Большой объем резервуара помогает стабилизировать уровень pH и электропроводность воды. Центральная трубка защищает от механических повреждений корни в процессе циркуляции. В системе можно использовать различные субстраты [52].

Технические характеристики GHE RainForest 72:

- размеры – 67х67х31 см;
- объем бака - 60 л;
- посадочных мест – 72;
- диаметр горшка - 5 см;
- напряжение сети - 220 В;
- мощность - 26,5 Вт [52].

AquaPot – высокоэффективная система, функционирующая на принципе, известном как DWC (Deep Water Culture) - культура глубокого погружения. Корни растения, погруженные в питательный аэрируемый раствор - основа AquaPot концепта [53].

Гидропонная система AquaPot XL8 компании AquaPot является совмещенной системой гидропоники (глубоководная культура и капельный полив) на 8 растений с дополнительным баком для смены раствора [53].

В системе автоматически поддерживается одинаковый уровень и состав раствора во всех ёмкостях. Для слива раствора предусмотрен сливной шланг [53].

В данной установке внедрена магистраль обратной подачи раствора в контрольное ведро диаметром 25 мм и магистраль подачи раствора диаметром 16 мм.

Технические характеристики AquaPot XL8:

- объем системы: 9х30 л;
- полезный объем: 180 л;
- посадочных мест: 8;
- внутренний горшочек d=16 см;
- воздушный компрессор на 4 канала для аэрации раствора;
- водяная помпа осуществляет подачу раствора «сверху» (капельный полив) и обеспечивает циркуляцию раствора;
- занимаемая площадь: 2м² [53].

Wilma Pot Complete System является разработкой компаний Atami и Nutriculture Grow System. Данная гидропонная система оснащена автоматическим капельным поливом на определенное количество посадочных мест. «Горшки различным объемом помещаются на опорную платформу, которая лежит на резервуаре с питательным раствором, который подается к каждому растению через капельницы системы капельного полива» [54]. Wilma

Pot Complete System может использовать следующие субстраты: керамзитовый, кокосовый, почвенный и минеральный. Оператор настраивает таймер на необходимую длительность и частоту подачи питательного раствора через капельницы в горшки с растением. В комплекте данной системой прилагаются две капельницы под разные типы субстратов. Wilma идеально подходит для растений, которые необходимо обеспечивать питанием часто и маленькими порциями [54].

«Технические характеристики Wilma Pot Complete System на примере Wilma Small 10 Pot Complete System:

- бак для раствора 85 л. – 1 шт;
- платформа для установки горшков – 1 шт;
- горшки Atami 6 л. – 10 шт;
- комплект соединительных труб и фитингов – 1 шт;
- помпа Wima Pump (MJ1000) – 1 шт;
- крышка на горловину бака – 1 шт;
- капельницы flood drippers (синие) – 10 шт;
- капельницы arrow drippers (черные) – 10 шт» [54].

Dutch Hydro Complex 1м² компании Hypod Universal - это гидропонная система с капельным поливом, состоящая из модулей. Очень проста в сборке, применении и может использоваться людьми, не имеющими образования растениевода. Система гидропоники Dutch Hydro Complex 1м² состоит из 12 модулей которые заполняются обычно керамзитом или минеральной ватой, можно использовать иной субстрат [55].

К каждому гидропонному горшку (11 л.) в системе подходит индивидуальный капельный шланг с распылителем, что дает возможность эффективно снабжать растение влагой. В каждом горшке установлен специальный сливной фитинг, который не дает субстрату закупорить слив жидкости. Система расположения гидропонных горшков, позволяет без труда перемещать их по всей конструкции гидропонной системы оптимизируя процесс выращивания [55].

Все модули для выращивания соединены одной капельной магистралью, по которой избыток раствора стекает в основной резервуар (бак) объемом 135 л., расположенный внизу системы, что позволяет экономить пространство и делает систему выращивания более эргономичной [55].

Горшки и емкости системы гидропоники Dutch Hydro Complex 1м². выполнены из пищевого пластика, а проточные элементы из специальных агро труб, которые не имеют каких-либо токсичных примесей [55].

В настоящее время существует малое количество полностью автоматизированных гидропонных систем. В основном имеются проекты системы автоматизированного контроля и управления.

Приведем пример наиболее популярного и зарекомендовавшего себя на рынке устройства прибор автоматизации выращивания OVER GROWER. OVER

GROWER является гидропонной системой, в основу работы которой положена техника капельного полива [56].

Прибор OVER GROWER – это полная автоматизация гидропоники для удаленного выращивания растений, представляющий собой систему из 8 датчиков, которая создает идеальные условия. Каждый OverGrower рассчитан на одну зону выращивания или на один вид растений, которые находятся на одинаковом этапе роста. Прибор может контролировать зону выращивания от одной небольшой гидропонной установки до фермы размером 5000 м². Особых условий к помещению для выращивания растений не требуется [56].

OverGrower учитывает все параметры питательного раствора и микроклимата, в которых развиваются растения. Прибор корректирует эти параметры, формируя оптимальные условия для наилучшего роста и развития растения. Over Grower встраивается в уже готовую гидропонную установку [56].

Регулирование кислотности раствора происходит путем внесения насосами специальной кислоты и щелочи. Исходя из показаний датчика pH, насосы доводят уровень кислотно-щелочного баланса до заданного значения, указанного в пунктах pH. Регулирование состава микроэлементов раствора происходит путем пропорционального внесения насосами питательных веществ удобрений (1-, 2- или 3-компонентных). Исходя из показаний датчика TDS, насосы доводят уровень минерализации до заданного значения, указываемого в единицах измерения концентрации ppm [56].

Комплект поставки:

- 1) прибор с установленным на нем программным обеспечением.
- 2) датчик pH – 1 шт в комплекте (периодичность обслуживания – 1 раз в месяц).
- 3) датчик комбинированный TDS + температуры раствора.
- 4) блок микроклимата – измеряет температуру воздуха, влажность, освещенность и концентрацию углекислого газа CO₂.
- 5) датчик уровня раствора.
- 6) блок управления из двух розеток для управления светом и охлаждением ламп.
- 7) блок управления из двух розеток для поддержания уровня и смены раствора.
- 8) блок управления из двух розеток для управления клапаном подачи газа CO₂ и вытяжкой.
- 9) блок питания.
- 10) инструкция с паролем доступа до интерфейса пользователя в форме электронного документа.
- 11) схемы выращивания в форме электронного документа [56].

Некоторые параметры в зависимости от периода роста меняются:

- количество и состав микроэлементов (TDS/EC);
- температура окружающей среды;

- фото-период;
- концентрация CO_2 в воздухе [56].

Другие параметры должны всегда оставаться стабильными:

- кислотно щелочной баланс pH;
- температура воды;
- уровень влажности;
- уровень воды в баке [56].

В системе используется 8 датчиков, которые контролируют:

- кислотно щелочной баланс pH;
- количество микроэлементов (TDS/EC);
- температура воды;
- температура воздуха;
- влажность;
- освещенность;
- уровень воды в баке;
- концентрация CO_2 в воздухе [56].

Лаборатория E-MODE.PRO производит автоматическое оборудование для управления и контроля процесса выращивания растений в оранжереях, теплицах и закрытом грунте, применяя современные методы гидропоники и аэропоники, капельного полива и питательного слоя [57].

Приборы автоматизируют управление такими важными параметрами как:

- уровень pH (водородный показатель) питательного раствора;
- уровень EC/TDS (уровень солесодержания или электропроводности) питательного раствора;
- объем питательного раствора в баке гидропонной и/или ирригационной системы;
- влажность субстрата и воздуха в оранжерее;
- температура в оранжерее и питательном растворе;
- система вентиляции, зашторивания и проветривания;
- уровень подачи углекислого газа;
- параметры освещенности и световой период [57].

В зависимости от необходимости можно подобрать частично или полностью автоматизированную комплектацию, состоящую из приборов E-MODE.PRO [57].

Устройство «Подсолнух» предназначен для выращивания крупных культур, достигающих в росте 1-1,5 м. Аппарат довольно большой с вместительным бочком для раствора. В конструкцию встроена подсветка для стимуляции роста, что является очень удобным и эффективным [58].

Устройство оснащено несколькими платформами для растений – можно выращивать довольно много растений. Вся работа по подаче питательного раствора автоматизирована. Нужно лишь менять раствор время от времени [58].

Комплект поставки:

- металлический каркас;

- вегетационные лотки – 6 штук;
- резервуар объёмом 40 литров для раствора;
- система подачи раствора;
- система искусственного освещения;
- автоматизированный модуль управления системой [58].

Идея системы «Pi Rack / 240» принадлежит известной нидерландской компании «Pi Technics». «Pi Rack / 240» рассчитана на 240 посадочных мест, она обеспечивает в автономном режиме подачу к каждому горшку с растением питательного раствора. Управление осуществляется также для каждого места в отдельности. Механизм автоматической вентиляции обеспечивает хорошие климатические условия [59].

Занимающая незначительную площадь, «Pi Rack/240» способна приносить очень высокий урожай. Установка идеально подходит как для домашнего использования, так и для коммерческого выращивания [59].

В комплект «Pi Rack / 240» включены следующие элементы:

- металлический многоуровневый каркас;
- посадочные места со съёмными горшками – 240 штук;
- система вентиляции;
- автономная система подачи питательного раствора для каждого горшка;
- подробная инструкция по сборке и управлению системой.

«Pi Rack / 240» занимает площадь $3,0 \text{ м}^2$, имеет диаметр многоугольного основания 2,15 м. и достигает высоты 2,2 м [59].

Результаты. Основными элементами гидропонной установки являются: корпус, осветительная система, система контроля питательных веществ, система контроля основных параметров микроклимата, система наблюдения и управления установкой [60].

Контроль за своевременной подачей питательных веществ должен происходить постоянно и корректироваться при необходимости. В целях автоматизации данного процесса необходимо производить контроль при помощи специальных датчиков:

- датчик pH, контролирующий уровень кислотности раствора;
- датчик TDS, измеряющий уровень электропроводности и минерального насыщения раствора;
- датчик температуры воды;
- датчик глубины раствора.

Температура и влажность контролируются и корректируются также с помощью датчиков автоматизации [61].

Управление установкой состоит из панели управления (дисплея), находящейся непосредственно на установке или может иметь вид приложения для удаленного контроля и наблюдения. В обязанности данной системы входит вывод всей необходимой информации, получаемой от датчиков и своевременное оповещение в случае аномальных ситуаций. Частью системы

управления и контроля являются электроклапаны, реле, перистальтические насосы, компрессоры, системы вентиляции и. т. д. [62].

Обсуждения. Гидропонная автоматическая установка предназначена для выращивания растений в теплицах на приусадебных участках, обогреваемых помещениях различной площади и представляет собой технический комплекс обеспечения жизнедеятельности с гибкой системой установки, контроля и регулирования параметров микроклимата [63].

Структурная организация гидропонной автоматической установки, вне зависимости от вида выращиваемой растительной продукции и места расположения, одна и та же и может претерпевать лишь небольшие количественные изменения – за счет изъятия или дополнения некоторых узлов или блоков контроля, или регулирования конкретного параметра микроклимата для конкретного вида растений [64].

Системы электропитания и исполнительные механизмы функциональных блоков гидропонной автоматической установки принципиально различны в зависимости от месторасположения. Все рассмотренные выше системы автоматического управления гидропонными установками (системами) представляют собой набор независимых, автономно действующих замкнутых систем управления их отдельными параметрами по определенной программе. При этом ни одна из рассмотренных систем автоматического управления не обеспечивает обратной связи по эффективности роста растения, обратная связь имеется лишь по параметрам, влияющим на этот рост. На сайтах производителей рекомендуют вносить коррективы в программы управления ростом на основе результатов визуальных наблюдений. То есть, предлагают осуществлять обратную связь по эффективности роста растения посредством человека. Это предъявляет определенные минимальные требования к квалификации оператора гидропонной установки и делает невозможным создание полностью автоматической адаптивной системы управления ростом растения в условиях гидропоники без дооснащения имеющихся систем автоматического управления устройствами и алгоритмами обеспечения обратной связи по эффективности роста растения.

Очевидно, «система автоматизации для гидропоники является перспективной областью для дальнейших исследований. Решение ряда задач, связанных с обеспечением более комфортных условий для роста растений, позволит совершить качественный скачок технологии гидропоники, а также найти новые возможности применения систем автоматизации» [56].

Главное преимущество автоматики – это точность измерения и управления и что так же немаловажно – отсутствие человеческого фактора.

1.5 Применение систем распознавания образов для автоматизации процесса классификации объектов растениеводческого производства и выявления отклонений в развитии растений

В работе [65] приведены результаты исследований по определению способности горькой дыни давать хорошую урожайность. «Листья растения были классифицированы как «хорошие» и «плохие» по их описанию. В исследовании использовался алгоритм машинного обучения через сверточную нейронную сеть. Обучение осуществлялось благодаря совместным возможностям Keras, TensorFlow и Python. В результате исследования было доказано, что база из 293 изображений может позволить машине узнать разницу между хорошим и плохим растением. Применение для этих целей как Keras, так и MATLAB имеет одинаковую эффективность, с той лишь разницей, что MATLAB в основном запускается в локальной среде, а Keras можно загружать в облаке, а также запускать вместе с другими облачными платформами, созданными Google» [65, с. 3].

В работе [66] приведены результаты исследований по обнаружению болезней растений и вредителей с использованием функций глубокого обучения. В исследовании оценивались результаты производительности, используя различные подходы девяти мощных архитектур глубоких нейронных сетей для обнаружения болезней растений. Эксперименты проводились с использованием данных, состоящих из реальных заболеваний и изображений вредителей из Турции. «Это исследование оценило производительность, попробовав разные подходы девяти самых мощных архитектур нейронных сетей для проблемы идентификации болезней растений: AlexNet, VGG16, VGG19, GoogleNet, ResNet50, ResNet101, InceptionV3(InceptionV3), InceptionResNetV2 и SqueezeNet. Каждая из используемых глубоких моделей имеет уникальные особенности, такие как количество слоев, количество соединений и типы фильтров. Оценки показали, что модели глубокого обучения дают наилучшие результаты» [66, с. 1636-1651].

В работе [67] приведены результаты исследований по применению сверточных нейронных сетей для идентификации и классификации болезней бананов. «Для классификации набора изображений и возможности сопоставить здоровые и больные листья банана использовалась архитектура LeNet, состоящая из модели самообучения и модели классификации. Вначале сеть учится обнаруживать различные высокоуровневые функции из входных изображений. Она состоит из последовательности слоев свертки и объединения. Целью свертки является извлечение элементов из входного изображения. Она состоит из набора обучаемых фильтров. Каждый фильтр применяется к необработанным значениям пикселей изображения с учетом красного, зеленого и синего цветовых каналов в режиме скользящего окна, вычисляя точечное произведение между пикселем фильтра и входным пикселем» [67, с. 80]. «На этапе классификации используется полностью связанные слои, где каждый нейрон обеспечивает полное подключение ко всем изученным картам

характеристик, выпущенным с предыдущего уровня в нейронной сети свертки. Эти соединенные слои основаны на функции активации softmax для вычисления баллов классов. Входные данные классификатора softmax представляют собой вектор признаков, полученных в результате процесса обучения, а выходные данные – вероятность того, что изображение принадлежит данному классу. Предложенный подход может служить инструментом поддержки принятия решений, чтобы помочь фермерам идентифицировать болезнь на банановом растении. Следовательно, фермер может сфотографировать лист с симптомами, а затем система определит тип заболевания» [67, с. 81].

В работе [68] приведены результаты исследований по классификации формы клубничных фруктов с помощью машинного обучения с целью повышения точности сортировки и внедрения компьютеризации в этой области: «В общей сложности 2969 изображений плодов клубники были получены цифровой камерой. Четыре типа описаний были извлечены из цифровых изображений клубники:

- 1) измеренные значения, включая длину линии контура, площадь, длину и ширину плода, соотношение ширины/длины плода;
- 2) индекс подобия эллипса;
- 3) эллиптические дескрипторы Фурье;
- 4) вычитание цепного кода.

Эти дескрипторы были использованы для классификационного теста вместе с алгоритмом «Случайный лес». Полученные результаты свидетельствуют о высокой способности машинного обучения точно классифицировать формы фруктов» [68, с. 465].

В работе [69] приведены результаты исследований по разработке системы классификации пшеницы в режиме реального времени для селективных гербицидов с использованием широкой оценки пшеницы в глубокой нейронной сети. «Основной целью исследования является разработка системы машинного зрения, которая идентифицирует пшеницу, основываясь на ее местоположении. Для этого исследователями была разработана роботизированная система реального времени, позволяющая находить растение в критической зоне с помощью распознавания образов и машинного зрения. Microsoft Visual C++ 6.0 использовался в качестве программного обеспечения для разработки системы». Были проведены различные эксперименты с целью оценки эффективности предложенного алгоритма с точки зрения различия между различными типами пшеницы. Кроме того, эксперименты также проводились в различных полевых условиях. Результаты моделирования показывают, что предложенные алгоритмы показали 94 % успеха в плане классификации популяции пшеницы, которая состоит из 80 образцов, из которых 40 являются узкими и 40 широкими [69, с. 155].

В работе [70] приведены результаты, доказывающие применимость нейронных сетей в качестве классификаторов для достижения идентификации и

классификации болезней растений на основе обработки их изображений. Для исследуемых образцов болезней пшеницы и винограда наилучшая точность прогнозирования достигла 97,5 % и 94,29 % соответственно. Данные результаты были достигнуты с помощью применения четырех видов нейронных сетей: сеть обратного распространения, нейронные сети радикальной базисной функции, обобщенные регрессионные сети и вероятностные нейронные сети [70, с. 2161].

В работе [71] приведены результаты распознавания болезней чайного листа. Точность процесса тестирования составила 91 %. Для достижения поставленной цели применили специальный распознаватель болезней чайного листа и нейронную сеть для извлечения признаков. Метод явился малозатратным и неразрушающим, что доказывает обоснованность применения нейронных сетей [71, с. 29].

Проведенный обзор [65-71] показывает результативность применения машинного обучения для распознавания болезней и вредителей в растениеводстве. Также показана эффективность применения нейронных сетей для этих целей. В рассмотренных выше исследованиях классификация осуществлялась на основе анализа формы и (или) расцветки (раскраски) листьев или плодов растений.

Вместе с тем, среди официально публикуемых материалов авторами не обнаружено работ, в которых исследовалось бы создание системы распознавания отклонений в развитии растения *Aloe Arborescens* L., вызванных недостатком полива или освещения.

Понятие о компьютерном зрении объединяет в своем составе теоретические основы и совокупность технологий для автоматического анализа изображений. Данное направление науки и техники использует различные методы обработки графической и видео информации для получения описания реальных объектов и сцен. На данный момент накоплен богатый практический опыт по созданию алгоритмов для автоматического детектирования, классификации и сегментации объектов на изображениях. Начиная с 2012 года, глубокие сверточные нейронные сети по точности и скорости являются неоспоримым лидером в этой области [72].

Таким образом, целесообразно выполнить синтез модели классификатора при помощи аппарата глубоких сверточных нейронных сетей (ГСНС) для следующих целей:

- сокращения времени разработки;
- достижения высоких показателей качества;
- экономии вычислительных ресурсов;
- возможной унификации при решении схожих задач в будущем.

Вместе с этим, следует указать на возможные трудности и недостатки, связанные с использованием для классификации ГСНС. Во-первых, подбор правильной архитектуры нейронной сети во многом представляет собой эмпирический поиск и зависит от опыта и квалификации исследователя. Не

существует готовых методов выбора или построения наиболее адекватной для конкретной задачи структуры сети. Во-вторых, процесс обучения ГСНС очень длительная и ресурсоемкая задача, требующая большого объема обучающих данных, дорогостоящего вычислительного оборудования и значительных временных затрат. В-третьих, в процессе обучения нейронной сети велика вероятность переобучения модели, что негативно скажется на ее обобщающей способности. В-четвертых, результаты классификации на основе ГСНС сложно интерпретировать, что накладывает ограничение на применение нейронных сетей в некоторых задачах компьютерного зрения.

Среди распространенных архитектур ГСНС, изначально применяемых для классификации изображений, можно выделить сети LeNet [73] и AlexNet [74]. Данные архитектуры относительно неглубокие, в них используются сверточные ядра большего размера во входных слоях и меньшие ядра ближе к выходу. Наиболее часто используемая в настоящее время и более эффективная активационная функция ReLU (Rectified Linear Unit) [75] применяется только в сети AlexNet.

К более современным архитектурам ГСНС можно отнести VGGNet [76] и Inception [77]. Для сети VGGNet существуют реализации для 16 и 19 слоев, а главным нововведением в архитектуре можно считать использование сверточных фильтров размером 3×3 . Сеть Inception разработана компанией Google и отличается от предыдущих сетей уже более сложной структурой. Эта ГСНС содержит порядка 100 различных блоков с общей глубиной в 27 слоев. Для лучшего распространения градиента авторы данной сети применили вспомогательные классифицирующие сети поверх некоторых промежуточных слоев.

Одними из самых глубоких нейронных сетей, активно используемых на практике, на данный момент являются сети архитектуры ResNet различных модификаций [78]. В данном классе ГСНС применена новая концепция глубокого остаточного обучения (deep residual learning), что позволило обучать сети с числом слоев, измеряемых сотнями.

Увеличение глубины сверточных нейронных сетей позволяет повысить качество классификации и обрабатывать все более сложные в плане представленных объектов и сцен изображения. Однако следует отметить, что качество классификации не сильно изменяется при многократном увеличении числа слоев [79]. Кроме того, анализ изображений растения *Aloe Arborescens* L. в рамках поставленной задачи не требует поиска сложных геометрических форм и разнообразных классификационных характеристик. Следовательно, в данном случае более обоснованно использовать сети неглубокой архитектуры, такие как VGGNet. Более сложные ГСНС уже весьма требовательны к аппаратным ресурсам, как в процессе обучения, так и в процессе последующего использования.

В пользу выбора архитектуры VGGNet также говорит тот факт, что можно использовать предобученную ГСНС по технологии трансферного обучения для:

- экономии времени на подготовку обучающей выборки и обучение сети;
- снижения вычислительных ресурсов и требований к аппаратному обеспечению.

В открытом доступе [80] имеются значения весовых коэффициентов уже обученной сети VGG16 на наборе данных ImageNet (Соединенные Штаты Америки) [81]. Данный набор содержит изображения для 1000 классов, разбитые на три набора: обучающий (1,3 миллиона изображений), валидационный (50000 изображений) и тестовый (100000 изображений). Все изображения трехканальные размера 224×224.

В итоге использование в работе предобученной сети VGG16 существенно сократит время на разработку классификатора и позволит избежать ряда недостатков, связанных с применением нейронных сетей.

Проведенный обзор [73-81] показывает эффективность применения нейросетевых технологий машинного обучения для распознавания болезней и вредителей ряда растений. На основании этого становится очевидным целесообразность применения накопленных знаний в области глубокого обучения для новой и востребованной предметной области по выращиванию растений в гидропонных установках. Поэтому, обоснованной является необходимость проведения исследования, посвященного изучению возможности адаптации предобученной ГСНС для создания модели классификатора отклонений в развитии растения *Aloe Arborescens* L. по его фотографиям. В результате анализа литературы по применению архитектур ГСНС для классификации изображений установлено, что задачам исследования будет удовлетворять архитектура VGG16.

Вывод по первому разделу

1. В целях автоматического управления производственными процессами растения в условиях гидропоники оптимальным будет использование интеграла от дифференциального уравнения материального баланса. В свою очередь, логистический подход является эффективным методом в управлении протекающими потоками в растении, основывается на количественных оценках путем подгонки данных к логистической кривой. Причем, логистической функцией можно описать ряд факторов, одна группа которых способствует развитию процесса роста, а другая препятствует.

2. Целесообразным является применение достижений в области нейронных сетей для обеспечения информационной поддержки системы выращивания растений. Использование в работе предобученной сети VGG16 сократит время на разработку классификатора и позволит избежать ряд недостатков, связанных с применением нейронных сетей.

3. Эффективность рассмотренных гидропонных установок зависит от их конструкции и степени подготовки специалиста, как управленца параметрами установки. Поэтому для промышленных масштабов необходимо, во-первых, наличие кадров, специализирующихся на выращивании конкретных растений, во-вторых, четкого визуального наблюдения за целым сектором культивируемого продукта. В связи с этим появляется необходимость минимизации человеческого участия в процессе производства растений в современных гидропонных устройствах, дополнив их автоматизированными информационными и управляющими системами.

4. Целесообразно выполнить синтез достижений в области математического моделирования и глубоких сверточных нейронных сетей для сокращения времени разработки, достижения высоких показателей качества, экономии вычислительных ресурсов и возможной унификации сложных задач в будущем. Данный синтез поспособствует организации автоматического управления ростом растений в условиях гидропонных систем.

2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РОСТА ЛЕКАРСТВЕННОГО РАСТЕНИЯ

2.1 Моделирование роста растения *Aloe Arborescens* L.

Рост растений можно определить, как увеличение объема и массы растения с образованием или без образования новых структур, таких как органы, ткани, клетки или клеточные органеллы [82]. Использование междисциплинарного подхода необходимо для продвижения исследований в области моделирования роста растений и, это один из наиболее сложных аспектов. В ботанике термин «рост» обычно определяется как необратимый рост размеров растений из-за автономного производства органических веществ. Моделирование роста растений стало ключевым направлением исследовательской деятельности, особенно в области сельского хозяйства, лесного хозяйства и наук об окружающей среде. В связи с ростом компьютерных ресурсов и обменом опытом между биологами, математиками и программистами, разработка моделей роста растений значительно продвинулась за последние два десятилетия. Рост – это количественный феномен, который поддается измерению. В зависимости от исследуемого объекта и цели, для которой проводятся измерения, показателем роста может быть увеличение массы сухого вещества, свежей массы, высоты, объема, площади листовой поверхности и т.д. [83] В нашем исследовании показателем роста является увеличение относительной площади растения. Относительная площадь растения определяется как отношение фактической площади проекции растения на плоскость 2D фотографии в натуральных единицах (мм^2 , см^2 и т.п.) к начальной площади проекции растения в первый день исследований. При этом все фотографии конкретного растения выполняются с одной точки (одинаковое расстояние и ракурс) и с одинаковым увеличением («Зумом»).

Математическое моделирование этих процессов развития живых организмов может быть очень важным инструментом для правильного описания сложных процессов эволюции и геометрии морфогенеза во времени и пространстве. Для математического описания динамики роста растений широко используются уравнения S-образной кривой (сигмовидной кривой). Сигмовидные кривые удовлетворительно описывают рост отдельных органов. Общим правилом в этом процессе является первоначальное «увеличение темпов роста до точки, в которой достигается максимум, с последующим падением этого показателя. Кривые роста часто могут быть описаны математическими функциями». Одна из таких функций, называемая логистической, нашла относительно широкое применение [19, с. 1-22; 83, с. 67-76]. Предлагаемая модель учитывает дополнительные характеристики роста, позволяя моделировать ранее нетипичную динамику увеличения относительной площади растения путем разумного выбора значений параметров, взяв за основу логистическую функцию общего вида:

$$S(t) = S_{\max} \frac{S_0 e^{\mu t}}{S_{\max} - S_0 + S_0 e^{\mu t}}, \quad (25)$$

где $S_{\max}$ – максимальный размер исследуемого объекта, S_0 – исходный размер исследуемого объекта, μ – коэффициент роста объекта, t – промежуток времени.

В предлагаемом исследовании в логистическую функцию (25) был добавлен еще один коэффициент b . Данный коэффициент дополнительно учитывает нелинейность влияния времени на процесс роста:

$$S(t) = S_{\max} \frac{S_0 e^{\mu t^b}}{S_{\max} - S_0 + S_0 e^{\mu t^b}}. \quad (26)$$

С учетом того, что при измерении площади в относительных единицах (о.е.) $S_0 = 1$, а также с учетом того, в данном исследовании $S_{\max}$, μ и b рассматриваются как функции от интенсивности полива (W , д.е.) и освещения (L , д.е.), формулу (26) можно представить в виде:

$$S(t, W, L) = S_{\max}(W, L) \cdot \frac{e^{\mu(W, L) \cdot t^{b(W, L)}}}{S_{\max}(W, L) - 1 + e^{\mu(W, L) \cdot t^{b(W, L)}}}. \quad (27)$$

Достоверность математической модели (формула 27) определяли с помощью коэффициента нелинейной множественной корреляции [84], формула (28), так как на величину результативного признака одновременно влияют несколько факториальных признаков. Значимость этого коэффициента определяли по критерию Фишера [84, с. 125].

$$R = \sqrt{1 - \frac{(n-1) \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{(n-p-1) \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}} \quad (28)$$

где n – число экспериментов;

p – число независимых входных параметров;

i – порядковый номер эксперимента;

y_i – экспериментальное значение выходного параметра в i -ом эксперименте;

$\hat{y}_i$ – расчетное значение выходного параметра, рассчитанное с помощью математической модели для условий (значений входных параметров) i -ого эксперимента;

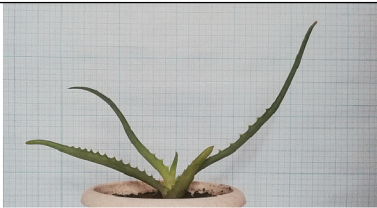
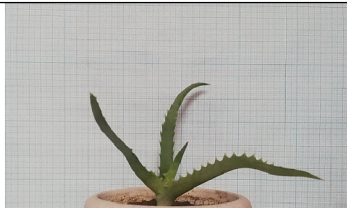
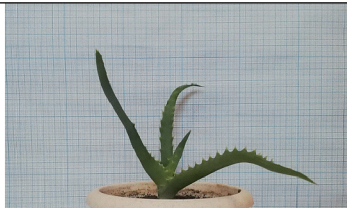
$\bar{y}_i$ – среднее значение выходного параметра, полученное в результате определения арифметического среднего результатов всех n экспериментов.

2.2 Материалы и методы создания параметризированной модели роста растения *Aloe Arborescens* L.

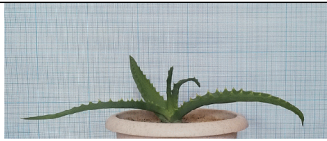
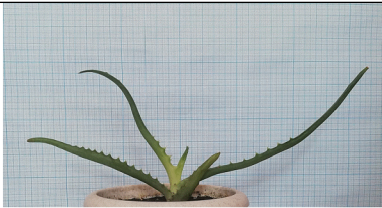
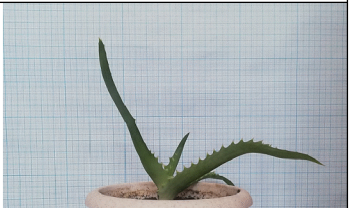
Объектом исследования является растения *Aloe Arborescens* L., которые выращивались в терморегулируемом помещении (22 °С, влажность 40-60 %) при 12 часов:12 часов, 6 часов: 18 часов света и темноты. Перед тем, как поместить в грунт, ростки проращивались в воде до появления первых корней. Полив осуществлялся в умеренном и ограниченном режиме по 50 мл 1 раз в 4 дня и 1 раз в 8 дней соответственно. Питательный раствор применялся такой, как у большинства суккулентов с необходимым содержанием сернокислого кальция, сернокислого магния, азотнокислого калия, сернокислого железа и суперфосфата. Удобрение разводилось с водой для полива 1:10 с периодичностью раз в 8 дней. Таким образом поддерживалась постоянная концентрация питательных веществ во время эксперимента во всех выращиваемых растениях.

Посаженные в грунт растения фотографировались в течение 38 дней в соответствии с заданными условиями роста. Для этого использовалась камера 16 Мп. В таблице 2.1 представлены изображения растений, которые росли в различных условиях. Первое растение выращивали, соблюдая все нормы по освещению и поливу. Для второго растения сократили объем полива, при этом оставив удовлетворительным количество света. Третье растение росло в условии удовлетворительного количества воды с ограниченным количеством поступающего света.

Таблица 2.1 – Пример процесса фотографирования растений по дням

	Нормальный рост	Ограничение света	Ограничение полива
1	2	3	4
09.11.2020			
14.11.2020			

Продолжение таблицы – 2.1

1	2	3	4
17.11.2020			

Далее растения подвергались преобразованию в черно-белую цветовую гамму с помощью программы IpSquare v5.0, которая предназначена для вычисления площадей фигур произвольной формы. С помощью данной программы можно вычислять также периметр, высоту, ширину объекта. Процесс вычисления площади происходил следующим образом:

- 1) изображение загружается в программу IpSquare v5.0;
- 2) с помощью функции «Сканировать» выбираем способ с черно-белой цветовой гаммой, где область растения заливается в черный, область фона в белый цвет. В таблице 2.2 представлены примеры таких изображений.

Таблица 2.2 –. Примеры изображений, отсканированных в программе IpSquare v5.0

Дата	Нормальный рост	Ограничение света	Ограничение полива
1	2	3	4
09.11.2020			
14.11.2020			

Продолжение таблицы – 2.2

1	2	3	4
17.11.2020			

3) с помощью направляющей «Калибровка» настраиваются измерительные линейки 227×227.

4) высчитывается площадь фигуры ($см^2$).

В таблице 2.3 приведены результаты вычисления площадей растений в трех исследуемых условиях роста.

Таблица 2.3 – Количественные показатели измерения площади растений

Номер дня	Площадь растения при удовлетворительных условиях роста ($см^2$)	Площадь растения при ограничении воды ($см^2$)	Площадь растения при ограничении света ($см^2$)
1	2	3	4
1	12,73	12,43	11,35
2	12,8	12,47	11,35
3	12,83	12,47	11,4
4	13,02	12,5	11,44
5	13,03	12,52	11,57
6	13,23	12,63	11,59
7	13,43	12,64	11,67
8	13,61	12,73	11,72
9	13,64	12,85	11,85
10	14,11	13,12	12
11	14,3	13,14	12,4
12	14,53	13,27	12,58
13	14,95	13,31	12,75
14	15,33	13,48	12,9
15	15,79	13,83	13,16
16	16,3	14,2	13,24
17	18	14,33	13,39
18	19,04	14,49	13,52
19	19,27	14,52	13,72
20	19,5	14,7	13,84
21	20,07	14,75	14,44
22	20,22	14,82	14,67
23	20,25	14,87	15,18

Продолжение таблицы – 2.3

1	2	3	4
24	20,28	14,93	15,25
25	20,32	15,05	15,29
26	20,33	15,05	15,32
27	20,41	15,16	15,56
28	20,49	15,18	15,75
29	20,57	15,21	15,79
30	20,59	15,22	16,07
31	20,59	15,23	16,08
32	20,64	15,26	16,23
33	20,65	15,26	16,27
34	20,67	15,28	16,34
35	20,69	15,3	16,48
36	20,73	15,32	16,52
37	20,75	15,319	16,71
38	20,92	15,32	16,75

При решении задач о переходных процессах можно использовать специальный метод представления информации – систему относительных единиц, которая упростит использование как конечных, так и промежуточных результатов. В качестве базисной величины выбрано первоначальное значение, т.е. площадь растения в начальный момент измерения. Таким образом, сформирована новая таблица 2.4 величин отношений фактического числа к первоначальному.

Таблица 2.4 – Количественные показатели измерения площади растений в относительных единицах

Номер дня	Результаты измерения площади растения при удовлетворительных условиях роста (о.е.)	Результаты измерения площади растения при ограничении воды (о.е.)	Результаты измерения площади растения при ограничении света (о.е.)
1	2	3	4
1	1,000	1,000	1,000
2	1,005	1,003	1,000
3	1,008	1,003	1,004
4	1,023	1,006	1,008
5	1,024	1,007	1,019
6	1,039	1,016	1,021
7	1,055	1,017	1,028
8	1,069	1,024	1,033
9	1,071	1,034	1,044
10	1,108	1,056	1,057

Продолжение таблицы – 2.4

1	2	3	4
11	1,123	1,057	1,093
12	1,141	1,068	1,108
13	1,174	1,071	1,123
14	1,204	1,084	1,137
15	1,240	1,113	1,159
16	1,280	1,142	1,167
17	1,414	1,153	1,180
18	1,496	1,166	1,191
19	1,514	1,168	1,209
20	1,532	1,183	1,219
21	1,577	1,187	1,272
22	1,588	1,192	1,293
23	1,591	1,196	1,337
24	1,593	1,201	1,344
25	1,596	1,211	1,347
26	1,597	1,211	1,350
27	1,603	1,220	1,371
28	1,610	1,221	1,388
29	1,616	1,224	1,391
30	1,617	1,224	1,416
31	1,617	1,225	1,417
32	1,621	1,228	1,430
33	1,622	1,228	1,433
34	1,624	1,229	1,440
35	1,625	1,231	1,452
36	1,628	1,233	1,456
37	1,630	1,232	1,472
38	1,643	1,233	1,476

В целях визуализации тенденции роста растений был построен график зависимости относительной площади растения во времени, который представлен на рисунке 2.1.

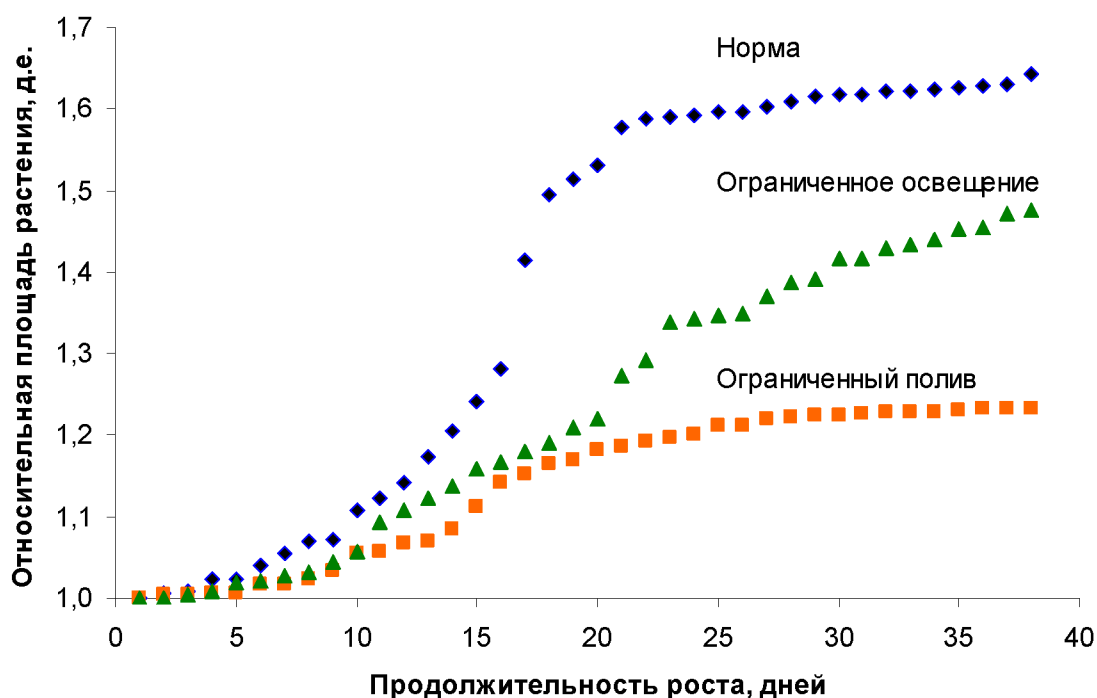


Рисунок 2.1 – Динамика роста растений в заданных условиях

Визуально оценив результаты, представленные на рисунке 2.1, предположили, что за основу роста растения *Aloe Arborescens* L. можно взять логистическую модель (25). Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с данной моделью, которая широко используется для оценки динамики роста сельскохозяйственных культур. Таким образом, можно математически смоделировать логистический рост используя дополнительные параметры, которые зависят от интенсивности роста.

2.3 Результаты моделирования роста лекарственного растения *Aloe Arborescens* L.

В основе метода моделирования изменения метрического индекса лежит логистическая модель роста с ограниченными ресурсами питания.

$$\left\{ \begin{array}{l} S(t, W, L) = S_{\max}(W, L) \cdot \frac{e^{\mu(W, L) \cdot t^{b(W, L)}}}{S_{\max}(W, L) - 1 + e^{\mu(W, L) \cdot t^{b(W, L)}}}; \\ S_{\max}(W, L) = \frac{(0,8 \cdot W + 0,83) \cdot (0,3 \cdot L + 1,33)}{1,63}; \\ \mu(W, L) = 0,0008; \\ b(W, L) = \frac{(0,2 \cdot W + 2,5) \cdot (0,6 \cdot L + 2,1)}{2,7}. \end{array} \right. \quad (29)$$

Для полученной математической модели (29) рассчитанный по формуле (28) коэффициент нелинейной множественной корреляции $R=0,995$ и для 95%-го доверительного интервала, согласно критерию Фишера коэффициент нелинейной множественной корреляции является значимым. Таким образом, полученная математическая модель является достоверной.

Результаты процесса моделирования роста растений *Aloe Arborescens* L. в относительных единицах указаны в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Результаты моделирования роста растений в относительных единицах

Номер дня	Растение с удовлетворительными условиями роста	Растение с критическими показателями полива	Растение с критическими показателями освещения
1	2	3	4
1	1,000	1,000	1,000
2	1,000	1,000	1,000
3	1,002	1,001	1,001
4	1,006	1,003	1,004
5	1,013	1,005	1,007
6	1,024	1,010	1,012
7	1,039	1,015	1,019
8	1,058	1,023	1,027
9	1,082	1,031	1,037
10	1,112	1,042	1,049
11	1,146	1,054	1,063
12	1,185	1,067	1,078
13	1,228	1,081	1,095
14	1,274	1,096	1,113
15	1,322	1,111	1,133
16	1,370	1,126	1,154
17	1,416	1,141	1,176
18	1,459	1,155	1,199
19	1,497	1,168	1,222
20	1,530	1,180	1,246
21	1,558	1,190	1,269
22	1,579	1,199	1,292
23	1,595	1,207	1,314
24	1,607	1,213	1,335
25	1,616	1,217	1,354
26	1,621	1,221	1,372
27	1,625	1,224	1,389
28	1,627	1,226	1,404
29	1,628	1,227	1,417

Продолжение таблицы – 2.5

1	2	3	4
30	1,629	1,228	1,428
31	1,630	1,229	1,438
32	1,630	1,229	1,447
33	1,630	1,230	1,454
34	1,630	1,230	1,459
35	1,630	1,230	1,464
36	1,630	1,230	1,468
37	1,630	1,230	1,471
38	1,630	1,230	1,473

Визуально результат моделирования можно видеть на следующем графике, представленном на рисунке 2.2, где наблюдается сходимость экспериментальных значений и результатов моделирования.

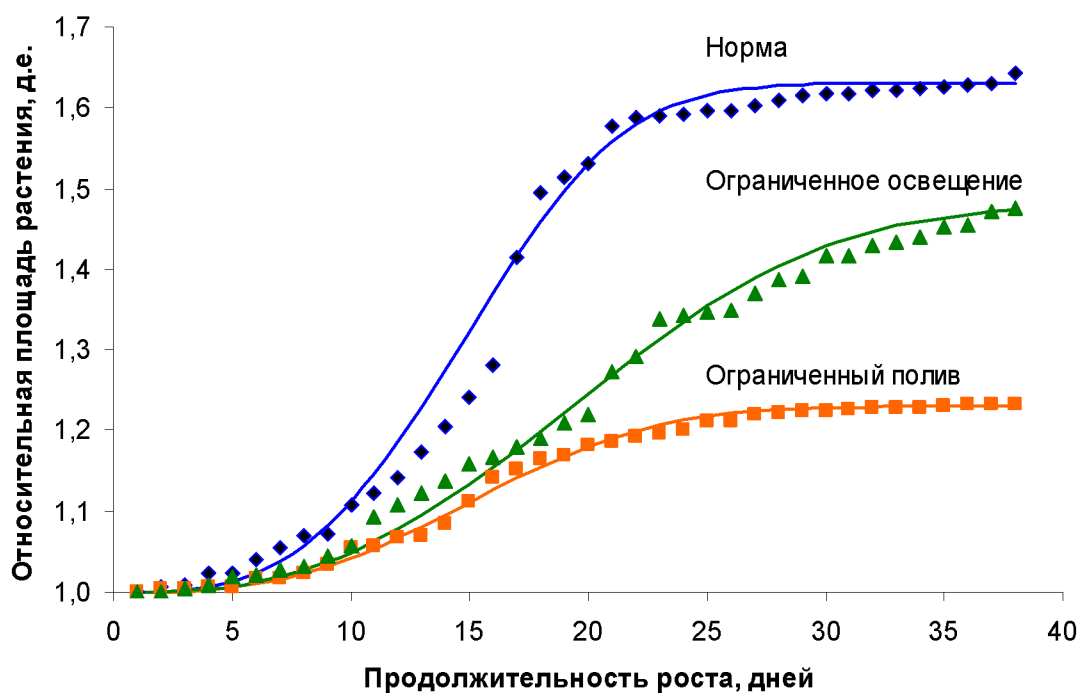


Рисунок 2.2 – Влияние режимов полива и освещения на динамику изменения относительной площади проекции растения *Aloe Arborescens* L. на плоскость фотографии

Вывод по второму разделу

1. Изучен ход изменения метрического индекса в онтогенезе *Aloe Arborescens* L., тесно коррелирующий с ростом растения. График этих изменений представляет S-образную кривую. График зависимости функции от времени способствует четкому определению фазы развития.

2. В представленной работе логистическая модель была адаптирована и реализована для моделирования роста растения *Aloe Arborescens* L. Посредством добавления дополнительного коэффициента получилось оценить их влияние на динамику роста. Полученная математическая модель поможет в расчете оптимальных сроков сбора урожая. Система уравнений для быстрого определения изменения площади листовой поверхности растения является приемлемой.

3. Предложенный способ позволяет, не удаляя листья, провести необходимые измерения в условиях гидропонной системы для получения исходных морфологических параметров и ускорить определение площади листовой поверхности, в том числе непосредственно на растениях и в динамике. Применение достижений компьютерных технологий способствует ускорению и упрощению подобных расчетов.

3 РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСПОЗНАВАНИЯ ПРИЧИН ОТКЛОНЕНИЙ В РАЗВИТИИ РАСТЕНИЯ ALOE ARBORESCENS L. С ПРИМЕНЕНИЕМ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

3.1 Цель и задачи исследования

Aloe Arborescens L. известно, как лечебное растение, получившее широкое распространение. Благоприятными условиями для его роста являются полупустынные районы с жарким климатом. В зоне умеренных климатических условий выращивание *Aloe Arborescens* L. с достаточным содержанием целебных свойств является сложной задачей. В связи с этим встает вопрос создания искусственных условий в неблагоприятных регионах для культивирования *Aloe Arborescens* L.

Обращаясь к опыту выращивания растениеводческих культур в неестественных средах, можно выделить гидропонные технологии. Выращивание лекарственных растений в гидропонных установках набирает популярность. В работе [85] разработали технологию, благодаря которой растение можно выращивать на гидропонике, сохранив при этом экологическую безопасность продукции региона.

Исследования, отраженные в работе [86], подтверждают, что «выращенные в гидропонных установках лекарственные растения сохраняют все свойства выращенных в естественной природной среде» [86]. Также можно выращивать такие лекарственные растения, как алоэ, валериана, пустырник и другие. В [87] был описан процесс адаптации некоторых растений к беспочвенной системе роста. Сухая масса корней и побегов тысячелистника, полыни обыкновенной, звездчатки средней, одуванчика лекарственного и валерианы лекарственной во много раз превысила показатели роста в открытом грунте [87, с. 298].

Выращивание *Aloe Arborescens* L. в гидропонных установках является возможным. При этом целесообразно дополнить гидропонную установку системой автоматического управления для уменьшения участия человека в этом процессе и повышения качества продукции.

Существующие системы автоматического управления гидропонными установками (системами) представляют собой набор независимых, автономно действующих замкнутых систем управления их отдельными параметрами по определенной программе. При этом ни одна из систем автоматического управления не обеспечивает обратной связи по эффективности роста растения, обратная связь имеется лишь по параметрам, влияющим на этот рост. На сайтах ведущих мировых производителей рекомендуют вносить коррективы в программы управления ростом на основе результатов визуальных наблюдений [88, 89]. То есть, предлагают осуществлять обратную связь по эффективности роста растения посредством человека (специалиста в области агрономии). Это делает невозможным создание полностью автоматической адаптивной системы управления ростом растения в условиях гидропоники без дооснащения

существующих систем автоматического управления устройствами и алгоритмами обеспечения обратной связи по эффективности роста растения [90].

Одним из возможных путей повышения качества и эффективности диагностирования отклонений в развитии *Aloe Arborescens* L. в искусственных средах является автоматизированный анализ параметров, реализуемый в виде компьютерной диагностической системы, основанной на применении нейронных сетей. Актуальность таких исследований определяется высокими объемами потребления *Aloe Arborescens* L. при производстве различных товаров, в том числе медицинского назначения. Это обуславливает целесообразность применения гидропоники для выращивания этого растения. В этой связи повышение эффективности систем автоматического управления гидропонными установками по выращиванию *Aloe Arborescens* L. является актуальной задачей. Дополнение существующих систем автоматического управления гидропонными установками системой распознавания причин отклонений в развитии *Aloe Arborescens* L. позволит повысить урожайность и снизить потери.

Целью является модификация функции предсказания выходного слоя нейронной сети VGG16 для эффективного решения задачи автоматической классификации растений *Aloe Arborescens* L. Это позволит дополнить существующие системы автоматического управления гидропонными установками главной обратной связью по отклонению в развитии растения. Наличие указанной главной обратной связи приведет к снижению влияния «человеческого фактора» на ход процесса и к повышению урожайности и качества растения *Aloe Arborescens* L.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать модель классификатора, позволяющую применить нейронную сеть VGG16 для решения задачи автоматической классификации растений *Aloe Arborescens* L.;
- подготовить набор изображений исследуемого растения для получения информативных классификационных признаков и провести обучение модифицированной нейронной сети;
- провести апробацию разработанной модели классификатора в ходе проведения эксперимента по выявлению отклонения от нормального роста *Aloe Arborescens* L.

3.2 Материалы и методы исследования

3.2.1 Разработка модели классификатора для автоматической классификации растений *Aloe Arborescens* L.

Самыми распространенными ошибками в выращивании *Aloe Arborescens* L. является недостаток света и полива, так как это растение достаточно требовательно к соблюдению данных параметров. Рассмотрим основные

визуально отличимые внешние признаки, которые можно наблюдать у Aloe Arborescens L.

- Aloe Arborescens L., принадлежащее к классу «Нормальное развитие», имеет достаточно насыщенный темно-зеленый окрас с длинными плотными и мясистыми листьями. Снизу они выпуклые, сверху более вогнутые, расположены поочередно. Растение хорошо развивается в высоту и ширину;

- растению Aloe Arborescens L., отнесенному к классу «Недостаток света», свойственно иметь блеклый (с плавным переходом от бледно зеленого у основания до бледно желтого на кончике) окрас листьев. Растение становится достаточно слабым, лист менее сочный, более мелкий, может опасть без видимых причин. В целом, заметна тенденция роста вверх;

- коричневый окрас кончиков листьев является основным внешним признаком того, что Aloe Arborescens L. не хватает влаги, класс «Недостаток полива». Также можно заметить, что листья начинают скрючиваться, становясь при этом более тонкими. Данный признак наблюдается, как на конце, так и с боков растения. Зубья листьев более колючие, по сравнению с растением, развивающимся в благоприятных условиях. Опадание листьев не отмечается.

Для определения отклонений от нормального развития растения Aloe Arborescens L. на практике применяется его визуальный осмотр. На рисунок 3.1 представлены визуальные отличия кончиков листьев нормально развивающегося растения Aloe Arborescens L. от кончиков листьев растений, растущих с недостатком воды или света. В связи с этим весьма обоснованным представляется для реализации главной обратной связи в автоматизированных гидропонных системах использовать современные технологии компьютерного зрения.



Рисунок 3.1 – Визуальные проявления отклонений в развитии растения Aloe Arborescens L.: а – нормальное развитие; б – недостаток воды; в – недостаток света

Большое преимущество глубокого обучения при решении задач классификации – это возможность его эффективного использования при малых объемах обучающих данных. ГСНС, обученную на достаточно большом наборе

изображений, можно рассматривать, как обобщающую модель видимого мира. Такая предварительно обученная сеть впоследствии может использоваться для классификации объектов, которые изначально не были представлены в обучающем наборе.

На рисунок 3.2 представлена структура сети VGG16, которая используется в данной работе как предварительно обученная сеть.

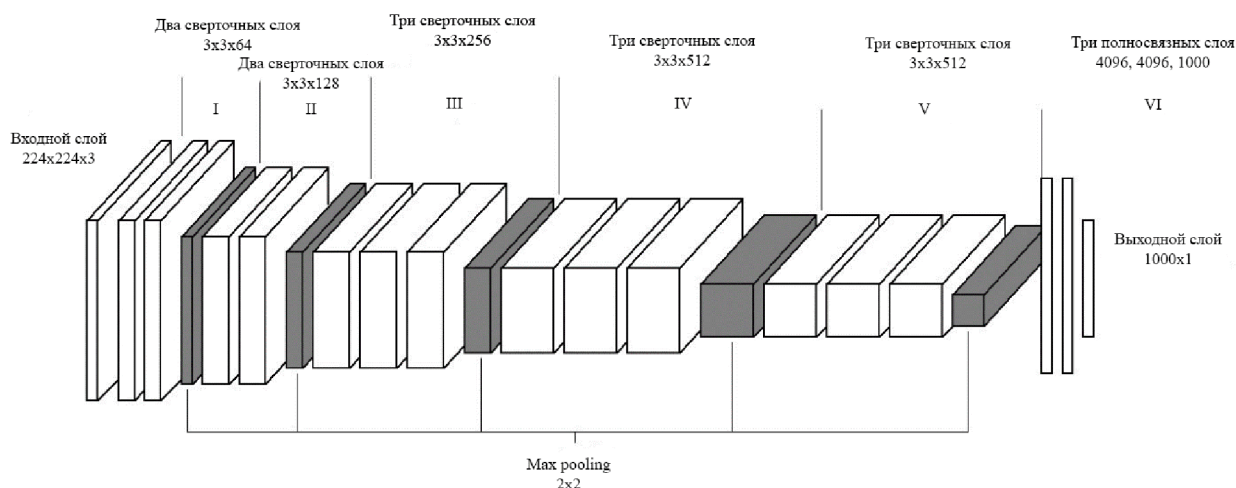


Рисунок 3.2 – Структура ГСНС VGG16 с указанием размерности входных и выходных слоев и операций свертки

Сверточная основа сети VGG16 состоит из блоков I–V, как показано на рисунке 3.2. Карты признаков, полученные сверточной основой сети, являются универсальными и содержат общую информацию о присутствии на изображениях обобщенных понятий. При этом в начальных слоях выделяются наиболее общие локальные карты признаков, а ближе к выходу – уже более абстрактные элементы. В то же время выходные полносвязанные слои блока VI на рисунок 3.2 генерируют представления, соответствующие только заданному набору классов. Т.е., предварительно обученная сеть VGG16 в блоке VI содержит классификатор, воспроизводящий вероятности присутствия на изображении 1000 классов из набора данных ImageNet [81], на котором она была обучена.

Таким образом, очевидно, что для разработки модели классификатора изображений растения *Aloe Arborescens* L. выгодно применить технологию трансферного обучения на предобученной сети VGG16. Для этого из ее архитектуры следует удалить выходные полносвязанные слои, блок VI на рисунок 3.2. Вместо них разработать и обучить собственную оптимальную структуру данного фрагмента сети в соответствии с классами объектов. Кроме этого, повысить качество классификации возможно выполнив «доучивание» слоев блока V на рисунке 3.2 сверточной основы на имеющемся наборе данных.

Для определения новых полносвязных слоев были применены следующие обозначения:

- flatten – слой перехода от матричной структуры данных к векторной;
- dense 1 – полносвязанный слой из 256 нейронов с активационной функцией ReLU, описываемой функциональной зависимостью:

$$h(z)=\max(0, z), \quad (30)$$

где z – взвешенная сумма входов нейронов;

- dropout – слой регуляризации для снижения переобучения модели. Здесь отбрасывается каждый второй блок данных, так как при обучении изображения подаются на вход сети блоками.

– dense 2 – выходной слой из трех нейронов по числу классов. Для получения на выходе вероятностей детектирования определенного класса используется активационная функция SoftMax при $C=3$:

$$\sigma(z)_i = \frac{e^{z_i}}{\sum_{c=1}^C e^{z_c}}, \quad (31)$$

где i – координата выходного вектора.

3.2.2 Подготовка исходного набора данных и обучение модифицированной нейронной сети

На начальном этапе исследования был сформирован набор изображений *Aloe Arborescens* L. для распознавания отклонений в его развитии.

Были подготовлены по 200 цифровых цветных фотографий кончиков листьев:

- нормально развивавшихся растений;
 - растений с визуально выраженными признаками отсутствия полива;
 - растений с визуально выраженными признаками отсутствия освещения.
- Кончики листьев фотографировали (в режиме «цветное фото») на белом фоне с различных ракурсов и с различным освещением (с искусственным освещением, с естественным освещением, с использованием встроенной фотовспышки).

Подготовленные изображения I сжимались, т.е. были переопределены на прямоугольном носителе:

$$\Omega = \{(x, y) : 0 \leq x < n \wedge 0 \leq y < m\} \subset Z^2, \quad (32)$$

где $n=224$ – число столбцов, $m=224$ – число строк.

Отсчеты в точках (x, y) имеют векторную форму $u=(u_k)$ при $k=3$ по числу каналов цветовой модели RGB. Причем $u_k=\{0, 1, \dots, 2^a-1\}$, где $a=8$.

Над полученными изображениями $I(x, y, u)$ выполнялась предобработка – операция нормализации, при которой компоненты вектора u приводились к диапазону $[0; 1]$;

$$\epsilon_k = u_k / (2^q - 1). \quad (33)$$

Полученный набор изображений растения *Aloe Arborescens* L. использовался для обучения модели классификатора. При этом использовался метод отложенной выборки. Все данные случайным образом были разбиты на три группы: 70 % для обучения модели, 20 % для валидации, 10 % для итогового тестирования.

Для увеличения числа и разнообразия образцов используется процедура аугментации. Увеличение количества данных включает в себя комплекс методов, используемых для генерации новых обучающих выборок из исходных наборов данных путем применения случайных «возмущений»:

- горизонтальный и вертикальный разворот;
- поворот на случайный угол от 0 до 40 градусов;
- случайные сдвиги по ширине и высоте в диапазоне от 0 до 20 % от размера изображения;
- случайное изменение масштаба в диапазоне от 0 до 20 % от размера изображения.

Для примера на рисунке 3.3 показан образец изображения растения *Aloe Arborescens* L. $I(x, y, u_k)$, выращенного в нормальных условиях. На рисунке 3.4 представлены варианты этого же изображения, подвергнутого процедуре аугментации.

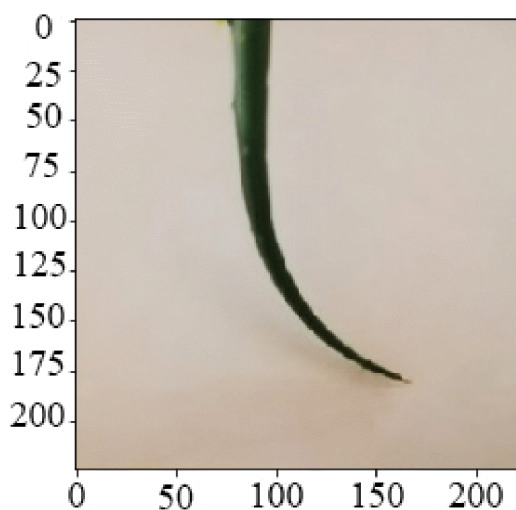


Рисунок 3.3 – Образец изображения растения *Aloe Arborescens* L., выращенного в нормальных условиях

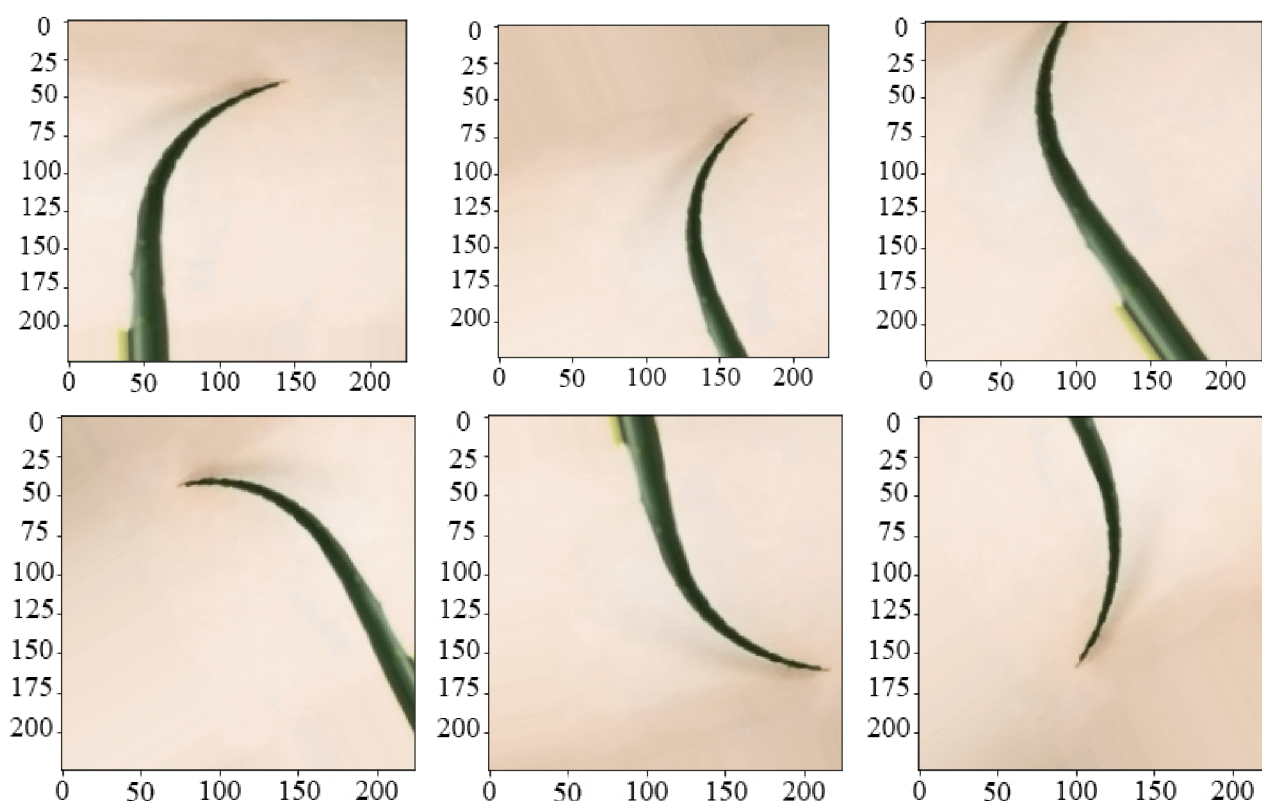


Рисунок 3.4 – Аугментация изображения растения Aloe Arborescens L.

Аугментация изображений и последующее построение и обучение модели классификатора на основе ГСНС выполняется на свободном программном обеспечении. Использовалась библиотека машинного обучения Keras 2.3.1 [91], написанная на языке Python 3.7.9. Библиотека Keras позволяет оперировать высокоуровневыми функциями для конструирования моделей глубокого обучения. С ее помощью реализуются низкоуровневые операции дифференцирования и манипуляции тензорами на базе специализированных и оптимизированных программных библиотек поддержки тензоров (TensorFlow [92], Theano [93] и Microsoft Cognitive Toolkit (CNTK)) [94].

В данном исследовании код программы, использующий Keras, запускался с библиотекой TensorFlow. Тензорные вычисления производились на GPU NVIDIA при помощи библиотеки NVIDIA CUDA Deep Neural Network (cuDNN) [95].

3.2.3 Апробация разработанной модели классификатора

Оценка результатов эксперимента осуществлялась путем анализа ошибок классификации в процессе выявления принадлежности к тому или иному классу. Чтобы оценить эффективность предложенной системы, используется комбинация метрик точности, полноты и F-меры. Числовые значения этих метрик были получены путем вычисления матрицы ошибок или измерения

производительности для задачи классификации в процессе машинного обучения. Результаты вычислений представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Различные комбинации прогнозируемых и фактических значений

Истинная метка	Распознанная метка		
	Недостаток воды	Здоровое растение	Недостаток освещения
Недостаток воды	$a_{11}=16$	$a_{21}=2$	$a_{31}=3$
Здоровое растение	$a_{12}=0$	$a_{22}=20$	$a_{32}=1$
Недостаток освещения	$a_{13}=2$	$a_{23}=0$	$a_{33}=19$

С помощью числовых данных таблицы 3.1 были рассчитаны полнота, точность и F-мера:

1. Расчеты для растения с признаками недостатка воды:

Полнота= $(a_{11}/(a_{11}+a_{12}+a_{13}))$;

Точность= $(a_{11}/(a_{11}+a_{21}+a_{31}))$.

2. Расчеты для здорового растения:

Полнота= $(a_{22}/(a_{21}+a_{22}+a_{23}))$;

Точность= $(a_{22}/(a_{12}+a_{21}+a_{32}))$.

3. Расчеты для растения с признаками недостатка освещения:

Полнота= $(a_{33}/(a_{31}+a_{32}+a_{33}))$;

Точность= $(a_{33}/(a_{13}+a_{23}+a_{33}))$;

F-мера= $(2*Полнота*Точность/(Полнота+Точность))$.

3.3 Результаты исследований по разработке модели автоматической классификации растений *Aloe Arborescens* L. по типу отклонения в его развитии

3.3.1 Результаты разработки модели классификатора для автоматической классификации растений *Aloe Arborescens* L.

На рисунке 3.5 представлена структурная схема предлагаемой модели классификатора на базе ГСНС. Римские цифры указывают на соответствующие блоки сети VGG16 на рисунке 3.2.

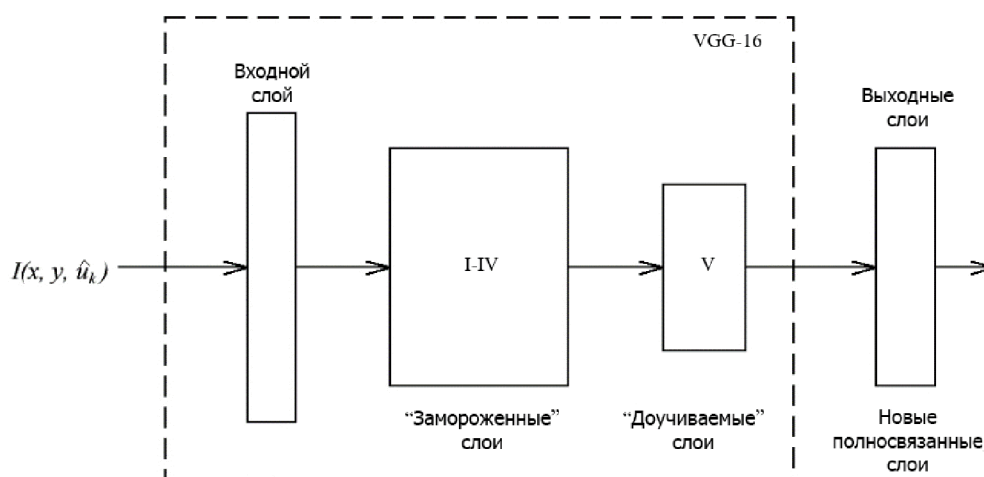


Рисунок 3.5 – Структура модели классификатора на базе ГЧНС VGG16

В процессе обучения не участвуют «замороженные» блоки с I по IV, но доучиваются слои блока V.

На следующем этапе исследований выполнялась оптимизация архитектуры ГЧНС VGG16 в соответствии с описанными принципами трансферного обучения.

Благодаря использованию тестовой выборки из набора данных удалось оптимизировать структуру выходных слоев нейронной сети на рисунке 3.5 для получения максимального качества распознавания. Были исследованы различные варианты структуры полносвязанных слоев. В результате в таблице 3.2 приводится итоговая архитектура полученной модели классификатора.

Таблица 3.2 – Архитектура модели классификатора

Структурные элементы модели классификатора	Структурные элементы сети	Размерность данных	Число обучаемых параметров
Модель VGG16	Блоки I–V (рис. 5)	(7, 7, 512)	14714688
Новые полносвязанные слои	Слой flatten	25088	–
	Слой dense 1	256	6422784
	Слой dropout	256	–
	Слой dense 2	3	771

В таблице 3.2 указаны размерность данных и число обучаемых параметров структурных элементов сети с соответствующими активационными функциями (выражения 30 и 31).

3.3.2 Результаты подготовки исходного набора данных и обучения модифицированной нейронной сети

В результате был получен набор изображений растения *Aloe Arborescens* L. в норме и при отклонении в развитии $\{(I_j(x, y, \epsilon_k), \theta_j)\}_{j=0}^{I=600}$, $\theta_j \in \{0, 1, 2\}$ размером 1, размеченный на три класса. При этом θ_j – признаковое описание и метка класса для j -ого изображения: «0» – растение с отсутствием полива, «1» – растение в нормальных условиях, «2» – растение с отсутствием освещения.

Для увеличения числа и разнообразия образцов была применена процедура аугментации. Использование аугментации гарантирует, что метки классов данных не изменяются. Цель при применении аугментации данных – повысить обобщаемость модели.

Обучение ГСНС с архитектурой, представленной в таблице 3.2, производилось на обучающей группе образцов при помощи алгоритма обратного распространения ошибки [96]. Для этого на каждом шаге обучения выполняется оптимизация функции ошибки Q путем нахождения ее градиентов от полученных весов w . Задача оптимизации решается методом стохастического градиентного спуска по мини-блокам данных при помощи алгоритма Adam [97].

В качестве функции ошибки используется категориальная кросс-энтропия:

$$Q = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{c=1}^C I[\theta_i \in C_c] \log p[\theta_i \in C_c]. \quad (34)$$

В выражении (34) N – объем выборки, $p[\theta_i \in C_c]$ – вероятность отнесения i -ого изображения к классу c ; $I[\theta_i \in C_c]$ – функция индикатора. Выражение (34) является логарифмической функцией потерь, которая характеризуется сходимостью и эффективностью расчета. По этим причинам она применяется в качестве функции ошибки.

В результате процесс обучения представляет собой поиск оптимальных значений весов w^* нейронов, для которых ошибка сети становится минимальной:

$$w^* = \arg \min_w Q(w). \quad (35)$$

3.3.3 Результаты апробации разработанной модели классификатора в ходе эксперимента по выявлению отклонения от нормального роста *Aloe Arborescens* L.

Для оценки эффективности предложенной системы, была использована комбинация метрик точности, полноты и F-меры. Результаты для экспериментальных конфигураций представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Точность, полнота, и оценка F-меры (агрегированный параметр для точности и полноты) для соответствующей экспериментальной конфигурации

Исследуемые классы и параметры	Точность	Полнота	F-мера	Число образцов
Недостаток воды	0.89	0.76	0.82	21
Здоровое растение	0.91	0.95	0.93	21
Недостаток света	0.83	0.90	0.86	21
Точность	–	–	0.87	63
Общее среднее по полученным результатам	0.87	0.87	0.87	63

Для проверки качества обучения нейронной сети были исследованы дополнительные тестовые образцы фотографий. Результаты исследования данных тестовых образцов представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты исследования тестовых образцов

Классификационный признак	Достоверность отнесения к одному из классов, д. е.			Достоверность правильной классификации (д.е.)
	Класс «здоровое растение»	Класс «недостаток воды»	Класс «недостаток освещения»	
Здоровое растение	0.916	0.019	0.065	0.916
	0.882	0.068	0.050	0.882
	0.980	0.005	0.015	0.980
Среднее значение	0.926	0.031	0.044	0.926
Недостаток воды	0.005	0.977	0.018	0.977
	0.058	0.686	0.255	0.686
	0.005	0.960	0.034	0.960
Среднее значение	0.023	0.875	0.103	0.875
Недостаток освещения	0.015	0.006	0.979	0.979
	0.004	0.004	0.992	0.992
	0.050	0.354	0.596	0.596
Среднее значение	0.023	0.121	0.855	0.855

Числовые данные таблицы показали усредненные значения для трех тестовых образцов. Для каждого из рассматриваемых классов получили следующие данные: 92,6 %, 87,5 % и 85,5 % для «здорового растения», растения с недостатком воды и растения с недостатком освещения, соответственно.

3.4 Обсуждение результатов, полученных в ходе разработки системы распознавания отклонений от нормального роста *Aloe Arborescens* L. с использованием алгоритмов машинного обучения

Анализ метрик качества предложенного процесса классификации изображений по заданным классам (таблица 3.3) показал высокую достоверность распознавания: для нормально развивающегося растения (класс «здоровое растение») – 91 %, для растения без полива (класс «недостаток воды») – 89 % и для растения без освещения (класс «недостаток освещения») – 83 %.

Анализ достоверности распознавания причин отклонений в развитии *Aloe Arborescens* L. по трем группам тестовых образцов (по три фото для каждого из видов классификации) показал, схожую достоверность отнесения растения к одному из трех классов: 92,6 %, 87,5 % и 85,5 %, соответственно (таблица 3.4).

Таким образом, по фотографии кончика листа *Aloe Arborescens* L. на белом фоне можно с высокой вероятностью установить факт недостатка либо освещения, либо полива. При этом, также с высокой вероятностью, можно отличить растение с недостатком освещения от растения с недостатком полива. Полученные результаты подтверждают эффективность выбранного метода распознавания причин отклонений в развитии *Aloe Arborescens* L., основанного на глубоком обучении сверточной нейронной сети VGG16.

Это согласуется, в целом, с результатами исследований по применению машинного обучения для разработки методов распознавания болезней и вредителей растений. Кроме того, полученные результаты дополняют вышеупомянутые исследования методом распознавания причин отклонений в развитии *Aloe Arborescens* L., обусловленных недостатком полива или освещения.

Следует отметить существующие недостатки, относящиеся к архитектуре VGG16. В первую очередь данная ГСНС содержит относительно большое число параметров для заданного числа слоев. Это связано с размером используемых фильтров 3x3, что замедляет скорость обучения и увеличивает требуемый объем дискового пространства для хранения модели. Однако при решении поставленной в работе задачи данные особенности не являются критическими, так как автоматическая система распознавания растений не предназначена для развертывания на мобильных платформах с ограниченными ресурсами и не требует работы в режиме реального времени.

Ограничением применения данного метода является необходимость фотографирования кончика листа на белом фоне. Таким образом, необходимо,

чтобы задняя стенка гидропонной установки была белого цвета. Это позволит получать снимки нескольких листьев у каждого растения на белом фоне при автоматическом передвижении фотокамеры по направляющим, расположенным на фронтальной стороне гидропонной установки. Предпочтительнее при этом фотокамеры с большой глубиной резкости, чтобы при одном фотографировании получать высокую резкость изображения всех видимых кончиков листьев *Aloe Arborescens* L.

Получение фотографий кончиков листьев *Aloe Arborescens* L. на белом фоне в полностью автоматическом режиме является сложной технической задачей, учитывая хаотичность расположения листьев в пространстве. При этом очевидно, что не все кончики листьев могут быть сфотографированы на белом, или на каком-нибудь другом однотонном фоне. Кроме того, встает вопрос, как из полученной фотографии автоматически вырезать изображения кончиков листьев на белом фоне заданного размера. Поэтому для последующей интеграции разработанной системы распознавания причин отклонений в развитии *Aloe Arborescens* L. в систему автоматического управления режимными параметрами гидропонной установки необходимо разработать специализированное программное обеспечение (СПО). Это СПО должно будет обеспечить последовательное решение ряда задач:

- автоматическое обнаружение всех видимых на фотографии растения *Aloe Arborescens* L. кончиков листьев;
- определение контуров обнаруженных кончиков листьев;
- вырезание из исходной фотографии квадратных фрагментов, содержащих оконтуренные кончики листьев оптимальной для распознавания длины;
- замена на каждом из фрагментов всего, что находится за пределами выделенных контуров на белый цвет;
- загрузка всех фрагментов в систему распознавания причин отклонений в развитии *Aloe Arborescens* L.;
- внесение корректив в систему автоматического управления гидропонной установкой при выявлении отклонений в развитии.

Разработка данного СПО, а также дообучение разработанной системы с целью распознавания и других причин отклонений в развитии *Aloe Arborescens* L., включая болезни и вредителей, является направлением дальнейших исследований.

Вывод по третьему разделу

1. Разработана модель классификатора, позволяющая применить нейронную сеть VGG16 для решения задачи автоматической классификации растений *Aloe Arborescens* L. Данная модель классификатора разработана с применением технологии трансферного обучения на основе предобученной сети VGG16, состоящей из 6 блоков. Для этого из ее архитектуры были удалены выходные полносвязные слои (блок VI) и вместо них разработана и обучена собственная оптимальная структура данного фрагмента сети в

соответствии с классами объектов. Для повышения качества классификации была предусмотрена возможность «доучивания» слоев блока V. При этом «замороженные» слои блоков I-IV в процессе обучения не участвовали. Оптимизация архитектуры ГСНС VGG16 проводилась в соответствии с принципами трансферного обучения. Структура выходных слоев нейронной сети была оптимизирована для получения максимального качества распознавания благодаря использованию тестовой выборки из набора данных.

2. Для обучения нейронной сети VGG16 был подготовлен набор изображений исследуемого растения для получения информативных классификационных признаков. Были подготовлены по 200 цифровых цветных фотографий кончиков листьев *Aloe Arborescens* L.: нормально развивавшихся растений, растений с визуально выраженными признаками отсутствия полива, растений с визуально выраженными признаками отсутствия освещения. Кончики листьев фотографировали в режиме «цветное фото» на белом фоне с различных ракурсов и с различным освещением (с искусственным освещением, с естественным освещением, с использованием встроенной фотовспышки).

Подготовленные изображения сжимались до размеров 224×224 пикселя и производилась их нормализация. Для увеличения числа и разнообразия образцов была использована процедура аугментации. Применение аугментации данных позволяет повысить обобщаемость модели, при этом метки классов данных не изменяются.

Для обучения модели классификатора использовался метод отложенной выборки. Все данные случайным образом были разбиты на три группы: 70 % для обучения модели, 20 % для валидации, 10 % для итогового тестирования.

3. Проведена апробация разработанной модели классификатора в ходе проведения эксперимента по выявлению отклонения от нормального роста *Aloe Arborescens* L. Анализ метрик качества предложенного процесса классификации изображений по заданным классам показал высокую достоверность распознавания: для нормально развивающегося растения (класс «здоровое растение») – 91 %, для растения без полива (класс «недостаток воды») – 89 % и для растения без освещения (класс «недостаток освещения») – 83 %.

Анализ достоверности распознавания причин отклонений в развитии *Aloe Arborescens* L. по трем группам тестовых образцов показал, схожую достоверность отнесения растения к одному из трех классов: 92,6 %, 87,5 % и 85,5 %, соответственно.

Разработанная система распознавания принадлежности растения *Aloe Arborescens* L. к соответствующему классу может быть использована в качестве главной обратной связи системы автоматического управления гидропонной установкой. Это позволит снизить влияние «человеческого фактора» на ход процесса и повысить урожайность *Aloe Arborescens* L. Кроме того, выработанный подход к решению поставленных задач обеспечивает возможность переучивать модель автоматического классификатора для

решения соответствующих задач распознавания и других известных причин отклонений в развитии алоэ.

4 РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ РОСТА ЛЕКАРСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ГИДРОПОННЫХ СИСТЕМ

4.1 Изучение технических характеристик и объема поставки существующих автоматик для гидропонных систем

На протяжении многих лет традиционное сельское хозяйство с использованием почвенной среды потребляет много места и воды, а также оно подвержено нападениям вредителей, что приводит к более высокому использованию пестицидов.

Выращивание растений очень трудоемкий и сложный процесс. Возложить обязанности по выращиванию на фермеров предприниматели не рискуют из-за возможных рисков, поэтому в агротехнологических комплексах трудится большое количество работников. Системы отслеживания труда активно применяются в целях распределения заданий, отслеживания процесса и результатов работы. Такой метод является затратным из-за большого количества наемных работников, а также существует большая вероятность риска, связанного с человеческим фактором. Применение же автоматики в гидропонике существенно облегчает выращивание растений и снижает трудозатраты. Существуют тепличные хозяйства, где использование ручного труда практически отсутствует, но все же существуют (E-MODE, OverGrower). Одно из самых важных решений, которое должен принять садовод, связано с выбором именно гидропонной системы.

Рассмотрим описание гидропонных систем E-MODE и OverGrower, производители которых максимально приблизились к полной автоматизации процесса выращивания растений.

Гидропонная система E-MODE.

Система использует три прибора: регулятор pH, регулятор ЕС и регулятор уровня жидкости в основном баке. При помощи электродов приборы следят за концентрацией удобрений и кислотно-щелочного баланса в контрольном баке и, при необходимости, регулирует дозирование. В продаже также имеется устройство Ponics Pilot, устройство автоматического контроля и управления питательным раствором с возможностью удаленного доступа и мониторинга через интернет. Параметры, на которые он может влиять: ЕС, pH, уровень жидкости в системе. От аналогичных приборов PONICS PILOT отличается тем, что – это моноблок, в котором максимально реализована концепция Plug and Play. Вторая концепция, реализованная в данном приборе, это хранение статистики в облачном хранилище и доступ к управлению через интернет из любой точки мира. Прибором можно управлять удаленно с компьютера, планшета и смартфона, главное, чтобы ловила сеть [57]. На рисунке 4.1 представлена основная комплектация гидропонной установки.

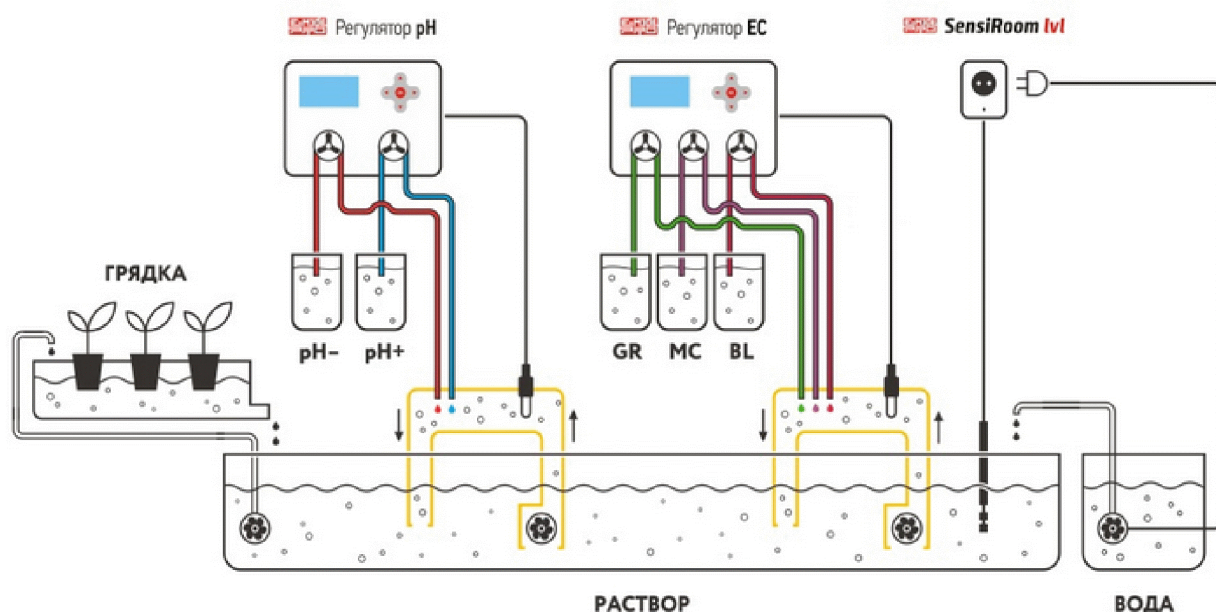


Рисунок 4.1 – Структурная схема работы гидропонной системы E-MODE [57]

Также E-MODE отслеживает температуру воздуха окружающей среды и температуру питательного раствора посредством Microclimate E-MODE. Регулятор уровня жидкости следит за концентрацией воды в основном баке и, при необходимости, пополняет недостаток в автоматическом режиме осуществляется с помощью Sensiroom H. Отдельно можно приобрести прибор SensiRoom CO2 для контроля углекислого газа в помещении [57].

Технические характеристики:

- Напряжение сети: 220-240 В / 50 Гц;
- Габаритные размеры: 1000 / 1000 / 1500 мм;
- Степень влагозащиты блока управления IP65.

Комплектация:

- Блок управления – 1 шт.
- Рассеиватель с колонной подачи тумана - 1 шт.
- Емкость туманообразования для обратноосмотической воды (рабочий объем 20 л) – 1 шт.
- Емкость для заполнения системы обратноосмотической водой (объем 10 л) – 1 шт.
- Система подачи воздуха со сменным фильтром – 1 шт.
- Розетка 220 В / IP54 – 1 шт.
- Инструкция по эксплуатации – 1 шт [57].

Гидропонная система Over Grow.

Данная гидропонная установка способна контролировать растворные и климатические зоны. Растворная зона состоит из модуля растворного узла, модулей управления устройствами, при этом способна создавать несколько климатических зон, который, в свою очередь, использует модули контроля

микроклимата и модули управления устройствами. Таким образом, все параметры можно адаптировать под выращивание конкретного растения. Возможно использование питательных растворов любых фирм, предназначенных для выращивания методом гидропоники. Таким образом, в функции растворной зоны входят: охлаждение и нагрев раствора, подача чистой воды, слив отработанного раствора, перелив из бака подготовки раствора в рабочий бак для орошения, перемешивание раствора. В функции управления климатической зоны входят: освещение, охлаждение ламп, уровень CO₂, вентиляция, охлаждение или нагрев воздуха, увлажнение или осушение воздуха, орошение [56].

Регулирование уровня кислотности раствора происходит путем внесения насосами кислоты, либо щелочи. Исходя из показаний датчика pH, насосы доводят уровень кислотно-щелочного баланса до заданного значения [56].

Регулирование состава микроэлементов раствора происходит путем пропорционального внесения насосами удобрений (до 100 компонентов). Исходя из показаний датчика, насосы доводят уровень минерализации до заданного значения [56].

Гидропонная система также предусматривает управление температурой питательного раствора (Автоматическая Температурная Компенсация). В комплекте к установке имеется кондиционер и обогреватель воздуха, автоматическое включение увлажнителя и осушителя воздуха, контроль и управление светильниками в режиме досветки или полностью искусственное освещение, автоматическая подача CO₂ и вентиляция воздуха [56]. На рисунке 4.2 представлена структурная схема работы гидропонного предприятия Over Grow.

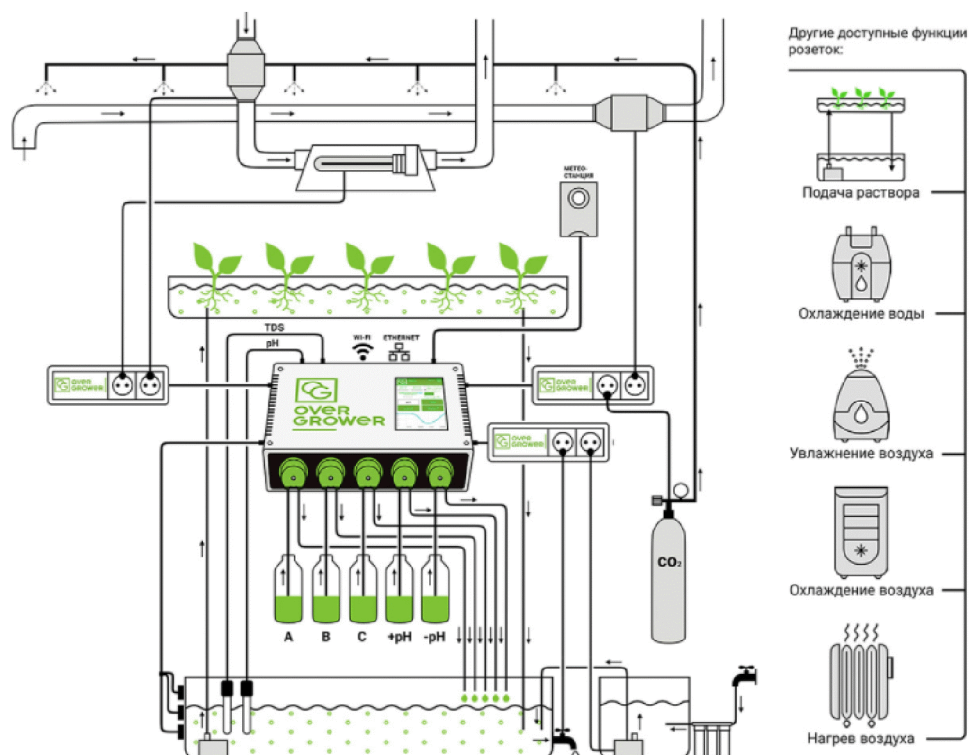


Рисунок 4.2 – Структурная схема организованной работы гидропонного предприятия Over Grow [56]

Таким образом, в комплект поставки входят следующие элементы:

- 1) прибор с предустановленным программным обеспечением
- 2) датчик pH – 1шт в комплекте (периодичность обслуживания – 1 раз в месяц).
- 3) датчик комбинированный TDS + температуры раствора (периодичность обслуживания – 1 раз в месяц).
- 4) датчик измерения уровня раствора.
- 5) модуль контроля микроклимата CLIMATE-01OG, измеряющий температуру и влажность воздуха, освещенность и CO₂.
- 6) модуль управления устройствами SOCKET-02OG из двух розеток для управления светом и влажностью.
- 7) модуль управления устройствами SOCKET-02OG из двух розеток для поддержания уровня и смены раствора.
- 8) модуль управления устройствами SOCKET-02OG из двух розеток для управления клапаном подачи газа CO₂ и вытяжкой.
- 9) блок питания 12V.
- 10) руководство пользователя в форме электронного документа.
- 11) схемы выращивания в форме электронного документа.
- 12) гарантия – 12 месяцев [56].

4.2 Особенности автоматизации с использованием модуля автоматического фотографирования растений

Объединим все рассмотренные технологии и системы можно получить максимально автоматизированную теплицу.

Изучив существующие на рынке автоматизированные гидропонные системы можно выделить основные особенности их автоматизации:

- измерение состояния питательного раствора: pH, электропроводность, температура, уровень и расход.
- контроль параметров воздуха: температура, влажность, дефицит давления пара и углекислый газ (CO₂).
- управляющие реле для модуляции освещения, вытяжного вентилятора и увлажнителя воздуха.
- управление насосами для подачи определенных объемов растворов: кислоты, щелочи, питательных веществ.
- автоматическая регулировка кислотности питательного раствора в соответствии с целевым диапазоном pH путем дозирования растворов кислоты или щелочи.
- автоматическая регулировка химического состава питательного раствора в соответствии с заданным диапазоном дозирования питательных веществ.
- автоматическая регулировка параметров газовой среды в соответствии с заданными диапазонами влажности, температуры и концентрации CO₂, регулируя работу вытяжного вентилятора и увлажнителя.

Дополнительные функциональные возможности системы с использованием модуля автоматического фотографирования растений:

- использование камеры для наблюдения за растениями с помощью фотопотока.
- использование таймера для планирования времени запуска затвора зеркальной камеры для высококачественной фотосъемки.
- использование модуля автоматического контроля и управления ростом лекарственного растения и параметрами, влияющими на данный процесс.

4.3 Описание алгоритмов автоматизированного управления процессом роста лекарственного растения в условиях гидропонной системы

Назначение. Схема, представленная на рисунке 4.3, предназначена для описания алгоритма автоматизированного управления процессом роста лекарственного растения в условиях гидропонной системы в целях повышения эффективности производства, не требующего вмешательства человека. Предлагаемый подход заключается в том, чтобы создать алгоритм автоматизированного управления гидропонной системой, снижающий затраты на рабочую силу, а также эффективно повышающий качество растений.

Область применения. Предполагаемая установка предназначена для выращивания лекарственных растений в промышленных масштабах, где будет

возможность использовать технологию машинного обучения, когда на основе полученных входных данных система принимает решение без участия человека.

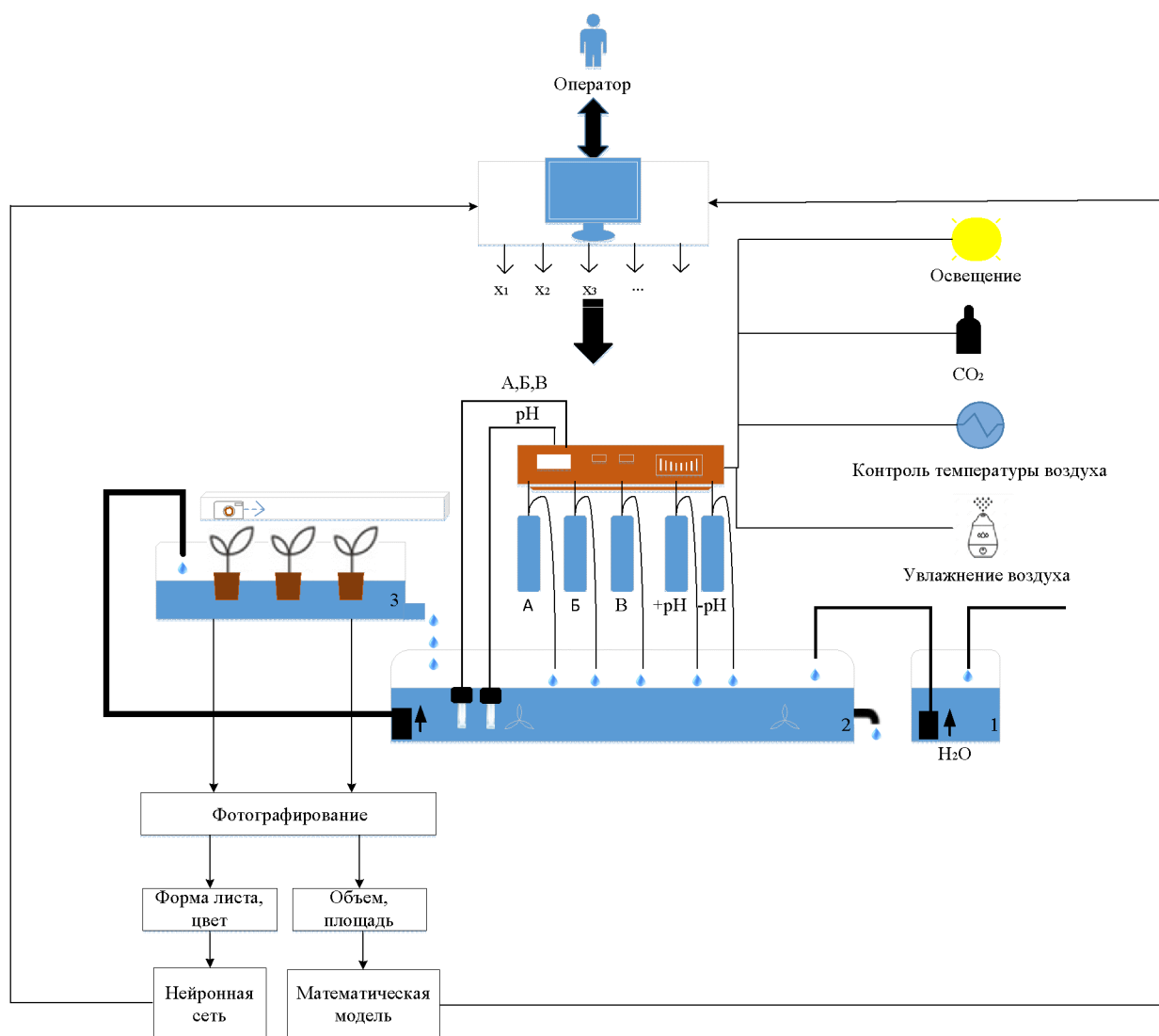


Рисунок 4.3 – Структурная схема алгоритма управления автоматизированным ростом лекарственного растения *Aloe Arborescens* L. в условиях гидропонных систем

Описание алгоритма процесса.

1. Оператор по предложенной инструкции задает параметры системы (управляющие компоненты: количественную и пропорциональную составляющую питательного раствора, уровень pH, освещения, режим дозирования).
2. Заданные параметры в автоматическом режиме передаются на прибор регулирования соответствующих компонентов.

3. Система запускает работу, когда компьютер подтверждает наличие в Баке 2 соответствующих жидкостей: воды и питательных веществ.

4. Устройство контроля и регулирования условий выращивания растений предназначено для управления раствором баком и климатической зоной гидропонной системы. Данный прибор охватывает процесс от отправки данных, полученных с управляющего компьютера, к подсистемам (реле) мониторинга и регулирования содержания компонентов до отправки обратно отчета о работе. Система, представленная на рисунке 4.4, анализирует отправленные значения, и модуль реле будет действовать как переключатель для включения или выключения соответствующего модуля.



Рисунок 4.4 – Функциональные возможности системы.

Датчик температуры в помещении и датчик влажности в помещении - важные составляющие, т.к. при повышении или понижении двух данных величин произойдет изменение концентрации раствора.

Для управления освещением, исходя из информации от соответствующего датчика, система будет управлять модулем регулирования мощности и количества включаемых светодиодов для получения заданной интенсивности освещения.

Контроль pH запускается, когда значение pH выше или ниже установленного значения, и система будет выпускать раствор +pH или -pH до тех пор, пока значение pH не станет равным установленному значению.

Для контроля уровня воды соответствующий датчик уведомит систему, и когда уровень воды будет ниже указанного значения, прибор даст сигнал об открытии клапанов для набора воды до тех пор, пока уровень воды не станет равным установленному значению.

Все необходимые независимые механизмы сводятся в единую автоматизированную систему управления производством.

5. Бак 1 предназначен для хранения воды. В данной емкости располагается специальный насос, с помощью которого вода поступает в бак 2. В этом резервуаре находится питательный раствор, содержащий питательные вещества и удобрения. Здесь происходит смешивание подаваемой воды и питательного раствора с помощью микшеров, расположенных на дне устройства. Также в данном баке с помощью специального датчика измеряется уровень кислотности и количество питательных веществ. Из бака 2 в бак 3 с помощью насосов периодически поступает готовый раствор для выращивания растений. В баке 3 происходит непосредственное выращивание растений. В определенное количество отверстий вставляются горшки без дна таким образом, чтобы корни были погружены в раствор при периодическом поливе. Излишки раствора с обратно поступают в бак 2. Все насосы срабатывают периодически, через установленный промежуток времени.

6. Вдоль бака 3 располагается устройство, по маршруту которого будет двигаться камера, также можно создавать туры, в которых камера будет проходить по точкам в различных последовательностях. Примером для такой конструкции может быть PTZ-камера. Здесь можно настроить такие параметры, как позиции, время остановки и скорость. Тур может содержать неограниченное количество позиций [98]. «Ложка камеры перекачивается на специальных роликах, расположенных внутри подвижной платформы. В движение этот узел приводится обыкновенным электромотором с зубчатым колесом, по которому перекачивается ложка камеры» [98].

7. Фотографии выращиваемых растений используются для сравнения с эталонной кривой роста и выявления причин отклонений в развитии с помощью нейронной сети. Нейронная сеть по цвету и форме листа растения на фотографии применяется для контроля вносимых параметров. Математическая модель строится для сравнения роста растения с эталонной кривой.

Процесс сопоставления фактических результатов с эталонной кривой роста посредством математической модели:

1) на вход подсистемы подается набор изображений, полученных с фотографирования объектов растений;

2) обработка полученных фотографий осуществляется в программе IP Square v5.0. Здесь производится преобразование изображений в черно-белую цветовую гамму и настраивается калибровка;

3) площадь поверхности, окрашенной в черный цвет, также рассчитывается в IP Square v5.0;

4) полученные числовые данные сравниваются с эталонной кривой роста;

5) результаты отображаются соответствующим окрасом элемента интерфейса «Контроль роста».

Распознавание причины отклонения от нормального роста с помощью модели классификатора:

1) на вход подсистемы подается набор изображений;

2) в целях устранения избыточности информации фотографии сжимаются до одинакового размера;

3) осуществляется процесс нормализации в целях повышения сходимости алгоритма обучения нейронной сети;

4) извлечение признаков и классификация изображений реализуется с помощью обученной нейронной сети;

5) отнесение каждого из растений к определенному классу: «Здоровое растение», «Недостаток света», «Недостаток воды» и отправка изображения в базу нейронной сети для увеличения числа обучающей выборки.

Результаты работы нейронной сети и математической модели, представленные на рисунке 4.5, можно наблюдать по соответствующему окрасу кнопки «Контроль роста» интерфейса автоматического управления ростом растения.

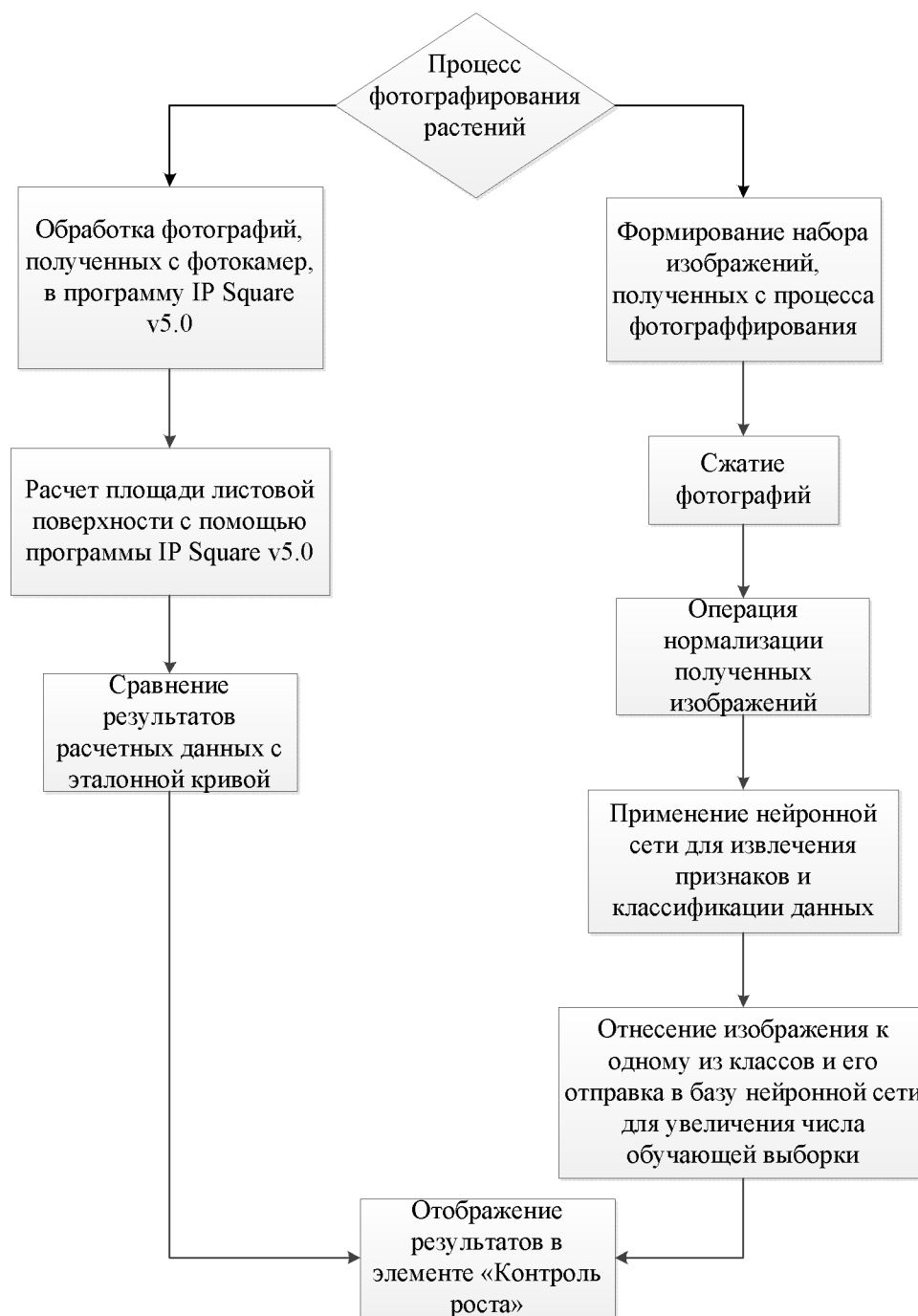


Рисунок 4.5 – Структурная схема информационно-аналитического сопровождения при выращивании лекарственного растения

В целях осуществления обратной связи по динамике роста лекарственного растения *Aloe Arborescense* L. было решено добавить в программную структуру элемент «Контроль роста» в целях организации главной обратной связи в гидропонной системе. Показанная на рисунке 4.6 блок-схема описывает алгоритм последовательности действий, необходимых для распознавания характера отклонения:

1) кнопка «Контроль роста» дает пользователю информацию о возможном отклонении в росте одного или целого ряда растений. Зеленый

окрас через процесс дублирования состояния возвращает информацию в функциональную кнопку «Контроль роста». Красный окрас элемента предполагает нажатие на текущую кнопку в целях получения более конкретизированной информации.

2) после нажатия на «Контроль роста» отобразится перечень существующих секций, в которых произрастают растения. Здесь пользователь обнаруживает, в каких секциях находятся растения с наличием возможного отклонения. Элемент интерфейса с зеленым цветом отправляет информацию через процесс дублирования в функциональное состояние кнопки «Контроль роста». Красный цвет в интерфейсе системы свидетельствует о наличии отклонений и предполагает нажатие на соответствующий элемент.

3) после нажатия на «Секцию N», имеющую красный окрас, отобразится перечень растений, где будет заметно, какие из растений имеют возможные отклонения в росте. Зеленый (растение соответствует нормам развития) и красный (наблюдается отклонение) окрас кнопки, отвечающий за определенное растение, отправляет информацию через процесс дублирования в функциональную кнопку «Секцию N».

4) при нажатии на любую из кнопок «Растение N», выводится процент отклонения от расчетной кривой роста и ответ нейронной сети.

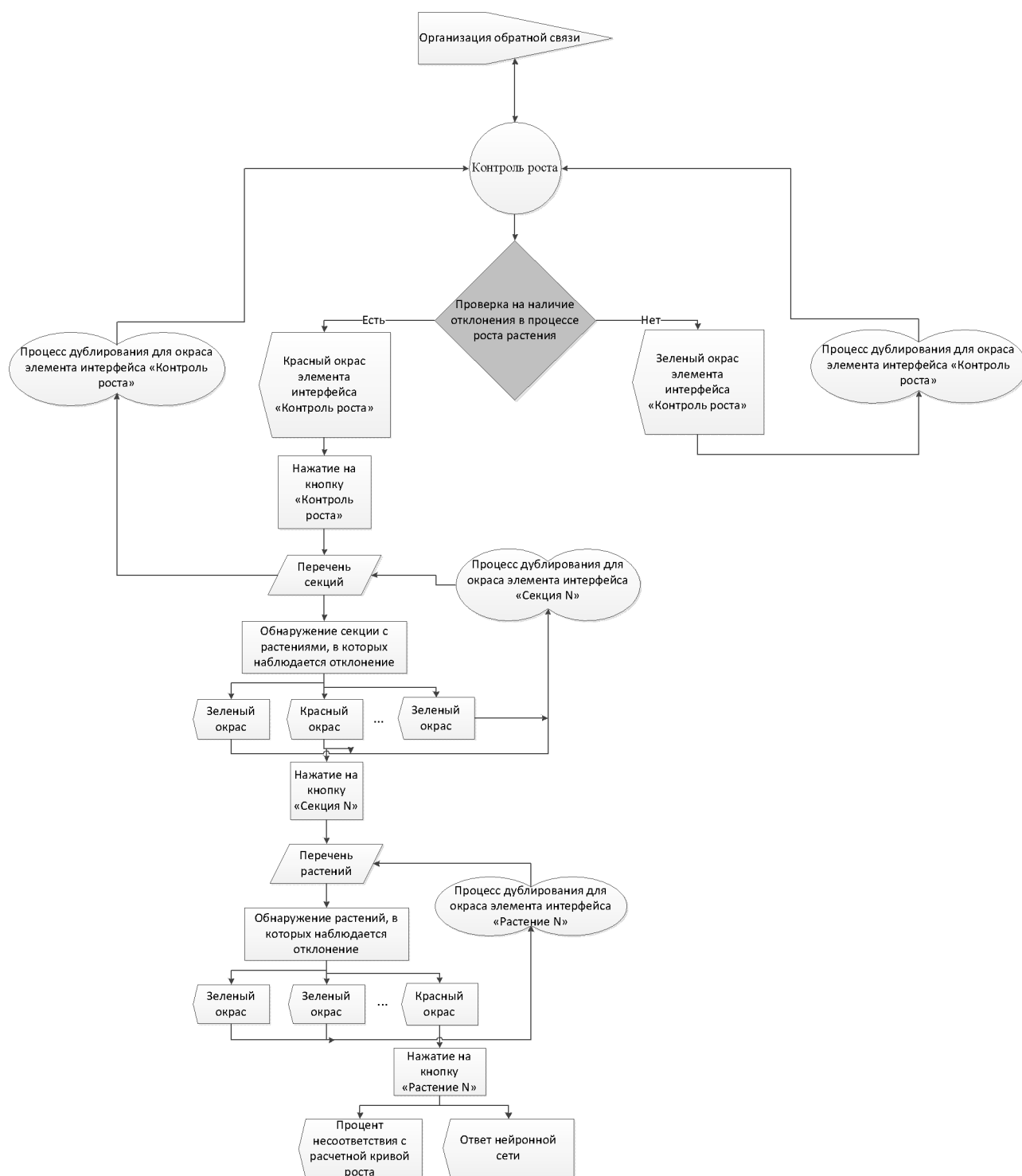


Рисунок 4.6 – Блок-схема организации обратной связи в процессе роста лекарственного растения *Aloe Arborescense* L.

Алгоритм автоматизации практичен и спроектирован с учетом особенностей технологических процессов производства.

4.4 Структурная схема адаптивной системы управления скоростью роста растения *Aloe Arborescens* L. с эталонной моделью

С применением модели (29) в качестве эталонной была разработана структурная схема адаптивной системы автоматического управления по каналу управления «расход питательного раствора – скорость роста».

Данная структурная схема адаптивной системы управления по отклонению скорости роста от заданного эталонной моделью значения представлена на рисунке 4.7. В качестве вспомогательного параметра для корректировки управляющего воздействия используется отклонение измеренной относительной площади растения от заданного эталонной моделью значения.

Адаптивная система управления контролирует скорость роста растений в отдельной секции. Основное назначение данной адаптивной системы – это компенсация влияния на скорость роста растений различных не контролируемых возмущений.

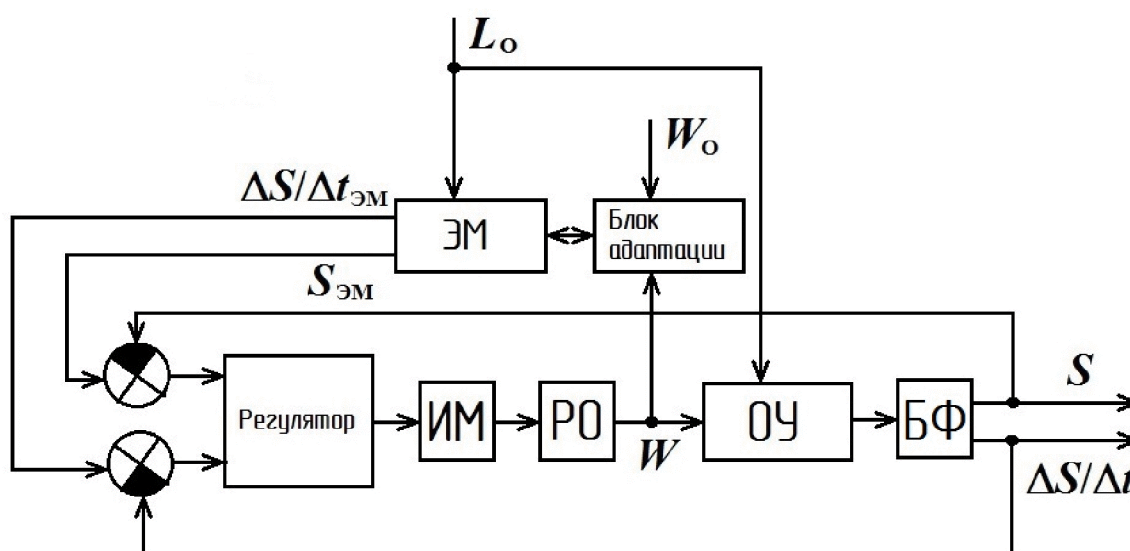


Рисунок 4.7 – Структурная схема адаптивной системы управления скоростью роста растения *Aloe Arborescens* L. с эталонной моделью

Система функционирует следующим образом. На первом этапе, в эталонную модель вводятся определенные экспериментально оптимальные значения освещения и полива (L_o и W_o), причем W_o вводится не напрямую, а через блок адаптации. Такие же значения L_o и W_o воздействуют на объект управления (отдельную секцию гидропонного предприятия) при запуске системы. Оптимальная величина интенсивности полива W_o является значением по умолчанию для регулятора при запуске системы.

Далее, каждое растение секции фотографируется один раз в сутки. По полученным фотографиям в блоке фотографирования (БФ) определяются для

каждого растения относительная площадь S и скорость роста (скорость ежедневного прироста относительной площади) $\Delta S / \Delta t$. Полученные значения сравниваются с эталонными $S_{\text{эт}}$ и $\Delta S / \Delta t_{\text{эт}}$. Эталонные значения пересчитываются каждый день с помощью эталонной модели S-образной кривой. Если отклонение измеренных для данного растения секции значений S и $\Delta S / \Delta t$ от эталонных не превышает установленных для них допустимых погрешностей, то считается, что растение растет в соответствии с эталонной моделью. Если недопустимые отклонения зафиксированы для одного или нескольких растений секции, то об этом посылается сообщение оператору, при этом адаптивная система автоматического полива функционирует в соответствии с заданным по умолчанию значением W_0 , т.е., корректировка интенсивности полива не происходит. Если же отклонения наблюдаются для большинства растений секции (90% и более), то адаптивная система управления начинает управление интенсивностью периодического полива по отклонению скорости роста растений секции от расчетного (эталонного) значения.

Для защиты системы от ложного срабатывания, связанного с резким скачкообразным изменением относительной площади растения, например, в результате значительного поворота или опадания одного из листьев, система будет реагировать только на те изменения скорости, которые будут продолжаться двое суток и более. На рисунке 4.8 приводятся результаты имитационного моделирования изменения скорости роста растения при скачкообразных и плавно увеличивающихся или уменьшающихся (в течение нескольких дней) отклонениях текущего значения относительной площади от S-образной кривой роста.

Из рисунка 4.8 видно, что скачкообразное отклонение S приводит к одновременному скачкообразному отклонению $\Delta S / \Delta t$, которое исчезает на второй день после этого события. Если же отклонение S плавно увеличивается или уменьшается, то отклонение величины $\Delta S / \Delta t$ от колоколообразной кривой не исчезает на второй день.

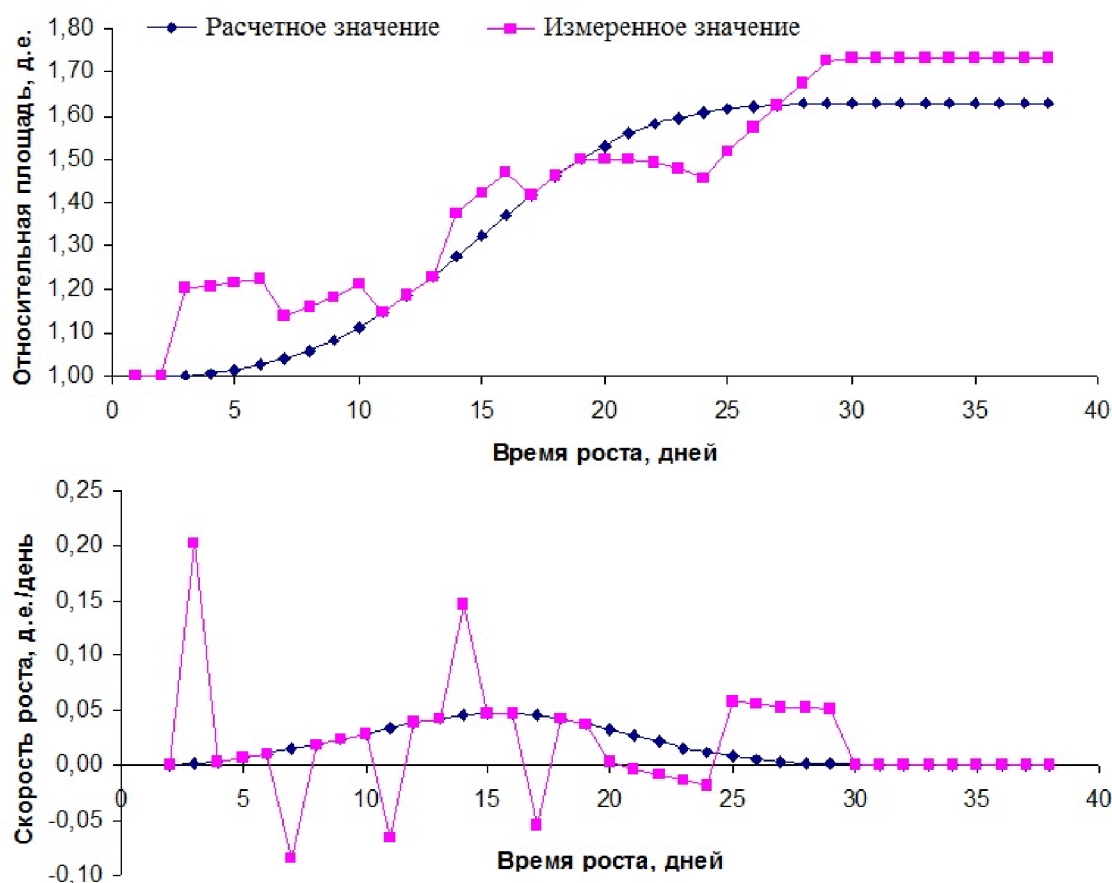


Рисунок 4.8 – Результаты имитационного моделирования отклонения измеренной относительной площади растения от S-образной кривой оптимального роста и соответствующего ему отклонения измеренной скорости роста от расчетной (эталонной) колоколообразной кривой

При активировании адаптивной системы в регуляторе будет формироваться скорректированный сигнал управления исполнительным механизмом (ИМ), который с помощью регулирующего органа (РО) будет управлять интенсивностью полива (W), например, за счет увеличения продолжительности подачи питательного раствора при каждом поливе (для растения *Aloe Arborescens* L. полив производится два раза в неделю).

Информация о текущем значении интенсивности полива W поступает в блок адаптации, где сравнивается с оптимальным значением W_0 . Если скорректированное, в результате работы регулятора, значение интенсивности полива позволит сохранить соответствие скорости роста колоколообразной кривой (полученной путем дифференцирования по времени S-образной кривой роста) в течение всего периода роста, то блок адаптации запомнит это значение как оптимальное для данной секции и соответствующим образом скорректирует параметры эталонной модели для последующих запусков процесса. На рисунке 4.9 представлена блок-схема функционирования адаптивной системы роста.

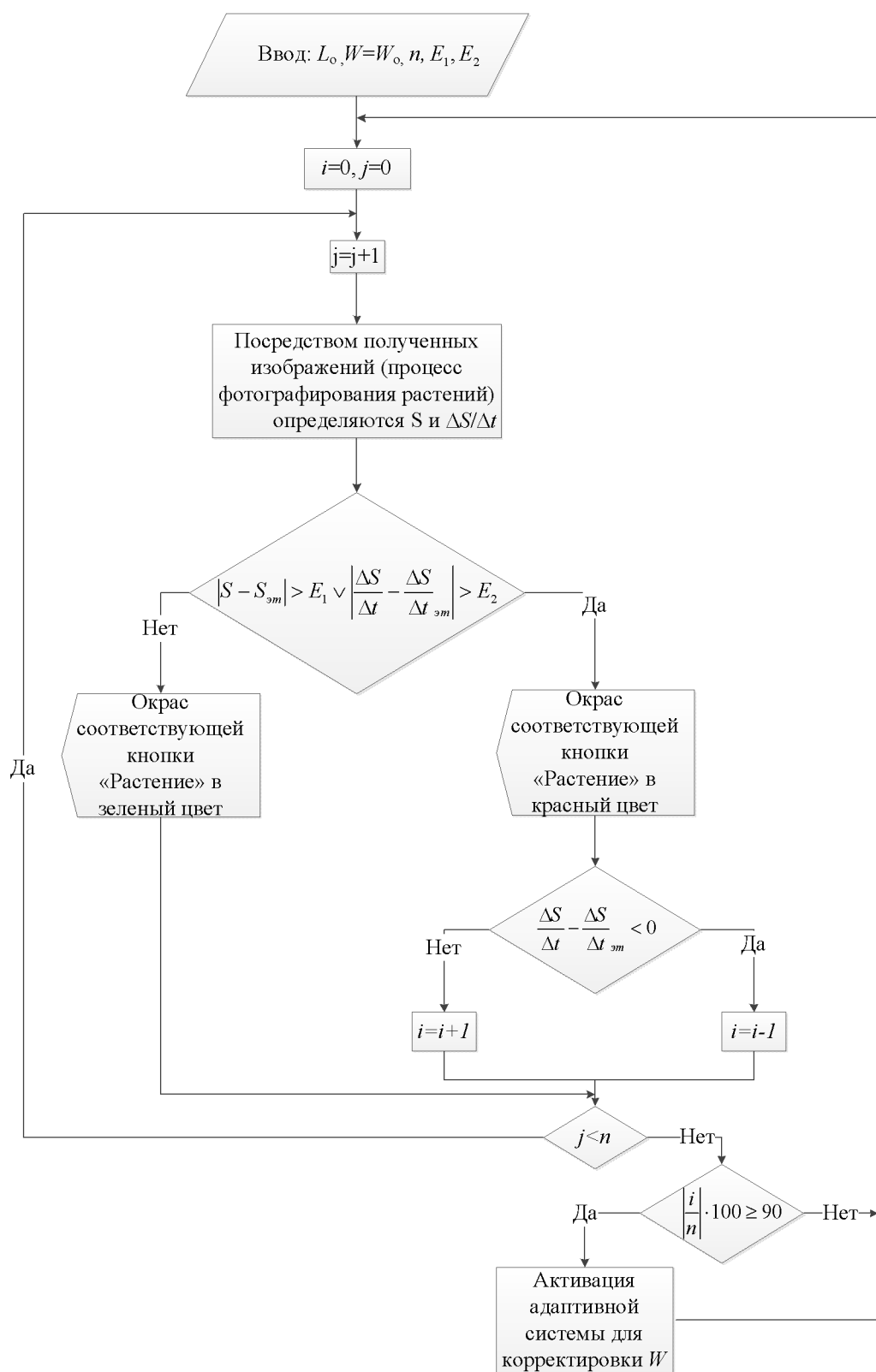


Рисунок 4.9 – Блок-схема функционирования адаптивной системы роста

4.5 Архитектура сбора и обработки данных

На рисунке 4.10 представлена архитектура системы сбора и обработки данных. Для организации автоматизированной работы данной системы, а также

контроля параметров технологического процесса была создана архитектура сети передачи данных с доступом в Интернет. Основными составляющими компонентами для организации автоматизированного получения данных являются гидропонная система (как объект наблюдения и управления), 2D-камера, система контроля режимных параметров, сервер, база данных, программное обеспечение. Компоненты системы контроля режимных параметров гидропонной установкой производят сбор информации о состоянии процесса. Данные с датчиков поступают на сервер, где происходит их обработка. Сервер является основным элементом автоматизации процесса, который корректирует параметры, формируя при этом оптимальные условия для наилучшего роста и развития растения. Данные с сервера, посредством специализированного программного обеспечения, подаются пользователю в доступном для восприятия виде. Пользователь получает доступ к данным и системе управления автоматизированной гидропонной системой через беспроводное соединение по Wi-Fi. Интерфейс пользователя, как способ взаимодействия между оборудованием и человеком, дает возможность организовать эффективное производство и получить высококачественный продукт, сводя участие человека в процессе выращивания к минимуму. Посредством программного обеспечения пользователь имеет доступ к детализированной информации о текущем состоянии системы, имеет возможность корректировки ранее установленных настроек, если система того требует. В целом, пользователю нет необходимости визуального наблюдения за каждым выращиваемым растением. Автоматизированная система будет давать информацию оператору только лишь о секциях (растениях), требующих возможной корректировки процесса возделывания культуры. Осуществление сбора и обработки данных возлагается на сервер, который получает измерительную информацию и при необходимости отправляет корректирующие сигналы в систему контроля режимных параметров для поддержания технологического процесса в пределах установленных норм.

В системе реализован процесс фотографирования растений с применением движущейся по заданной траектории 2D-камеры. После каждой остановки фотокамера делает снимок, который с помощью локальной сети Ethernet отправляется на сервер. Здесь производится процесс анализа внешнего вида растений с помощью нейронной сети, обученной на выявление признаков недостатка освещения или полива. Кроме того, по фотоснимкам осуществляется определение относительной площади растений в целях обнаружения отклонений от расчетной S-образной кривой роста. Текущие данные мониторинга и управления один раз в сутки передаются в базу данных, где они накапливаются для дальнейшего просмотра и мониторинга пользователем. Например, в разделе «Статистика» программы автоматизации гидропонной системы можно посмотреть данные по расходам компонентов, обеспечивающих рост растения, а также отследить динамику его роста.

Разработанная архитектура позволила более эффективно провести модернизацию предлагаемой системы, выстроить систему обработки данных в режиме реального времени по определенному алгоритму.

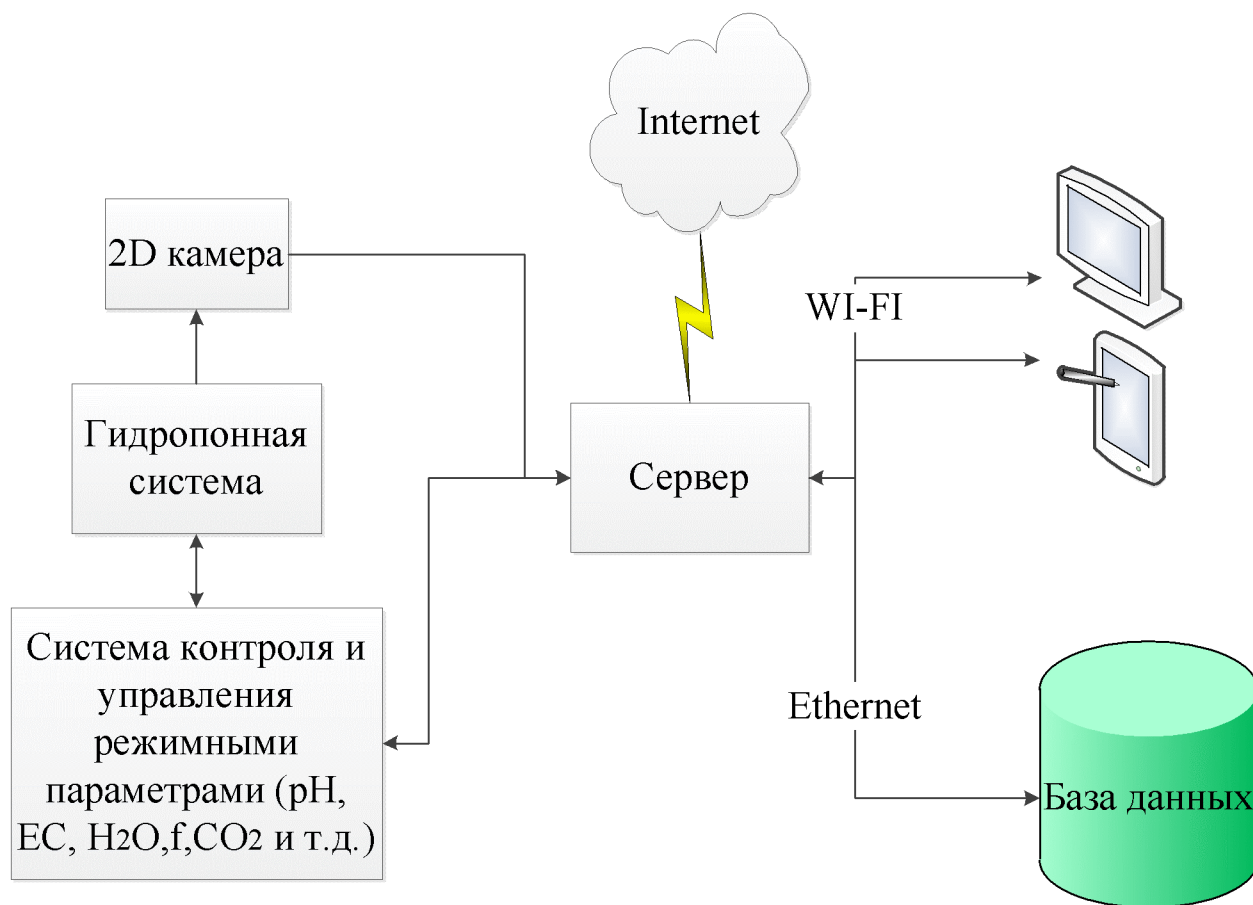


Рисунок 4.10 – Архитектура системы сбора и обработки данных

4.6 Разработка пользовательского интерфейса для автоматизированной системы управления

Пользовательский интерфейс представляет собой интерфейс, обеспечивающий передачу (обмен) информацией между пользователем и программно-аппаратными компонентами системы. Задачей пользовательского интерфейса является представление пользователю данных в удобном для понимания (восприятия) виде, а именно в форме числовых данных и графических изображений. Также пользовательский интерфейс дает возможность ручного управления параметрами гидропонной системы.

На главной странице программы «Автоматизированная гидропонная система», представленной на рисунке 4.11, имеется возможность наблюдать и контролировать в автоматическом режиме рост растения, количественный состав запасов компонентов гидропонной системы, а также готовность к этапу «Сбор урожая» для каждого диапазона существующих секций гидропонного

комплекса. Цвет заливки соответствующей кнопки системы должен варьироваться в зависимости от текущего состояния системы.



Рисунок 4.11 – Главная страница программы автоматизации гидропонной системы

Рассмотрим описание элемента интерфейса «Контроль роста». Для данной кнопки существует два варианта окраса. Красный цвет заливки свидетельствует об отклонении от нормального роста. Отклонение от нормального роста определяется посредством анализа фотоснимков растений с помощью нейронной сети, а также при сравнении текущей относительной площади растения с расчетной S-образной кривой роста. Зеленый цвет означает удовлетворительный (нормальный) рост и соответствие S-образной кривой, т.е. не требуется корректировка параметров системы (Рисунок 4.11).

При нажатии кнопки «Контроль роста» появится перечень секций. Их количество может варьироваться в зависимости от общего размера гидропонного предприятия. Каждая из секций окрашена в один из двух цветов: красный или зеленый. Красный цвет свидетельствует о наличии отклонения в росте одного или нескольких растений. Зеленый цвет элементов интерфейса на рисунке 4.12 показывает, что растения в данной секции развиваются нормально.



Рисунок 4.12 – Секции гидропонной системы, в которых выращиваются растения

В каждой секции находится определенное количество растений, каждому из которых присвоен свой идентификационный номер и соответствующая кнопка. Элемент интерфейса на рисунке 4.13 также, как и в секциях, может иметь два вида окраса ячейки, дающих информацию о текущем состоянии объекта.



Рисунок 4.13 – Перечень выращиваемых растений в определенной секции

Если хотя бы одна из иконок растений окрашивается в красный цвет, элемент интерфейса «Контроль роста», показанный на рисунке 4.11, повторит данный окрас.

При нажатии на один из номеров растений предоставляется следующая информация: фотоснимок растения, величина отклонения от расчетной кривой роста и ответ нейронной сети по распознаванию причин несоответствий. Ответ нейронной сети, представленный на рисунке 4.14, может иметь одно из трех значений: здоровое растение; недостаток полива; недостаток освещения.

При наведении курсора мыши на фотографию растения, изображение увеличивается. Таким образом, нажав на определенное растение, перечень которых представлен на рисунке 4.13, можно определить причину возможного изменения окраса кнопки «Контроль роста» главной страницы программы.



Рисунок 4.14 – Текущая информация о состоянии выращиваемого растения

При нажатии на элемент интерфейса «Величина отклонения от расчетной кривой» отобразится информация о фотосинтетическом потенциале и сравнение интенсивности роста (изменения площади растения в относительных единицах) с расчетной кривой роста. Это необходимо для оценки морфометрического показателя роста. Также, здесь можно визуальнo оценить, когда рост растения выходит на этап «насыщения».

Для кнопки «Контроль запасов» имеется три цветовых заливки кнопки:

1) Красный цвет свидетельствует о полном расходе какого-либо компонента системы. В этом случае оператору необходимо восполнить

недостающие компоненты в целях стабилизации работы системы в целом. Элемент «Контроль запасов» имеет при этом красный цвет окраса.

2) Желтый цвет заливки дает информацию пользователю о критическом содержании какого-либо компонента. Если будет наблюдаться еще и полное отсутствие кого-либо компонента, то система окрасит элемент «Контроль запасов» в красный цвет. Оператор должен проконтролировать и довести уровень до заданного значения.

3) Зеленый цвет сигнализирует об удовлетворительном состоянии системы, содержании всех необходимых компонентов на должном уровне.

Для кнопки «Сбор урожая» также существует 3 вида окрашивания кнопки (Рисунок 4.11). Зеленый цвет сигнализирует о неготовности системы к выдаче урожая. Желтый цвет свидетельствует о том, что сбор урожая должен быть произведен в ближайшее время. В этом случае необходимо осуществить все необходимые мероприятия к предстоящему сбору продукции. Красный цвет свидетельствует о полной готовности к сбору урожая. Система в этом случае и для данной секции прекращает свою работу. Для определения, в какой именно секции пора собирать урожай, необходимо нажать на кнопку «Сбор урожая». При этом откроется окно, показанное на рисунке 4.15. Данный элемент интерфейса окрашивается по приоритету в красный цвет при наличии красных элементов секций, в желтый – при наличии желтых элементов и при отсутствии красного окраса секций и зеленый – при отсутствии красной и желтой ячеек.

Программа также позволяет наблюдать количество дней до начала сбора урожая. Количество секции и периодичность сбора урожая можно настраивать в зависимости от ресурсов гидропонной установки.



Рисунок 4.15 – Секции для выращивания растений

Для получения доступа к остальным функциям системы создан элемент интерфейса «Меню», показанный на рисунке 4.16. «Меню» является иерархическим списком опций программы. Здесь оператор имеет возможность создания нового проекта (запуск выращивания нового растения), детализированного просмотра и корректировки параметров системы, статистические данные и возможность выхода из программы.

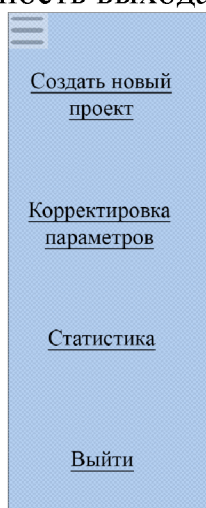


Рисунок 4.16 – Меню программы автоматизации гидропонной системы

«Создать новый проект» на рисунке 4.17 предполагает запуск выращивания растения в гидропонике с инициализацией значений всех

существующих параметров, величины которых рекомендованы для получения наилучшего роста на выходе системы. В «Названии проекта» указывается имя нового растения, рост которого будет контролироваться, или производится выбор из существующих проектов. Для непрерывного сбора урожая задается определенное количество секций гидропонного предприятия, каждая из которых имеет определенный диапазон ячеек (номера растений). Для каждой секции выбирается свой день посадки, в целях обеспечения непрерывного сбора урожая спустя определенный промежуток времени. Далее задается количественное значение каждого параметра в соответствующих единицах измерения и объем циркуляции питательного раствора в сутки.

Создать новый проект

Название проекта

Задать новое растение

Задать новое растение

Диапазон секций ячеек

Список сохраненных настроек системы

Выберите элемент:

Настройка параметров 1

Настройка параметров 2

Настройка параметров 3

Концентрация питательных компонентов:

А

Б

В

г/дм³

г/дм³

г/дм³

Циркуляция раствора

м³/сут

CO₂

ppm

Влажность

%

Режим освещения

ч/сут

Температура воздуха

°C

Уровень pH

Температура питательной среды

°C

Рисунок 4.17 – Интерфейс создания нового проекта

«Корректировка параметров», отображенная на рисунке 4.18, состоит из списка параметров, который пользователь может регулировать для выращиваемого растения и выбранной секции. После сохранения изменений выводится окно с вводом нового имени настройки. Далее созданный набор заданных значений можно применять при создании нового проекта. При этом, для каждой из секций можно задавать свои параметры роста.

Нажав на кнопку «Настройка по умолчанию», программа автоматически устанавливает показатели, сохраненные в системе во время создания проекта.

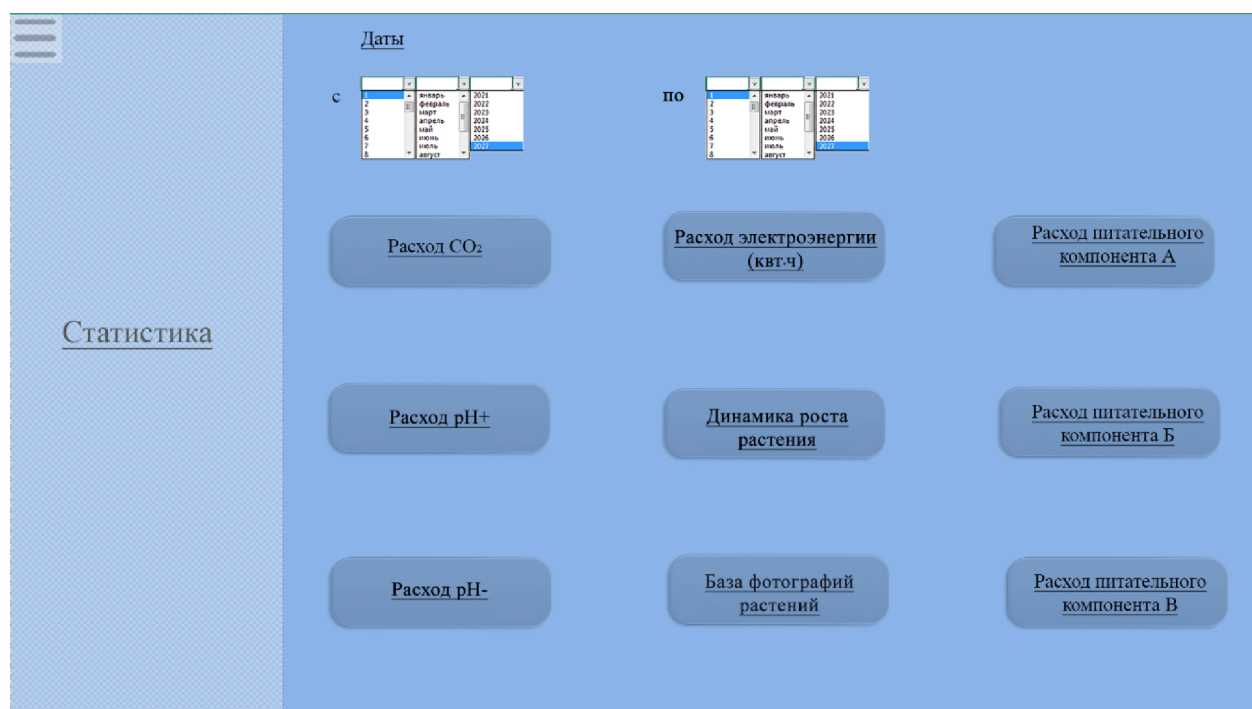


Рисунок 4.19 – Функции раздела «Статистика»

При нажатии на функцию «Выйти» программа осуществляет выход из системы выращивания исследуемого растения.

Вывод по четвертому разделу

1. Разработана структурная схема система автоматизированного управления ростом лекарственного растения в условиях гидропонной системы с применением блока фотографирования. Данный алгоритм использует полученные изображения для выявления отклонений от роста Aloe Arborescence L. на основании полученных во второй и третьей главах результатов.

2. С учетом особенностей технологических процессов производства была разработана блок-схема организации обратной связи в процессе роста лекарственного растения Aloe Arborescence L.

3. Разработана структурная схема адаптивной системы управления скоростью роста растения Aloe Arborescence L. с эталонной моделью, описанной во второй главе. Данная адаптивная система в качестве вспомогательного параметра для корректировки управляющего воздействия использует отклонение измеренной относительной площади от значения эталонной кривой. Схема предназначена для компенсации влияния на скорость роста различных неконтролируемых возмущений. Также, представлена блок-схема функционирования адаптивной системы роста растения.

4. Разработана архитектура сбора и обработки данных для организации автоматизированной работы гидропонной системы и контроля параметров технологического процесса. Данная архитектура содержит все

необходимые компоненты для организации автоматизированного обмена данными.

5. Разработан интуитивно понятный пользовательский интерфейс автоматизированной гидропонной системы, позволяющий осуществлять передачу информации между пользователем и программно-аппаратным комплексом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате диссертационного исследования «Разработка математических моделей и алгоритмов автоматического управления продуктивностью роста лекарственного растения в условиях гидропонных систем» получены следующие основные результаты.

Выполнено исследование существующих подходов к моделированию роста растений в условиях гидропонных систем.

Все рассмотренные в публикациях примеры моделирования роста растениеводческих культур показали высокую корреляцию между экспериментальными данными и результатами математического моделирования. Это доказывает применимость методов моделирования для описания продукционных процессов. При этом, исследовав модели роста, которые зависят от факторов внешней среды (управляемые и неуправляемые внешние параметры), можно сделать вывод о том, что динамические модели отличаются более высокой точностью и могут быть применимы в прикладных целях. В свою очередь, в гидропонных системах все внешние параметры являются управляемыми.

В результате проведенного исследования методов моделирования продукционных процессов растений можно выделить два подхода:

1. Применение дифференциального прироста массы растения в единицу времени. Решением таких уравнений являются интегральные кривые;
2. Применение логистической модели для описания влияния целого ряда факторов, одна группа которых способствуют прогрессу в развитии, а другая регрессу.

Исследованы результаты применения систем распознавания образов для автоматизации процесса классификации объектов растениеводческого производства.

Проведенные исследования применений архитектур глубокого обучения для обнаружения отклонений показали эффективность применения нейросетевых технологий, а именно архитектуры VGG16 для классификации изображений по определенным признакам. Использование в работе предобученной сети VGG16 сократит время на разработку классификатора. Также, на основании проведенного обзора можно сделать вывод о целесообразности применений достижений глубокого обучения в выращивании растений в гидропонных установках.

Разработана математическая модель продуктивности роста лекарственного растения в зависимости от изменений параметров системы.

Построена математическая модель роста лекарственного растения *Aloe Arborescens* L. с учетом влияния двух факторов: интенсивности полива и интенсивности освещения. На основе математической модели зависимости изменения площади во времени, представленной в виде логистического

уравнения, показано, что изменение площади листовой поверхности растения является количественной характеристикой процесса его роста.

За основу моделирования взяты собственные экспериментальные данные. Посаженные в грунт растения фотографировались в течение 38 дней с учетом заданных условий роста. Первое растение выращивали с соблюдением рекомендаций по освещению и поливу для достижения максимального роста. Во время выращивания второго растения сократили объем полива. Третье растение росло в условиях ограниченного количества поступающего света.

Подготовка изображений растений и расчет площади осуществлялись посредством программы IpSquare v5.0. В целях упрощения использования промежуточных и конечных результатов применили систему относительных единиц.

Отмечается хорошее соответствие расчетных данных относительной площади листовой поверхности растений и двух исследованных факториальных признаков результатам эксперимента. Достоверность полученной математической модели оценили с помощью коэффициента нелинейной множественной корреляции (0,995), по критерию Фишера определили, что модель является значимой.

Определение специфики развития лекарственного растения *Aloe Arborescens* L. является одним из основных составляющих в организации управления, принятия решений для повышения продуктивности светолюбивых суккулентных сортов, в предсказуемости и стабильности выращивания культур под влиянием таких основных внешних факторов, как освещение и полив.

Разработан метод распознавания причин отклонения в развитии растений с применением возможностей машинного обучения.

1. Разработана модель классификатора для решения задачи автоматической классификации растений *Aloe Arborescens* L. Данная модель разработана с применением технологии трансферного обучения на основе предобученной сети VGG16, состоящей из 6 блоков. Для этого из ее архитектуры были удалены выходные полносвязные слои (блок VI) и вместо них разработана и обучена новая оптимальная структура данного фрагмента сети в соответствии с классами объектов. Для повышения качества классификации была предусмотрена возможность «доучивания» слоев блока V. Оптимизация архитектуры глубокой сверточной нейронной сети VGG16 проводилась в соответствии с принципами трансферного обучения. Структура выходных слоев нейронной сети была оптимизирована для получения максимального качества распознавания благодаря использованию тестовой выборки из набора данных.

2. Для обучения нейронной сети VGG16 был подготовлен набор изображений исследуемого растения для получения информативных классификационных признаков. Подготовленные изображения сжимались до размеров 224×224 пикселя, далее производился процесс их нормализация. Для

увеличения числа, разнообразия образцов и повышения обобщаемости модели была использована процедура аугментации.

Для обучения модели классификатора применили метод отложенной выборки. Все данные случайным образом были разбиты на три группы: 70 % для обучения модели, 20 % для верификации, 10 % для итогового тестирования.

3. Проведена апробация разработанной модели классификатора по выявлению отклонения от нормального роста *Aloe Arborescens* L. Анализ метрик качества предложенного процесса классификации изображений показал высокую достоверность распознавания: для нормально развивающегося растения (класс «здоровое растение») – 91 %, для растения без полива (класс «недостаток воды») – 89 % и для растения без освещения (класс «недостаток освещения») – 83 %.

Проведена интерпретация и содержательное исследование результатов распознавания причин отклонений в развитии растения *Aloe Arborescens* L.

Анализ достоверности распознавания причин отклонений в развитии *Aloe Arborescens* L. по трем группам тестовых образцов показал, схожую достоверность отнесения растения к одному из трех классов: 92,6 %, 87,5 % и 85,5 %, соответственно.

Разработанная система распознавания может быть использована в качестве главной обратной связи системы автоматического управления гидропонной установкой. Это позволит снизить влияние участия человека на ход процесса и повысить урожайность *Aloe Arborescens* L. Кроме того, выработанный подход к решению поставленных задач обеспечивает возможность переучивать модель автоматического классификатора для решения соответствующих задач распознавания и других известных причин отклонений в развитии *Aloe Arborescens* L.

Разработан алгоритм управления автоматизированным ростом лекарственных растений в условиях гидропонных систем и структурная схема информационно-аналитического сопровождения при выращивании лекарственных растений.

Разработана схема, которая описывает алгоритм автоматизированного управления процессом роста лекарственного растения. Предложенный подход позволит значительно повысить эффективность производства, минимизируя участие человека в данном процессе. Это приведет к снижению затрат на рабочую силу.

Разработан интуитивно понятный интерфейс для автоматического управления ростом растений.

В результате исследований был разработан пользовательский интерфейс, который организывает обмен информацией между пользователем и программно-аппаратным комплексом.

С помощью данного средства интеграции пользователь имеет возможность непрерывного контроля за параметрами роста, компонентами гидропонной установки, моментом сбора урожая.

Пользователем может быть оператор, не имеющий знаний о специфике роста лекарственного растения. Для этого на главной странице интерфейса располагаются три элемента: «Контроль роста», «Контроль запасов» и «Сбор урожая». Знания о происходящих процессах в данных категориях будут достаточны для пользователя, чтобы контролировать процесс в целом. При этом, не потребуется участие ботаника, на предмет визуального обнаружения каких-либо отклонений. Встроенная система автоматического фотографирования отправляет снимки растений на сервер с заданной временной периодичностью, где модель классификатора отнесет растение к одному из предложенных классов. В свою очередь, с помощью предложенной логистической модели S-образной кривой роста можно высчитать величину отклонения от нормального развития.

С помощью функций меню можно создавать новые проекты выращивания растений, производить корректировку параметров системы и анализировать статистические данные.

Таким образом, поставленные в диссертационном исследовании задачи были решены. Разработанная модель классификатора отнесения растения *Aloe Arborescens* L. показывает хорошие результаты. Математическая модель достаточно хорошо описывает тенденцию изменения площади листовой поверхности растения. Предложенная структурная схема описания алгоритма автоматизированной системы управления процессом выращивания растений с использованием автоматического фотографирования, сервера контроля и управления параметрами системы, модели классификатора и математической зависимости изменения площади растения во времени повысит эффективность процесса производства и качество урожая.

Диссертационное исследование соответствует государственной программе «Цифровой Казахстан», утвержденной 12 декабря 2017 г. Постановлением Правительства Республики Казахстан №827, задача «Цифровизация сельского хозяйства». Диссертация отвечает приоритетному направлению развития науки: «Устойчивое развитие агропромышленного комплекса и безопасность сельскохозяйственной продукции».

СПИСКИ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Самохвалова Е.В. Биологические функции и моделирование продукционного процесса зерновых культур в условиях самарской области //Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 3, № 1. – С. 241-246.
- 2 Рулева О.В. Модель продукционного процесса сельскохозяйственных культур в орошаемых агролесоландшафтах. //Нижеволжский агроуниверситетский комплекс. – 2014, № 3. – С. 1-7.
- 3 Ризниченко Г.Ю., Рубин А.Б. Математические методы в биологии и экологии. Биофизическая динамика продукционных процессов. Часть 2: Учебник для бакалавриата и магистратуры. – Изд. 3-е. – М.: Издательство Юрайт, 2018. – 185 с.
- 4 Поленок С.П. Математическое моделирование роста и продуктивности агроценозов: автореф. ...канд. физ.-мат. наук: 05.13.16.– Ростов-на-Дону, 1990. –16 с.
- 5 Трофимов И.А., Трофимова Л.С., Яковлева Е.П., Развитие системного подхода к изучению сельскохозяйственных земель и управлению агроландшафтами //Поволжский экологический журнал. – 2016. – № 4. – С. 455-266.
- 6 Субботин А.М., Нарушко М.В., Боме Н.А. Влияние микроорганизмов из многолетнемерзлых пород на морфофизиологические показатели яровой пшеницы // Вавиловский журнал генетики и селекции. – 2016. – Т. 20, № 5. – С. 666-672.
- 7 Михайленко И.М., Канаш Е.В., Тимошин В.Н. Моделирование линейного роста растений в условиях окислительного стресса, вызванного действием УФ-В радиации //Сельскохозяйственная биология. – 2014, № 1. – С. 17-25.
- 8 Попкова М.И., Тычков И.И., Бабушкина Е.А. Модифицированный алгоритм оценки радиальных размеров клеток в имитационной модели Ваганова-Шашкина //Журнал Сибирского федерального университета. – 2015. – Т. 8, № 4. – С. 495-513.
- 9 Горковенко Н.Е. Математическое моделирование в экологии //ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный аграрный университет»: УМП для практических занятий. – КГАУ, 2015. – 52 с.
- 10 Попова С.А. Математическое моделирование продуктивности растений как средство повышения эффективности энергосбережения // Вестник КрасГАУ. – 2010, № 7. – С. 141-145.
- 11 Надежкин С.М. Моделирование урожайности и качества столовых корнеплодов при использовании различных агротехнических приемов. //Овощи России. – 2017, № 5. – С. 67-71.

- 12 Беспаленко О.Н., Котельников Д.С., Порываев М.В. Плодоношение деревьев сосны обыкновенной в клоновом архиве Моршанского лесничества Тамбовской области // Лесотехнический журнал. – 2016. – Т. 6, № 4. – С. 22-29.
- 13 Зубаирова У.С., Дорошков А.В., Паттерн эпидермиса листа пшеницы как модель для изучения влияния стрессовых условий на морфогенез // Вавиловский журнал генетики и селекции. – 2018. – № 7. – С. 837-844.
- 14 Ракутько С.А., Васькин А.Н. Математическое моделирование биометрических показателей растений салата (*Lactuca Sativa* L.) // ФГБНУ ИАЭП. – 2016. – С. 376-379.
- 15 Ткачева А.А., Данилин И.М. Использование данных лазерного сканирования в моделировании лесных ландшафтных сцен // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2017. – Т. 10, № 6. – С. 727-740.
- 16 Purnachandra Rao Koya, Ayele Taye Goshu. // Generalized Mathematical Model for Biological Growths. Open Journal of Modelling and Simulation. – 2013, № 1. – P. 42-53.
- 17 M. S. Malik, C. Surendran, K. Kailasham. // A Mathematical Model for Predicting the Growth of Eucalyptus Globulus under Agroforestry Plantation. XII World Forestry Congress. – 2003. – P. 205-209.
- 18 Allen R. Overman, Kelly H. Brock A. // Model of Growth and Nutrient Uptake by Tobacco. University of Florida. 2012. – P. 1-50.
- 19 Allen R. Overman, Richard V. Scholtz III. // Accumulation and partitioning of biomass by soybean. University of Florida. – 2012. – P. 1-22.
- 20 Allen R. Overman, Richard V. Scholtz III. // Accumulation of Biomass and Mineral Elements with Calendar Time by Corn: Application of the Expanded Growth Model. PLOS ONE. – 2011. – Vol. 6, № 12. – P. 1-5.
- 21 Kenji Shirai, Yoshinori Amano. // Mathematical Model of Plant Leaf Area Growth. Niigata University of International and Information Studies Bulletin. – 2018. – P. 1-5.
- 22 Agnieszka Szparaga, Slawomir Kocira. // Generalized logistic functions in modelling emergence of Brassica napus L. PLOS ONE. – 2018. – Vol. 13, № 8. – P. 241-246.
- 23 Juárez-Maldonado A.; Benavides-Mendoza A., de-Alba-Romenus, K.; Morales-Díaz A.B. Dynamic modeling of mineral contents in greenhouse tomato crop. // Agricultural Sciences. – 2014. – Vol. 5, № 2. – P. 114-123.
- 24 Tap R.F. Economics-based optimal control of greenhouse tomato crop production. // Wageningen Agricultural University. – 2000. – P. 36-39.
- 25 Lino J. Ramírez-Pérez, América Berenice Morales-Díaz, Karim de Alba-Romenus, Susana González-Morales, Adalberto Benavides-Mendoza, Antonio Juárez-Maldonado. Determination of Micronutrient Accumulation in Greenhouse Cucumber Crop Using a Modeling Approach. // AGRONOMY–BASEL. – 2017. – Vol. 7, № 4. – P. 1-17.

26 Karla Vilaça Martins, Durval Dourado-Neto, Klaus Reichardt, Quirijn de Jong van Lier, José Laércio Favarin, Felipe Fadel Sartori, Guilherme Felisberto and Simone da Costa Mello. Preliminary Studies to Characterize the Temporal Variation of Micronutrient Composition of the Above Ground Organs of Maize and Correlated Uptake Rates. //FRONTIERS IN PLANT SCIENCE. – 2017. – Vol. 8. – P. 1-14.

27 A.W.M. Verkroost, M.J. Wassen. A Simple Model for Nitrogen-limited Plant Growth and Nitrogen Allocation. //ANNALS OF BOTANY. – 2005. – Vol. 96, № 5. – P. 871–876.

28 Chrystel Feller, Patrick Favre, Ales Janka, Samuel C. Zeeman, Jean-Pierre Gabriel, Didier Reinhardt. Mathematical Modeling of the Dynamics of Shoot-Root Interactions and Resource Partitioning in Plant Growth. // PLOS ONE. – 2015. – Vol. 10, № 7. – P. 871-876.

29 Выращивание лекарственных растений как бизнес. <https://newbusiness.su/vyrashhivanie-lekarstvennykh-rastenij-biznes.html>. 05.06.2019.

30 Гидропонный метод выращивания растений без почвы. <https://floralworld.ru/gidroponica.html#substrat>. 07.06.2019.

31 Рой Маккалистер. Все о суккулентах. – СПб: ООО «СЗКЭО «Кристалл»», 2007. – 208 с.

32 Удобрения для развития кактусов. <https://proudobreniya.ru/udobrenie-dlya-aloe>. 05.06.2019.

33 Субстрат Plagron Batmix 25 л. <https://agrodom.com/substraty-taragorshki/substraty/plagron/batmix-25-l/>. 07.06.2019.

34 Ghasemi, N.D., Asghari, G., Mostajeran, A., Najafabadi, A.H. Evaluating the composition of *Matricaria Recutita* L. flowers essential oil in hydroponic culture // Journal of Current Chemical and Pharmaceutical Sciences. – 2013. – Vol. 3, № 1. – P. 54-59.

35 Тихомирова. Л.И., Базарнова Н.Г., Ильичёва Т.Н., Сысоева А.В. Способ получения лекарственного растительного сырья лапчатки белой (*Potentilla Alba* L.) в условиях гидропоники // Химия растительного сырья. – 2016, № 3. – С. 59-66.

36 Способ размножения копеечника чайного (*Hedysarum Theinum* Krasnob). <http://elibrary.asu.ru/xmlui/bitstream/handle/asu/7141/2547593.PDF?sequence=1&isAllowed=y>. 07.06.2019.

37 Правила и преимущества выращивания укропа на гидропонике. <http://megaogorod.com/atricle/2072-pravila-i-preimushchestva-vyrashchivaniya-ukropa-na-gidroponike>. 07.06.2019.

38 Обучение гидропонике шаг за шагом. <https://floragrowing.com/ru>. 09.06.2019.

39 Шалфей. Выращивание методом гидропоники. <https://floragrowing.com/ru/encyclopedia/shalfey-vyrashchivanie-metodom-gidroponiki>. 10.06.2019.

- 40 Выращивание эфиромасличных растений – Гидропоника. www.ponics.ru/2009/04/herbs/. 10.06.2019.
- 41 Мята. Выращивание методом гидропоники. <https://floragrowing.com/ru/encyclopedia/myata-vyrashchivanie-metodom-gidroponiki>. 10.06.2019.
- 42 Бентли М. Промышленная гидропоника. Москва: «Колос», 1965. – 376 с.
- 43 Как выращивать рукколу на гидропонике в домашних условиях. <https://myhydropony.com/tehnologiya-vyrashivaniya-rukkoly-na-gidroponike/>. 15.06.2019.
- 44 Giurgiu R.M., Morar G.A., Dumitraş A., Boancă P., Duda B.M., Moldovan C. Study regarding the suitability of cultivating medicinal plants in hydroponic systems in controlled environment // Research Journal of Agricultural Science. – 2014. – Т. 46, № 2. – С. 84-92.
- 45 Трава на гидропонике для кормления животных. <https://agronovia.ru/trava-na-gidroponike-dlja-kormlenija-zhivotnyh/>. 15.06.2019.
- 46 Варданян А.П. Культивирование *Hypericum Perforatum* L. сопряженным методом *in vitro* и гидропоники // Институт проблем гидропоник: автореф. ... канд.биологических наук: 03.00.14 –Армения, 2013. – С.1-14.
- 47 Dorais M., Papadopoulos A.P., Leonhart S., Gosselin A. Gaudreau L. Luo X. Pedneault K. Angers P. «Беспочвенное тепличное производство лекарственных растений на северо-востоке Канады» // Acta horticultrae. –2001. – С. 297-303.
- 48 Al-Karaki G.N., Othman Y. Soilless cultivation of some medicinal and aromatic herb plants under the conditions of Arabian Gulf region // Emir. J. Food Agric. – 2009. – Т. 21, № 2. – С. 64-70.
- 49 Harley N. Smith Hydroponic Herb Gardening // <http://herbgardening.com/howtogrowherbsinhyrdoponics.htm>. 08.02.2019.
- 50 "Aeroflo system". <https://www.gidroponika.su/g/gidroponnye-ustanovki/ghe-sistema/aeroflo-14-kupit.html>. 01.03.2019.
- 51 Boris Delaide, Simon Goddek, James Gott, Helene Soyeurt and M. Haissam Jijakli. Lettuce (*Lactuca sativa* L. var. Sucrine) Growth Performance in Complemented Aquaponic Solution Outperforms Hydroponics // WATER. – Switzerland, 2016. – Vol. 8. –I.10.– P.1-11.
- 52 "Rainforest system". <https://4grow.com.ua/product/aeroponnaya-sistema-rainforest-72>. 01.03.2019.
- 53 "AquaPot system". <http://aquapot.ru/aquapotXL8.html>. 01.03.2019.
- 54 "Wilma Pot Complete System". <http://svetisad.ru/svetisad.ru/product/gidroponnaya-sistema-wilma-large-8-6l-pot-complete-system>. 01.03.2019.
- 55 "Hypod Universal's Dutch Hydro Complex". <http://freegrower.org/gidroponnaya-sistema-dutch-hydro-complex-1m2/>. 01.03.2019.
- 56 "Over Grower automated system". <http://overgrower.ru/>. 01.03.2019.

- 57 "E-MODE automated system ". <https://e-mode.pro/>. 01.03.2019.
- 58 "Sunflower automated system". <https://gidroponika.com/content/view/330/142/>. 01.03.2019.
- 59 "Pi Rack/240". <https://www.pi-technics.com/en/products/pi-rack/>. 01.03.2019.
- 60 Francisco Javier Ferrández-Pastor, Juan Manuel Garcia-Chamizo, Mario Nieto-Hidalgo, Jeronimo Mora-Pascual and Jose Mora-Martinez. Developing Ubiquitous Sensor Network Platform Using Internet of Things: Application in Precision Agriculture // SENSORS. – Switzerland, 2016. – Vol. 16. – I. 7. – P. 1-20.
- 61 Альт В.В. // Совокупность информационных технологий и их роль в автоматизации сельскохозяйственного производства. – Россия, 2018. – Т. 12, № 1. – С. 9–15.
- 62 Измаилов А.Ю., Лобачевский Я.П., Хорошенков В.К., Смирнов И.Г., Гончаров Н.Т., Лужнова Е.С. Оптимизация управления технологическими процессами в растениеводстве // Agricultural machinery and technologies. – Россия, 2018. – Т. 12, № 3. – С. 4–11.
- 63 Wemerson Pinheiro da Costa, Deyvison de Lima Oliveira, Robinson Francino da Costa. Hydroponic production system: Proposed accounting flow In accordance with CPC 29 // REVISTA AMBIENTE CONTABIL. – Brasil, 2018. – Vol. 10. – I. 1. – P. 329–346.
- 64 Stephane Adamowicz, Jacques Le Bot, Ruth Huanosto Magana and Jose Fabre. Totomatix: a novel automatic set-up to control diurnal, diel and long-term plant nitrate nutrition // ANNALS OF BOTANY. – Brasil, 2018. – Vol. 109. – I. 1. – P. 309–319.
- 65 Marizel, B., Ma. Louella M. Salenga (2018). Bitter Melon Crop Yield Prediction using Machine Learning Algorithm. // International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2018. – Vol. 9, № 3. – P. 1–6.
- 66 Muammer Turkoglu, Davut Hanbay. (2019). Plant disease and pest detection using deep learning-based features. // Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, Turkey, 2019. – Vol. 27. – P. 1636-1651.
- 67 Jihen Amara, Bassem Bouaziz, Alsayed Algergawy. A Deep Learning-based Approach for Banana Leaf Diseases Classification. // Lecture Notes in Informatics (LNI), Gesellschaft für Informatik. – Germany, – 2017. – P. 79-88.
- 68 Ishikawa, T., Hayashi, A., Nagamatsu, S., Kyutoku, Y., Dan, I., Wada, T., Oku, K., Saeki, Y., Uto, T., Tanabata, T., ISOBE, S., Kochi N. (2018). Classification of strawberry fruit shape by machine learning. // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, – Italy, 2018. – Vol. XLII-2, P. – 463-470.
- 69 Arif Ullah, Nazri Mohd Nawi, Anditya Arifianto, Imran Ahmed, Muhammad Aamir, Sundas Naqeeb Khan. (2019). Real-Time Wheat Classification System for Selective Herbicides Using Broad Wheat Estimation in Deep Neural Network. // International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology, – Indonesia, 2019. – Vol. 9, № 1. – P. 153-158.

- 70 Haiguang Wang, Guanlin Li, Zhanhong Ma, Xiaolong Li. Application of neural networks to image recognition of plant diseases. // International conference on Systems and Informatics (ICSAI), China, 2012, – P. 2159-2164.
- 71 Bikash Chandra Karmokar, Mohammad Samawat Ullah, Md. Kibria Siddiquee, Kazi Md. Rokibul Alam. Tea Leaf Diseases Recognition using Neural Network Ensemble // International Journal of Computer Applications, – 2015. – Vol. 114, № 17. – P. 27-30.
- 72 Russakovsky, O., Deng, J., Su, H., Krause, J., Satheesh, S., Ma, S., Huang, Zh., Karpathy, A., Khosla, A., Bernstein, M., Berg, A., Fei-Fei, L. ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge // International Journal of Computer Vision, – 2015. – Vol. 115, № 3. – P. 211–252.
- 73 LeCun, Y., Bottou, L., Bengio, Y., Haffner, P. // Gradient-Based Learning Applied to Document Recognition. Proceedings of the IEEE, – 1998. – Vol. 86, № 11. – P. 2278-2324.
- 74 Krizhevsky, A., Sutskever, I., Hinton, G. E. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks // Advances in Neural Information Processing Systems, – 2012. – Vol. 25, № 2. – P. 1097–1105.
- 75 LeCun, Y.; Bengio, Y., Geoffrey, H. Deep learning // Nature. – 2015. – Vol. 521, № 7553. – P. 436–444.
- 76 Srivastava, R.K., Greff K., Schmidhuber J. Training Very Deep Networks // Neural Information Processing Systems, – 2015. – Vol. 1. – P. 1-9.
- 77 Szegedy, C., Liu, W., Jia, Y., Sermanet, P., Reed, S., Anguelov, G., Erhan, D., Vanhoucke, V., Rabinovich, A. Going Deeper with Convolutions // The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, – 2015. – P. 1-9.
- 78 He, K., Zhang, X., Ren, Sh., Sun, J. Deep Residual Learning for Image Recognition // Computer Science, – 2016. – P. 770-778.
- 79 Du, W., Rao, N., Liu, D., Jiang, H., Luo, C., Li, Zh., Gan, T., Zeng, B. (2019). Review on the Applications of Deep Learning in the Analysis of Gastrointestinal Endoscopy Images. IEEE Access, – 2019. – Vol. 7. – P. 142053-142069.
- 80 VGG16 model for Keras. <https://gist.github.com/baraldilorenzo/07d7802847aaad0a35d3>. 07.02.2020.
- 81 Large Scale Visual Recognition Challenge 2012. <http://image-net.org/challenges/LSVRC/2012/>. 07.02.2020.
- 82 V. Brukhin, N. Morozova. Plant Growth and development – basic knowledge and current views // Mathematical Modeling of Natural Phenomena. – 2011. – Vol. 6, № 2. – C. 1-53.
- 83 A. Gregorczyk. The logistic function – its application to the description and prognosis of plant growth // Acta Societatis Botanicorum Poloniae. – 1991. – Vol. 6, № 1-2. – P. 67-76.
- 84 Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул: учебное пособие для втузов. – Изд. 2-е, перер. и доп. – М.: Высш. шк., 1988. – 239 с.

85 Tihomirova, L.I., Bazarnova, T.N., Il'ichyova, T.N., Sysoeva, A.V. (2016). Способ получения лекарственного растительного сырья лапчатки белой (*Potentilla alba* L.) в условиях гидропоники // Химия растительного сырья (Chemistry of vegetable raw materials). – 2016. – Т. 3, С. 59-66.

86 Vardanyan, A. P. Cultivation of *Hypericum Perforatum* L. by the IN VITRO conjugate method and hydroponics: ... cand. of biolog. sciences. 03.00.14 – Армения, 2013. – 123 с.

87 Dorais, M., Papadopoulos, A.P., Luo, X., Leonhart, S., Gosselin, A., Pedneault, K., Angers, P., Gaudreau, L. Soilless greenhouse production of medicinal plants in north eastern Canada // *Acta horticulturae*. – 2001. – Vol. 554. – P. 297-303.

88 Sunflower automated system. Retrieved from <https://gidroponika.com/content/view/330/142/>.

89 Aeroflo system. Retrieved from <https://www.gidroponika.su/g/gidroponnye-ustanovki/ghe-sistema/aeroflo-14-kupit.html>.

90 Kim, G., Demyanenko A. A review of automated hydroponic systems of the main world manufacturers // *Vestnik kazaxskogo nacional'nogo issledovatel'skogo tekhnicheskogo universiteta imeni K.I. Satpaeva Ministerstva obrazovaniya i nauki Respubliki Kazaxstan. Seriya: Tekhnicheskie nauki* (Bulletin of the Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev of the Ministry of Education and Science of the Kazakhstan Republic. Series of Works: Technical sciences). – 2019. – Vol. 4, № 134. – P. 370-376.

91 Keras. <https://keras.io/>. 17.07.2020.

92 TensorFlow. <https://www.tensorflow.org/>. 19.07.2020.

93 Theano. <https://github.com/Theano/Theano>. 25.07.2020.

94 The Microsoft Cognitive Toolkit. <https://docs.microsoft.com/en-us/cognitive-toolkit>. 25.07.2020.

95 NVIDIA cuDNN. <https://developer.nvidia.com/cudnn>. 25.07.2020.

96 Николенко С., Кадури А., Архангельская Е. Глубокое обучение. – СПб.: Питер, 2018. – 480 с.

97 Kingma D., Ba J. Adam: A Method for Stochastic Optimization // *International Conference on Learning Representations*. – 2015. – P. 1-15.

98 Настройка PTZ туров. http://flyviewvms.ru/help/index.html?setting_up_ptz_tours.htm. 15.10.2021.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Авторское право

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ

РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

СВИДЕТЕЛЬСТВО
О ВНЕСЕНИИ СВЕДЕНИЙ В ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕЕСТР
ПРАВ НА ОБЪЕКТЫ, ОХРАНЯЕМЫЕ АВТОРСКИМ ПРАВОМ
№ 22834 от «12» января 2022 года

Фамилия, имя, отчество, (если оно указано в документе, удостоверяющем личность) автора (ов):
КИМ ГУЛЬНАР АМАНГЕЛЬДЫБЕГНА, Демьяненко Александр Валентинович

Вид объекта авторского права: приложение к работе

Название объекта: Структурная схема азиатской системы управления скоростью роста растения Aloe
Arborescens L. с эталонной моделью

Дата создания объекта: 20.12.2021





Полный текст документа: <https://www.kazpatent.kz/ru/avtomaticheskoe>
"Авторское право" Елтімізді қолдаушы қоры: <https://copyright.kazpatent.kz>
Подлинность документа возможно проверить на сайте [kazpatent.kz](https://www.kazpatent.kz)
в разделе «Авторское право» <https://copyright.kazpatent.kz>

Подписано ЭЦП

Е. Куантыров