

На правах рукописи

Супельняк Станислав Игоревич

**ВЛИЯНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА И ИНТЕНСИВНОСТИ
ИЗЛУЧЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ НА ПАРАМЕТРЫ
ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА ОРГАНИЧЕСКИМ ВЕЩЕСТВОМ**

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук



Москва – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном
образовательном учреждении высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Косушкин Виктор Григорьевич

Официальные оппоненты: **Яцышен Валерий Васильевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Волгоградский
государственный университет», профессор
кафедры судебной экспертизы и
физического материаловедения

Степанов Пётр Александрович
кандидат физико-математических наук,
доцент, АО «Обнинское научно-
производственное предприятие
«Технология» им. А. Г. Ромашина»,
начальник научно-исследовательской
лаборатории разработки методов
получения изделий из
полимеркомпозиционных материалов и
технологии производства радиопрозрачных
конструкций

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тверской государственный
университет»

Защита состоится « 18 » марта 2020 г. в 14 часов 30 минут на заседании
диссертационного совета Д 212.141.17, созданного на базе ФГБОУ ВО
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)», по адресу: 248000, г. Калуга,
ул. Баженова, д. 2, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и
на сайтах <http://www.bmstu.ru>, <http://www.bmstu-kaluga.ru>.

Автореферат разослан « » 2019 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук,
доцент



Лоскутов Сергей Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Теоретическое и экспериментальное исследование воздействий различных видов излучений на природу изменений физических свойств конденсированных веществ, а также прогнозирование изменения физических свойств конденсированных веществ в зависимости от внешних условий являются важными и актуальными задачами в области *физики конденсированного состояния*. Результаты этих исследований активно применяются в области конструирования неорганических материалов, однако мало оптимизированы для изучения объектов с точки зрения органических систем.

В настоящее время исследования влияния света на мягкое конденсированное вещество (полимеры, белки и другие биологические материалы) не только не потеряли актуальности, но и определяют развитие важнейших прикладных направлений. В начале тысячелетия стало очевидно, что новое знание рождается на стыке наук. Так возник термин «NBIC-конвергенция», подразумевающий синергетический эффект сочетания достижений нано-, био-, информационных технологий и когнитивных наук. В диссертации развит подход, лежащий в канве NBIC-конвергенции. Предлагается применение модели транзистора для органического фоторецептора (пигмент-белкового комплекса) с целью прогнозирования процессов поглощения, преобразования энергии фотонов и распределения энергии синтезированных химических соединений системой фоторецепторов. На примере фоторецептора криптохрома (CRY) показано, что выходной сигнал модулируется слабым управляющим воздействием, а также соответствие другим родовым особенностям биполярных транзисторов. Применение твердотельных элементов для описания свойств совокупности фоторецепторов позволит производить физическое моделирование воздействия света различного спектрального состава и интенсивности на сложные системы в более короткие сроки в сравнении с биологическими экспериментами, что делает тему диссертации актуальной.

Работа соответствует *приоритетному направлению развития науки, технологий и техники Российской Федерации* («Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика») и *перечню критических технологий Российской Федерации* («Технологии создания электронной компонентной базы и энергоэффективных световых устройств») [Указ Президента РФ от 07.07.2011 N 899 (ред. от 16.12.2015) "Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации"].

Целью диссертационной работы является исследование влияния спектрального состава и интенсивности излучения искусственных источников на параметры поглощения света органическим веществом.

В соответствии с поставленной целью **основными задачами** диссертационного исследования являются:

- Изучить спектральные характеристики органического вещества (листовой пластиинки) в диапазоне длин волн 400-700 нм;
- Разработать физическую модель, описывающую фоточувствительные свойства системы светочувствительных белков;
- Разработать метод оценки воздействия искусственного освещения на управляемые фоторецепторами фоточувствительные процессы в органической системе.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Установлена зависимость спектральных характеристик органического вещества (листовой пластиинки) в видимой области спектра (400-700 нм) во времени; с использованием группового однофакторного дисперсионного анализа (one way ANOVA) и попарного анализа четырех групп экспериментальных значений поглощения света листовой пластиинкой определены статистически значимые различия коэффициента поглощения в характеристических максимумах поглощения 465 нм, 670 нм и минимуме 545 нм;

- Впервые на примере светочувствительного белка криптохрома (CRY) показана возможность применения модели транзистора для физического моделирования работы органических фоторецепторов;

- На основе полупроводниковых фотоэлементов разработана физическая модель системы фоторецепторов: фототропина (PHOT), криптохрома (CRY), фитохрома 660 (Ph(660)), фитохрома 730 (Ph(730));

- Предложена новая методика исследования воздействия излучения различного спектрального состава и интенсивности на фоточувствительные процессы в органическом веществе (листовой пластиинке).

Степень разработанности темы исследования:

Электронные процессы в органических веществах и фотохимические явления при воздействии спектров излучений в фундаментальном плане изучались С. Лоуэр, М. Эль-Сайд, а также W.R. Briggs, J.M. Christe и другими. Однако остаётся ряд неисследованных вопросов.

Научные положения, выносимые на защиту:

- В диапазоне длин волн 400-700 нм интенсивность поглощения света органическим веществом (листовой пластиинкой) изменяется во времени; длина волны характеристических максимумов и минимума остаётся неизменной.

- Функционирование фоторецептора CRY соответствует родовым особенностям биполярных транзисторов, а кривые активности белка подобны выходным вольтамперным характеристикам транзисторов.

- Исследование процессов взаимодействия света с системой светочувствительных белков PHOT, CRY, Ph(660), Ph(730) можно осуществлять путём физического моделирования с применением твердотельных элементов.

- Метод оценки воздействия излучения в зависимости от спектрального состава и интенсивности, позволяющий оценивать эффективность освещения для фоточувствительных процессов.

Методология и методы исследования. При выполнении диссертационной работы применялись аналитические и экспериментальные методы исследования. Использовались методы математического моделирования с применением программного обеспечения MathCAD, Matlab, ANSYS, AutoCAD, теоретические и практические методы спектроскопии, методы численного математического моделирования органических объектов, основы радиотехники, светотехники и электротехники, а также современная измерительная аппаратура.

Теоретическая и практическая значимость работы. Предложенная физическая модель позволяет расширить способы экспериментального исследования свойств сложных светочувствительных органических систем. Определённые спектральные характеристики создают научно-техническую основу для разработки современных энергоэффективных облучательных установок для теплиц наземного базирования и космических оранжерей, медицинского физиотерапевтического оборудования. Представленный метод оценки эффективности спектра света для фоточувствительных процессов может быть применен для различных систем (применение низкоэнергетического излучения в медицине, в гибридных оптических преобразователях и т.д.). Предложенная система оценки воздействия излучения на органическое вещество является интеллектуальной основой для создания энергоэффективной системы автоматического управления светодиодным освещением с обратной связью по измеряемому параметру.

Степень достоверности полученных результатов. Достоверность экспериментальных результатов исследований подтверждена их соответствием с модельными при сопоставлении значений эффективности различных спектров излучения, проведённом на современном оборудовании, и качественным их совпадением с известными данными. Основные результаты диссертации были изложены в статьях, опубликованных в рецензируемых научных журналах, а также были доложены и обсуждены на научно-технических конференциях.

Апробация результатов. Результаты работы докладывались и обсуждались на научных конференциях и семинарах: XI Международной конференции «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов» (Курск, 2014), XII Международной научной конференции «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов» (Усть-Каменогорск, 2015), семинаре на базе отдела функциональной морфологии и биомеханики университета Киля (Германия, Киль, 2016), семинаре на базе кафедры Биофизики университета Оsnабрюка, (Германия, Оsnабрюк, 2016), 3-й Международной научно-практической конференции «Физика и технология наноматериалов и структур» (Курск, 2017), XXVI Международной конференции «Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования)» (Москва, 2018).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, в том числе 5 статей в ведущих рецензируемых научных журналах из перечня ВАК РФ и 4 статьи в сборниках трудов научно-технических конференций. Одна статья индексирована в базе данных WoS.

Личный вклад. Основные результаты диссертационного исследования получены автором самостоятельно. Соискателем лично предложена модель транзистора для описания свойств белков, проанализировано влияние спектрального состава и интенсивности излучения от искусственных источников освещения на параметры поглощения света органическим веществом. В опубликованных работах, выполненных с соавторами, диссертант участвовал в проведении экспериментов, расчетов и оформлении рисунков, обсуждении и редактировании текстов.

Научно-исследовательская работа производилась на базе кафедры проектирования и технологии производства электронных приборов Калужского филиала федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» и факультета FB-4 «Физика» университета Оsnабрюка, Германия. Часть результатов получена при выполнении проекта, поддержанного грантом Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе «УМНИК».

Исследовательская работа поддержана стипендией Президента Российской Федерации для научной стажировки за рубежом аспирантов в 2015/2016 году (Приказ Минобрнауки России №558 от 03.06.2015), а также стипендией Правительства Российской Федерации для аспирантов МГТУ им. Н.Э. Баумана, обучающихся по образовательным программам высшего образования по очной форме по специальностям или направлениям подготовки, соответствующим приоритетным направлениям модернизации и технологического развития российской экономики 2017 года.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы, включающего 150 наименований, приложения. Общий объем работы составляет 150 страниц машинописного текста, включая 88 рисунков и 15 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы работы, сформулированы её цель и задачи, определены объекты исследования, показана научная новизна, сформулированы основные научные положения, выносимые на защиту, продемонстрирована научная и практическая значимость основных результатов, описана апробация результатов.

В **первой главе** показана актуальность исследования взаимодействий видимого излучения с органическим веществом для развития фундаментальной физики конденсированного состояния и инженерии. Рассмотрены принципы и спектры действия фоточувствительных процессов. Установлено, что, несмотря

на существование значительного опыта в области моделирования действия искусственного излучения, остаются не рассмотренными негативные и позитивные воздействия различного спектра света на регуляторные процессы, не учитываются спектральные особенности органического вещества во времени. Отсутствует физическая модель фоточувствительной органической системы, описывающая основные функции поглощения энергии фотонов, преобразования в энергию химических соединений и распределения накопленной энергии под управлением комплекса фоторецепторов. Остаётся нерешённым вопрос оценки эффективности излучения по совокупности фоточувствительных процессов и автоматизации процесса управления взаимодействия света с органическим веществом.

Во **второй главе** рассмотрена возможность использования модели транзистора для анализа и оптимизации процессов поглощения света «мягким» конденсированным веществом на примере фоторецепторного белка CRY (Рис.1).

Показано, что выходной сигнал (концентрация активных форм флавина FADH^{\cdot}) модулируется слабым управляющим воздействием (рН и АТФ). Также имеется соответствие другим родовым особенностям биполярных транзисторов:

1) Для их функционирования важны как основные, так и неосновные носители заряда: «активный режим» функционирования криптохрома сопровождается переносом электрона с аминокислотных остатков триптофана (W400, W377, W324) и переносом протона H^+ с остатка аспарагиновой кислоты (D396).

2) Возбуждённое состояние FAD^* обуславливает электростатическое взаимодействие с одним членом триады триптофанов и перенос электрона с аминокислотных остатков триптофана (W400, W377, W324) к возбуждённой молекуле FAD^* . Процесс переноса протона H^+ от D396 к активному центру макромолекулы (FAD^{\cdot}) зависит от потенциала, создаваемого в активном центре либо положительно заряженным аминокислотным остатком на поверхности белка в отсутствие АТФ, либо отрицательного заряженными фосфатами в присутствии АТФ. Т.е. в результате действия потенциалов осуществляется инжекция электронов, депротонирование, заключающаяся в формировании устойчивой нейтральной радикальной пары $\text{FADH}^{\cdot} + \text{W400(H)}^{\cdot}$ экстракция и рекомбинация зарядов.

3) Управление выходной характеристикой осуществляется посредством входного тока. Потенциал, создаваемый в активном центре моля криптохрома, зависит от концентрации ионов водорода H^+ и от количества АТФ, т.е. от потока частиц и связанного с ними электрического поля.

Показано, что, как и для биполярного транзистора в схеме ОБ, сохраняется параллельное перемещение выходной характеристики вдоль оси ординат при изменении величины управляющего фактора.

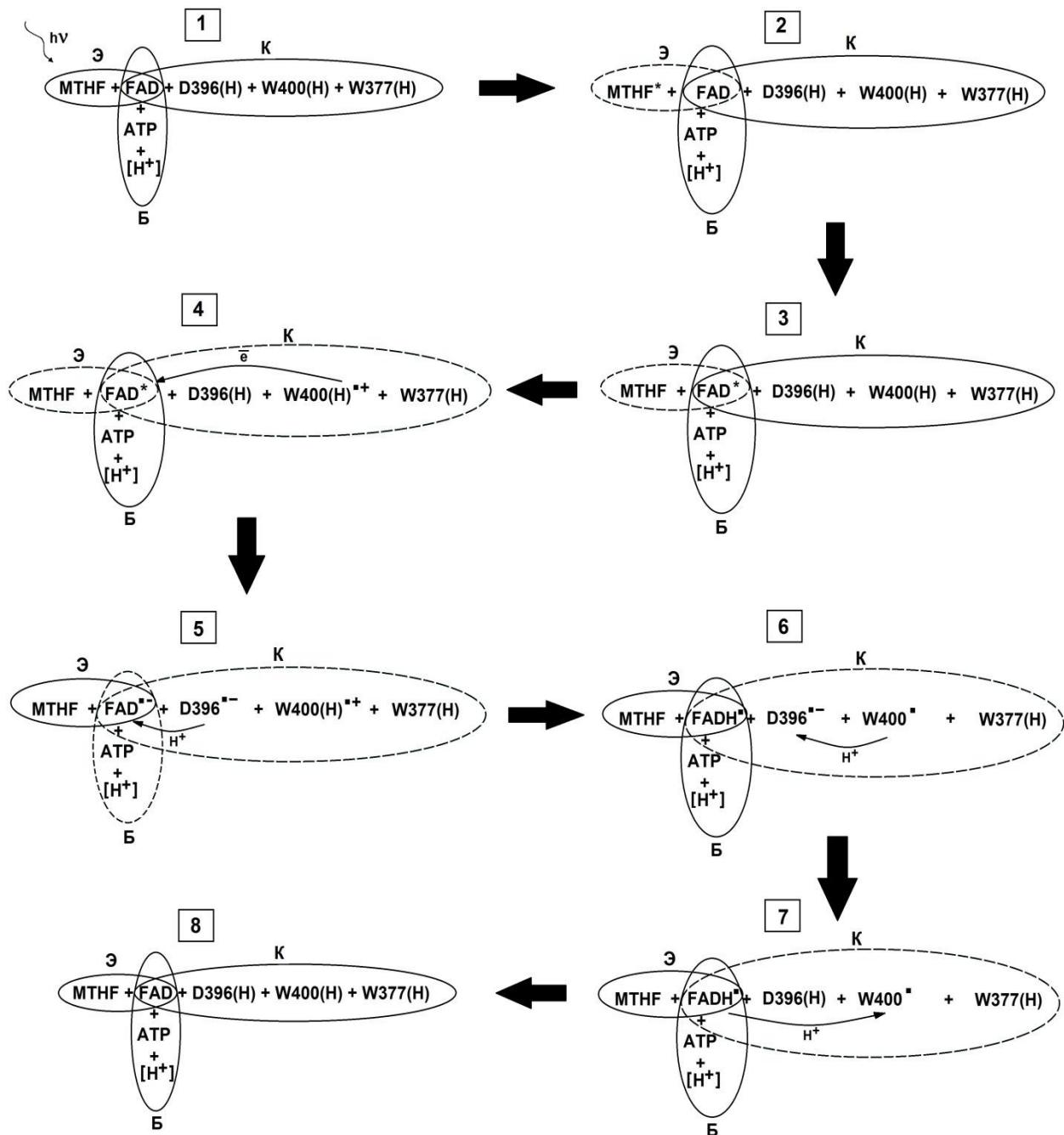


Рис.1. Функциональная схема окружения заряда FAD кофактора и механизма фоторецепции и переноса носителей заряда

Наиболее точно зависимость фотовосстановления FAD^* до FADH^{\bullet} от количества световой энергии описывается логистической функцией:

$$\Delta A_{565} = a_2 + (a_1 + a_2) / (1 + \exp((x - x_0)/b)). \quad (1)$$

Параметры оптимизации логистической функции для криптохрома в отсутствии АТФ: $a_1 = 2,43878 \cdot 10^{-4}$, $a_2 = 0,01302$, $x_0 = 4,28103$, $b = 0,32104$; при 1 мМ АТФ: $a_1 = 0,01266$, $a_2 = 0,02834$, $x_0 = 4,00914$, $b = 0,078352$. Оптимизированные сигмоидальные кривые показаны на Рис.2.

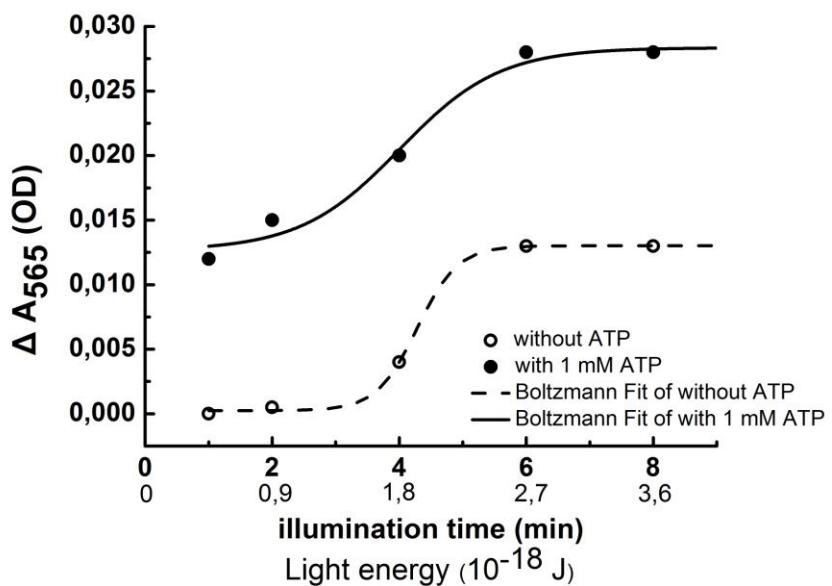


Рис.2. Результаты оптимизации логистической функции с помощью экспериментальных данных Burney S. et al.

Представлена схема фоточувствительной органической системы. На Рис.3 и Рис.4 солнечные батареи G1 и G2 преобразуют энергию фотонов в электрическую энергию и тем самым имитируют хлорофильные фотосистемы, осуществляющие преобразование энергии фотонов в химическую энергию.

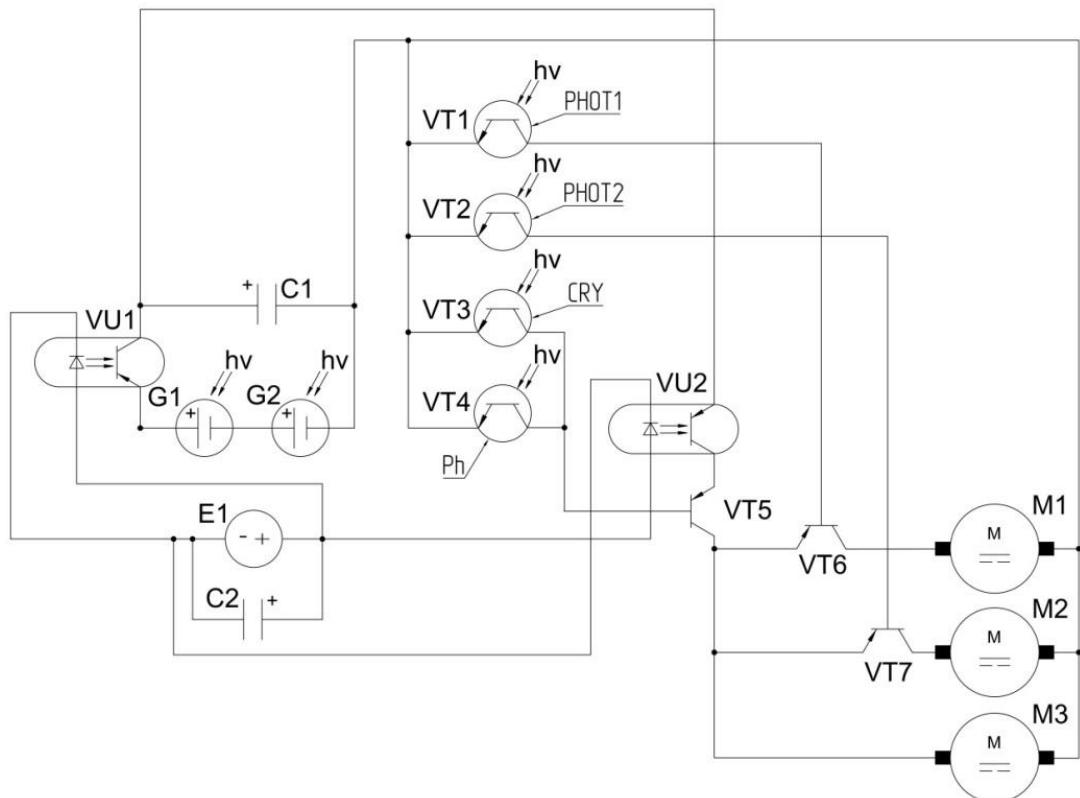


Рис.3. Схема модели фоточувствительной органической системы

Фототранзисторы VT1 и VT2, VT3 и VT4 имитируют функционирование фоторецепторов PHOT 1 и PHOT 2, CRY и Ph соответственно. Батарея C2

заряжается источником ЭДС с переменной интенсивностью E_1 , что является аналогом питания корневой системы минеральными элементами. Оптрон VU1 описывает зависимость эффективности фотосинтеза от потока минеральных веществ. Оптрон VU2 определяет поток электронов описывает зависимость проникновения в клетку глюкозы, аминокислот и нуклеотидов от концентрации ионов и минеральных веществ, поступающих из корневой системы. На основании сигналов фототранзисторов VT1, VT2, VT3, VT4 формируется итоговый управляющий сигнал, как и в реальной биологической системе. Транзистор VT5 выполняет интегрирование потоков энергии. Транзисторы VT6, VT7 регулируют ток электродвигателей M1, M2 и чувствительную к свету площадь панелей 1 и отражают ростовые изменения площади листовой поверхности и ориентации её в пространстве.

В случае, когда эффективность развития системы лимитируется потоком световой энергии, возможно исключение из схемы цепей, имитирующих каналы передачи токов ионов минеральных веществ. Распределение запасенной энергии определяется функционированием фоторецепторов и активируемыми сигнальными каскадами, как показано на Рис.4.

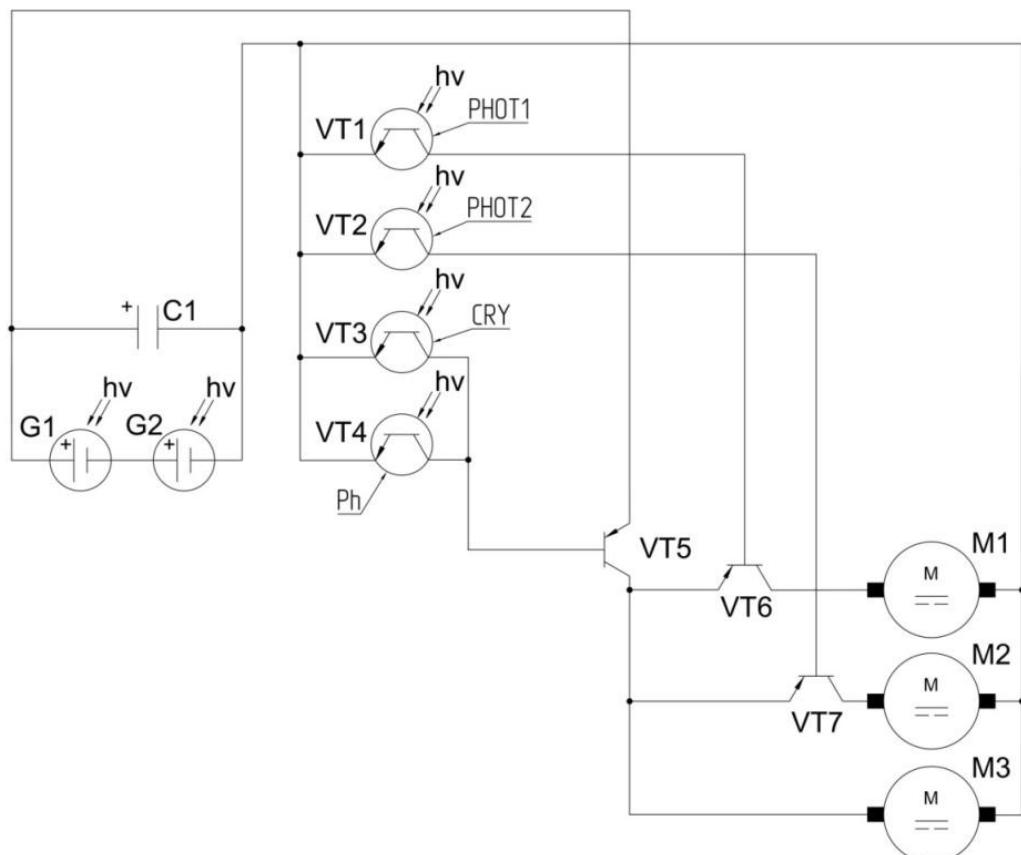


Рис.4. Схема модели фоточувствительной органической системы
(лимитирующий фактор - поток фотонов)

Представлены результаты исследования спектра поглощения органического вещества (листовой пластиинки) в процессе роста. Рассчитаны и приведены на Рис.5 коэффициенты поглощения света.

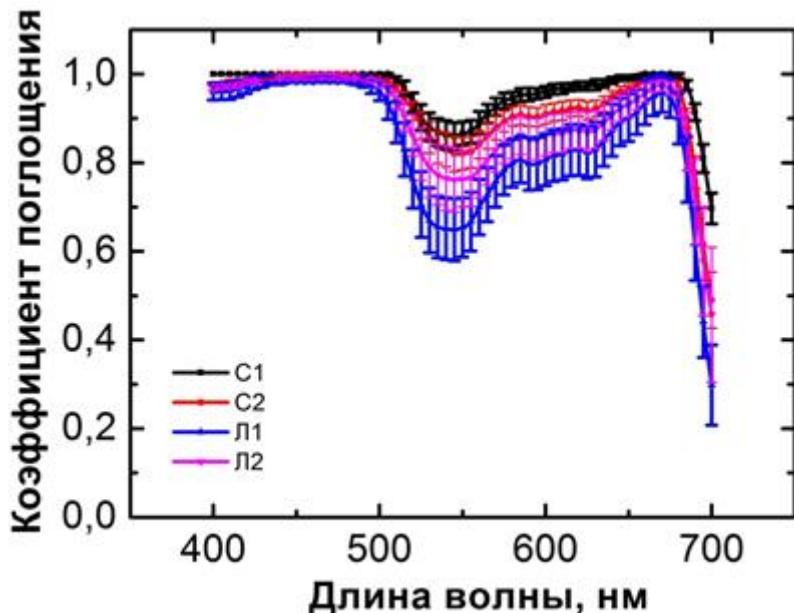


Рис.5. Эффект влияния стадии роста на коэффициент поглощения света листом; каждая кривая представляет среднее значение десяти измерений; “C1” и “C2” - семядоля 1 и семядоля 2; “L1” и “L2” - лист 1 и лист 2

С помощью группового однофакторного дисперсионного анализа установлено, что коэффициент поглощения листьев на 4 этапах роста имеет статистически значимые различия:

- для максимума при длине волны света 465 нм (one way ANOVA: $F_{C1, C2, l1, l2}=10,285$; $P=4,95E-05$; $F_{\text{крит}}=2,87$)
- для минимума при длине волны света 545 нм (one way ANOVA: $F_{C1, C2, l1, l2}=26,633$; $P=2,97E-09$; $F_{\text{крит}}=2,87$)
- для максимума при длине волны света 670 нм (one way ANOVA: $F_{C1, C2, l1, l2}=7,634$; $P=4,48E-4$; $F_{\text{крит}}=2,87$).

Описаны выполненные исследования по оценке эффективности спектра излучения для фоточувствительных процессов. Представлены результаты анализа влияния спектра излучения светодиодного фитосветильника мощностью 46 Вт (плотность потока фотонов 64 мкмоль/м²с) на базе светодиодов (440, 460, 530, 590, 630 и 660 нм) и дуговой натриевой трубчатой лампы высокого давления мощностью 250 Вт (плотность потока фотонов 404 мкмоль/м²с). На основе данных о спектре действия фотосинтеза $K_{\phi}(\lambda)$, а также о спектре поглощения листа (Рис.5) определено количество синтезированных углеводов. Плотность потока пригодных для фотосинтеза фотонов $D_{\phi}(\lambda)$ для длины волны λ :

$$D_{\phi}(\lambda) = K_{\phi}(\lambda)D(\lambda)K_{\text{погл}}(\lambda), \quad (2)$$

где $D(\lambda)$ - плотность потока фотонов излучения источника света. Суммарное количество преобразованных молекул углекислого газа составляет:

$$N_{\Sigma CO_2} = \sum_i \int_{t_1}^{t_2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{D_{\phi}(\lambda)}{E_{CO_2}/E_m(\lambda)} S_i d\lambda dt, \quad (3)$$

где t_1 и t_2 - время начала и завершения поглощения квантов света поверхностью. Масса накопленных углеводов $C_x(H_2O)_y$ рассчитывается:

$$M_{C_x(H_2O)_y} = K_1 K_2 N_{\Sigma CO_2} Mr_{CO_2}, \quad (4)$$

где $Mr_{CO_2} = 44.01$ г/моль молекулярная масса углекислого газа; K_1 - поправочный коэффициент перехода от массы преобразованного углекислого газа к массе накопленного сухого вещества; K_2 - поправочный коэффициент, учитывающий изменение диффузии углекислого газа и потери энергии в процессе дыхания.

Плотность потока фотонов, энергия которых рассеивается в виде тепла D_T :

$$D_T = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K_T(\lambda) D(\lambda) K_{\text{погл}}(\lambda) d\lambda. \quad (5)$$

В сравнении с энергетическими воздействиями фоторегуляторные требуют в десятки и сотни раз меньше энергии. Для количественной оценки эффективной для регуляторных процессов доли излучения предложено следующее выражение:

$$D_{\text{эфф}} = K_{\text{исп}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K_{\text{эфф}}(\lambda) D(\lambda) K_{\text{погл}}(\lambda) d\lambda, \quad (6)$$

где $K_{\text{исп}}$ - коэффициент использования энергии квантов света в регуляторных процессах. Для оценки эффективной доли излучения для фототропической реакции $D_{\text{фр}}$, синтеза хлорофилла $D_{\text{хл}}$, фотоморфогенеза по фитохрому Φ_{660} $D_{\Phi_{660}}$, фотоморфогенеза по фитохрому Φ_{730} $D_{\Phi_{730}}$ коэффициент $K_{\text{эфф}}(\lambda)$ принимает соответствующие значения спектров действия $K_{\text{фр}}(\lambda), K_{\text{хл}}(\lambda), K_{\Phi_{660}}(\lambda), K_{\Phi_{730}}(\lambda)$. Так как элементы системы и система в целом очень сложны, то коэффициент $K_{\text{исп}}$ рассмотрен как общий для всех регуляторных процессов:

$$K_{\text{исп}} = (D_{\text{погл}} - D_{\phi} - D_T) / (D_{\text{фр}} + D_{\text{хл}} + D_{\Phi_{660}} + D_{\Phi_{730}}). \quad (7)$$

При низкой плотности потока фотонов тепловые потери практически отсутствуют. Тогда для источников света, характеризующихся пониженной плотностью потока фотонов, формула (6) принимает вид:

$$K_{\text{исп}} = (D_{\text{погл}} - D_{\phi}) / (D_{\text{фр}} + D_{\text{хл}} + D_{\Phi_{660}} + D_{\Phi_{730}}). \quad (8)$$

Экспериментально подтверждена достоверность методики для теоретической оценки эффективности спектра излучения лампы ДНаТ и СИД светильника для фотосинтеза (Таблица 1). Впервые при расчёте массы углеводов использованы коэффициенты поглощения листовой пластиинки в зависимости от стадии роста.

Таблица 1.
Расчётные массы накопленных углеводов и средний сухой вес
экспериментально полученных образцов

	Расчётная средняя масса накопленных углеводов, г	Средний сухой вес выращенных образцов, г
СИД 46	0.05	0.05
ДНаТ 250	0.24	0.20

Третья глава посвящена разработке принципов функционирования системы автоматического управления освещением с обратной связью.

Показано, что изменение спектра излучения приводит к различному энергетическому и регуляторному воздействию. Для совместных фотобиологических процессов общая эффективность использования поглощенной энергии излучения:

$$K_{\text{общ}}(\lambda) = K_{\phi}(\lambda)K_{\text{т}}(\lambda)K_{\phi\text{р}}(\lambda)K_{\text{хл}}(\lambda)K_{\Phi 660}(\lambda)K_{\Phi 730}(\lambda). \quad (9)$$

Тепловое воздействие представляет процесс диссипации энергии фотонов в тепло. Для снижения теплового эффекта общего спектра исключается коэффициент тепловой эффективности $K_{\text{т}}(\lambda)$:

$$K_{\text{общ}}(\lambda) = K_{\phi}(\lambda)K_{\phi\text{р}}(\lambda)K_{\text{хл}}(\lambda)K_{\Phi 660}(\lambda)K_{\Phi 730}(\lambda). \quad (10)$$

На Рис.6 показан оптимальный спектр излучения СИД светильника мощностью 300 Вт (общий спектр) с плотностью потока фотонов 464 мкмоль/м²с.

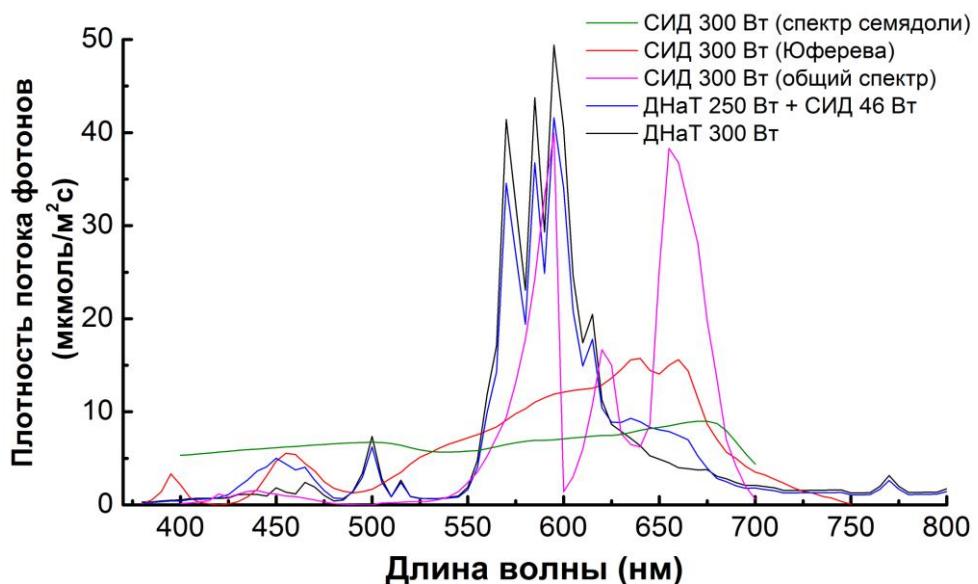


Рис.6. Исходные спектры излучения искусственных источников

Представлены результаты моделирования воздействия света на органическое вещество (Рис.7, Рис.8).

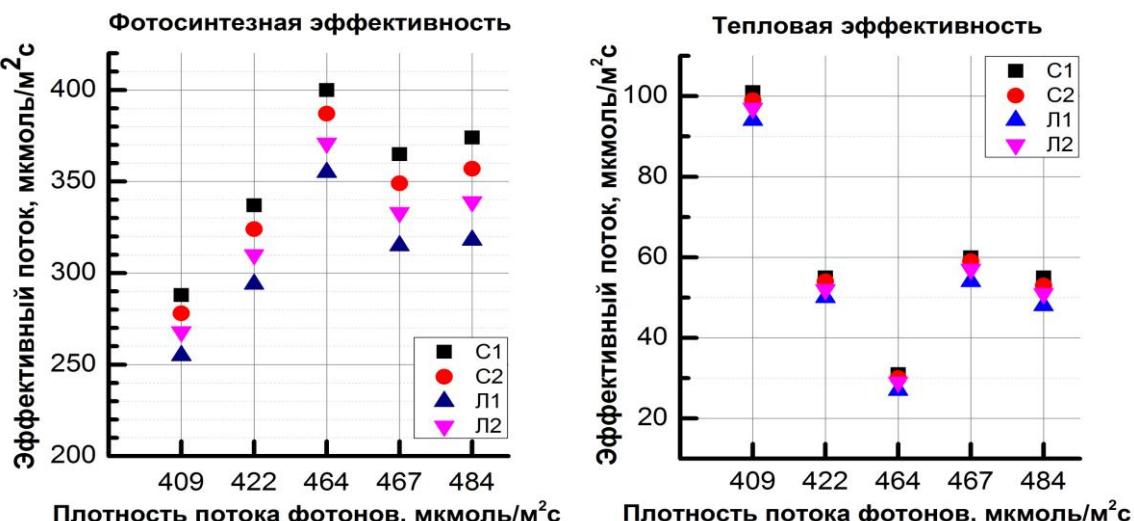


Рис.7. Эффективность излучения для энергетических процессов

В сравнении с излучением ДНаТ 300 Вт спектр СИД светильника более эффективен для фотосинтеза – от 7 до 11% в зависимости от стадии роста органического вещества. Рассчитанный спектр СИД светильника (общий спектр) характеризуется наименьшим тепловым воздействием, меньшим на 78% значений для излучения ДНаТ на всех рассматриваемых этапах роста.

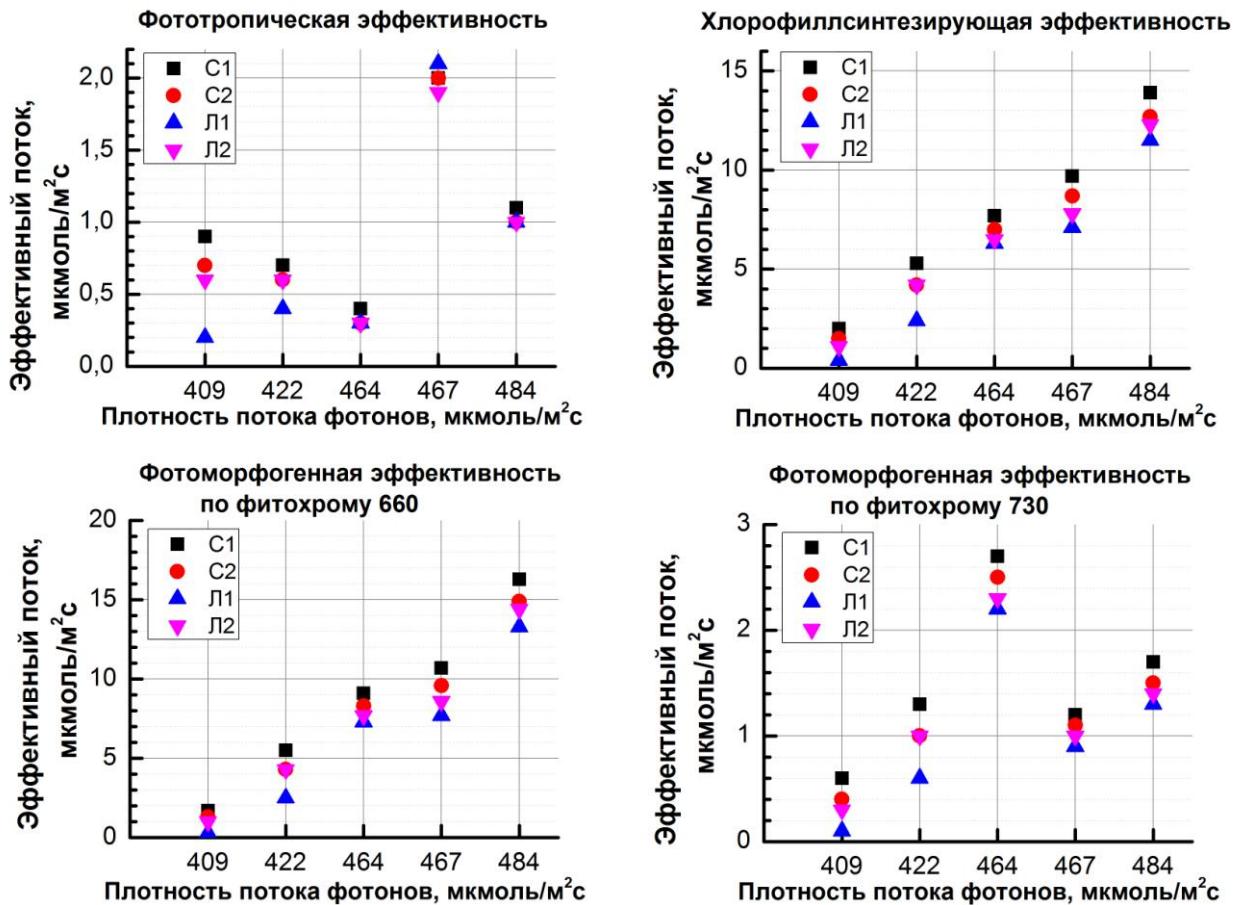


Рис.8. Эффективность излучения для регуляторных процессов

Также спектр излучения СИД светильника обладает более высокой плотностью потока фотонов, пригодных для регуляторных процессов. Установлено, что при увеличении плотности потока фотонов эффективность излучения для фоточувствительных реакций изменяется нелинейно для каждого этапа роста.

Для автоматизации процесса освещения растений в теплицах разработаны принципы функционирования системы автоматического управления, схема которой показана на Рис.9. На Рис.10 представлен алгоритм функционирования системы автоматического управления параметрами освещения теплицы. Спектрометр 1 осуществляет измерение спектра солнечного света $D_{\text{солн}}(\lambda)$. На основе методики оценки эффективности излучения предварительно рассчитывается оптимальный спектральный состав излучения $D_{\text{общ прогр}}(\lambda)$. На основе данных $D_{\text{солн}}(\lambda)$ осуществляется оценка недостающей части спектрального состава излучения, отсутствие которой должен компенсировать светодиодный осветитель $D_{\text{сид}}(\lambda)$:

$$D_{\text{сид}}(\lambda) = D_{\text{общ прогр}}(\lambda) - D_{\text{солн}}(\lambda). \quad (11)$$

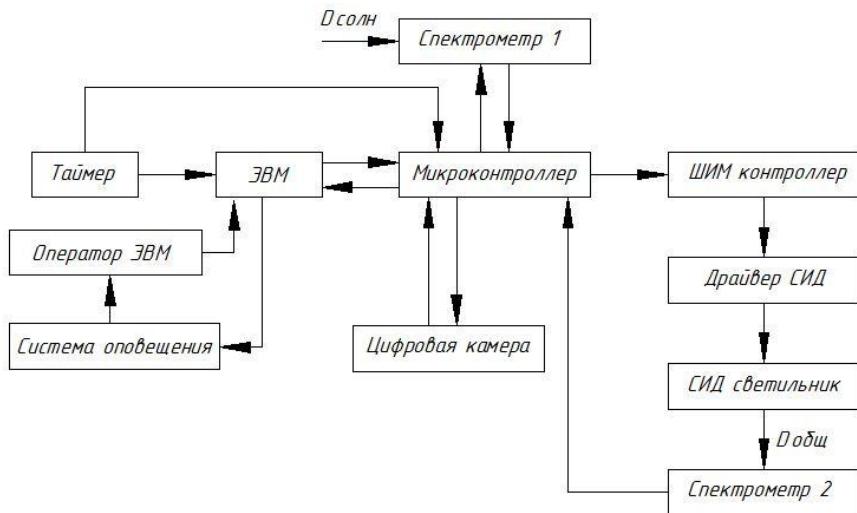


Рис.9. Функциональная схема системы автоматического управления

Спектрометр 2 фиксирует совокупное излучение $D_{\text{общ изм}}(\lambda)$. Производится сравнение требуемой совокупной композиции освещения $D_{\text{общ прогр}}(\lambda)$ и измеряемой $D_{\text{общ изм}}(\lambda)$. Если $D_{\text{общ прогр}}(\lambda) \neq D_{\text{общ изм}}(\lambda)$, осуществляется диагностирование величины ошибки $\Delta D_{\text{общ}}(\lambda)$:

$$\Delta D_{\text{общ}}(\lambda) = D_{\text{общ прогр}}(\lambda) - D_{\text{общ изм}}(\lambda). \quad (12)$$

Полученное значение $\Delta D_{\text{общ}}(\lambda)$ учитывается для подстройки текущего спектра излучения СИД фитосветильника:

$$\Delta D_{\text{сид}}(\lambda) = \Delta D_{\text{общ изм}}(\lambda) + \Delta D_{\text{общ}}(\lambda). \quad (13)$$

Полученный спектр так же проходит проверку на ошибку. Использование дополнительного спектрометра позволит точно скомпенсировать эффект снижения интенсивности излучения светодиодов вследствие деградации полупроводниковых кристаллов. В случае $\Delta D_{\text{общ прогр}}(\lambda) = \Delta D_{\text{общ изм}}(\lambda)$ в пределах допуска осуществляется оценка динамики набора биомассы растений. Для конкретных условий освещения, температуры и влажности на основе методики оценки эффективности освещения может быть рассчитано оптимальное значение скорости прироста биомассы $\frac{dM_{\text{опт}}}{dt}$.

Цифровая камера осуществляет фотофиксацию исследуемых объектов с заданной периодичностью, после чего цифровое изображение отправляется в память ЭВМ. Либо оператор ЭВМ вручную вносит измеренные линейные размеры облучаемых листовых пластинок в программу обработки данных. После осуществляется обработка цифрового изображения и определение площади листовой поверхности. На основе методики оценки эффективности излучения для фотосинтеза происходит автоматическое вычисление скорости набора биомассы $\frac{dM_{изм}}{dt}$. Если выполняется условие $\frac{dM_{изм}}{dt} = \frac{dM_{опт}}{dt}$, то система не нуждается в корректировках и цикл может быть закончен. В противном случае происходит возврат в начало цикла.

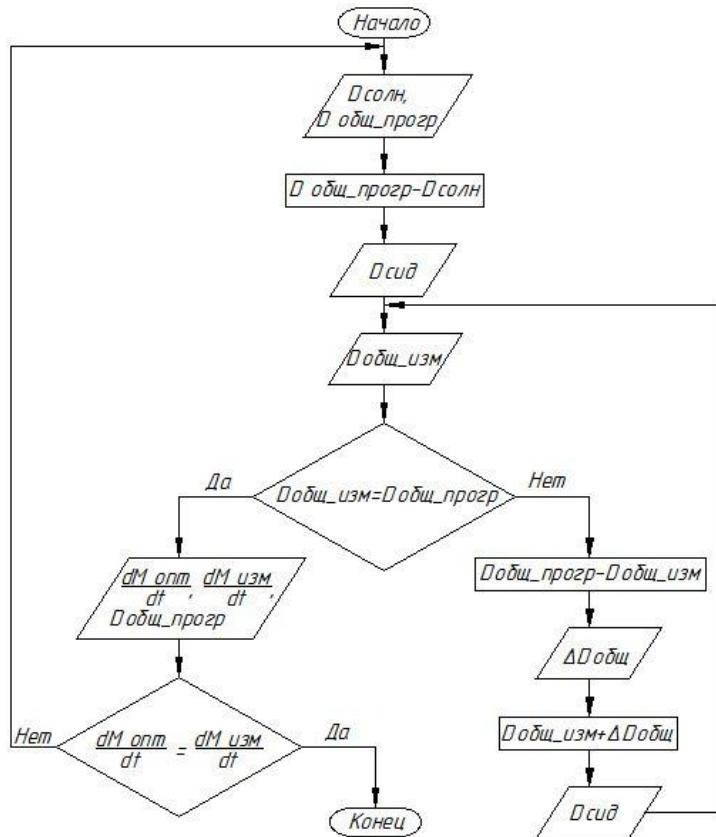


Рис.10. Алгоритм функционирования системы автоматического управления параметрами освещения

Приложение содержит результаты исследований, не вошедшие в основной объём диссертации.

В заключении приведены итоги теоретических и экспериментальных исследований, проведённых в настоящей работе, которые заключаются в следующем:

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Изучены спектральные характеристики органического вещества в диапазоне длин волн 400-700 нм. Интенсивность поглощения света органическим веществом (листовой пластинкой) изменяется в процессе роста, а длина волны характеристических максимумов и минимума остаётся практически неизменной. Экспериментальные результаты измерений подтверждают, что максимумы поглощения органического вещества находятся в синей области спектра (465 нм) и в красной (670 нм). Среднее значение поглощения составляет $1,00 \pm 0,00$ и $1,00 \pm 0,00$ для первой и второй семядоли соответственно. На других этапах роста среднее значение поглощения равно $0,99 \pm 0,00816$ и $0,994 \pm 0,00516$ для первого и второго листа соответственно. При минимуме поглощения в желтой области спектра (545 нм) среднее значение составляет $0,86 \pm 0,03055$ и $0,82 \pm 0,03944$ для первой и второй семядоли соответственно. На других этапах роста среднее значение

поглощения для первого и второго листа равно $0,649 \pm 0,07062$ и $0,761 \pm 0,07203$ соответственно. Для максимума поглощения при длине волны света 670 нм среднее значение равняется $1,00 \pm 0,00$ и $0,99 \pm 0,00$ для первой и второй семядоли соответственно. На других этапах роста среднее значение поглощения составило $0,956 \pm 0,04248$ и $0,974 \pm 0,01174$ для первого и второго листа соответственно.

2. Показана возможность использования модели транзистора для фоторецепторного белка CRY. Выходной сигнал (концентрация активных форм флавина FADH[•]) модулируется слабым управляющим воздействием (рН и АТФ), а также установлено соответствие другим родовым особенностям биполярных транзисторов. Зависимость фотовосстановления FAD* до FADH[•] от количества световой энергии и концентрации АТФ точно описывается логистической функцией.

3. На примере построенной впервые модели, состоящей из полупроводниковых приборов, показано распределение энергии поглощённого света (в области длин волн от 400 до 700 нм) фоточувствительной системой фоторецепторов PHOT, CRY, Ph(660), Ph(730).

4. Разработан метод оценки воздействия спектра излучения на фоточувствительные процессы в органическом веществе.

5. Впервые определённые значения эффективных потоков фотонов в спектре светодиодного светильника для фоточувствительных процессов, управляемых PHOT, CRY, Ph(660), Ph(730), составили $2 \text{ мкмоль/м}^2\text{с}$; $4 \text{ мкмоль/м}^2\text{с}$; $3,4 \text{ мкмоль/м}^2\text{с}$ и $0,6 \text{ мкмоль/м}^2\text{с}$ для первой семядоли, в спектре лампы ДНаТ – $0,9 \text{ мкмоль/м}^2\text{с}$; $11,4 \text{ мкмоль/м}^2\text{с}$; $13,4 \text{ мкмоль/м}^2\text{с}$ и $1,4 \text{ мкмоль/м}^2\text{с}$ для первой семядоли. Доказан факт того, что в процессе роста органического вещества (листовой пластинки) значения эффективных потоков фотонов для регуляторных процессов изменялись для обоих источников света.

6. Разработаны принципы функционирования системы автоматического управления спектральным составом и интенсивностью освещения с обратной связью по измеряемому параметру и предложен алгоритм функционирования системы автоматического управления параметрами освещения.

7. Рассчитанные спектры излучения светодиодных светильников могут обеспечить повышение эффективности функционирования теплиц в 1,5 раза по сравнению с известными вариантами.

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах

1. Супельняк С.И., Косушкин В.Г. О возможности использования модели транзистора для анализа и оптимизации процессов поглощения света «мягким» конденсированным веществом // Электромагнитные волны и электронные системы. 2019. Т. 24, № 6. С. 47-54. DOI: 10.18127/j15604128-201906-07 (0,5 п.л./0,3 п.л.)

2. Supelnyak S.I., Kosushkin V.G. Spectral Photoresponse of Biological Systems // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron

Techniques. 2019. Vol. 13, No. 3. P. 525-532. DOI: 10.1134/S1027451019010348 (0,5 п.л./0,27 п.л.).

3. Супельняк С.И., Косушкин В.Г., Адарчин С.А. Моделирование и разработка светодиодного адаптивного осветителя для растений // Электромагнитные волны и электронные системы. 2017. Т. 22, № 7. С. 21-27. (0,44 п.л./0,14 п.л.).

4. Супельняк С.И., Косушкин В.Г., Адарчин С.А. Спектрофотометрическое измерение спектра поглощения растений // Электромагнитные волны и электронные системы. 2017. Т. 22, № 8. С. 25-30. (0,38 п.л./0,16 п.л.).

5. Супельняк С.И., Косушкин В.Г. Численное моделирование и выбор СИД для фитосветильников // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2017. Т. 20, № 2. С. 115-121. DOI: 10.17073/1609-3577-2017-2-115-121 (0,94 п.л./0,4 п.л.).

6. Супельняк С.И., Косушкин В.Г. Методика оценки эффективности фотосинтеза в зависимости от состава и интенсивности света на примере *Cucumis sativus* L. // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). 2019. № 31-36. С. 86-96. DOI: 10.15518/isjaee.2018.31-36.086-096 (0,69 п.л./0,37 п.л.).

7. Разработка методики определения спектра поглощения биологических систем на примере растений / С.И. Супельняк [и др.] // Инженерный журнал: наука и инновации. Электронное научно-техническое издание (электронный журнал). 2014. № 12(36). DOI: 10.18698/2308-6033-2014-12-1290 (0,44 п.л./0,1 п.л.).

8. Моделирование и экспериментальное исследование спектра поглощения световой энергии растениями / С.И. Супельняк [и др.] // Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов: Труды XI Международной конференции. Курск, 2014. С. 45-50 (0,38 п.л./0,09 п.л.).

9. Spectral characteristics of plants in process of development / С.И. Супельняк [и др.] // Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов: Труды XII Международной научной конференции. Усть-Каменогорск, 2015. С. 227-229 (0,19 п.л./0,04 п.л.).

10. Моделирование процесса поглощения света и методика расчёта параметров светодиодов адаптивных фитосветильников / С.И. Супельняк [и др.] // Физика и технология наноматериалов и структур: Сборник научных статей 3-й Международной научно-практической конференции. Курск, 2017. С. 332-338 (0,44 п.л./0,11 п.л.).

11. Супельняк С.И., Косушкин В.Г. Исследование спектральной фоточувствительности биологических объектов // Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования): Труды XXVI Международной конференции. М., 2018. С. 363-377 (0,94 п.л./0,4 п.л.).

Супельняк Станислав Игоревич

ВЛИЯНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА И ИНТЕНСИВНОСТИ
ИЗЛУЧЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ НА ПАРАМЕТРЫ
ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА ОРГАНИЧЕСКИМ ВЕЩЕСТВОМ

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 18.11.2019 г. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 1.0.
Усл. печ. л. 0,93. Тираж 100 экз. Заказ № ____

Отпечатано в Редакционно-издательском отделе
Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана
248000, г. Калуга, ул. Баженова, 2.