

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДАТЧИКОВ ДЛЯ ФИТОМОНИТОРИНГА В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОЙ СВЕТОКУЛЬТУРЫ

Т. Э. Кулешова^{1, 2}, Н. Р. Галль¹, О. Р. Удалова², Г. Г. Панова²

¹ФГБУН Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
E-mail: www.piter.ru@bk.ru;

²ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»
195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14
E-mail: gaiane@inbox.ru

Поступила в редакцию 12 октября 2020 г., принята к печати 25 ноября 2020 г.

В работе представлены результаты тестирования разработанного неинвазивного комплекса датчиков для длительного автоматического мониторинга параметров окружающей растения среды (температуры, влажности, освещенности) и динамики состояния растительных организмов (показателей роста, биоэлектрических потенциалов прикорневой зоны, оптических параметров листьев) при выращивании растений в условиях интенсивной светокультуры. Применение многофункционального комплекса датчиков при выращивании растений в интенсивной светокультуре позволяет отслеживать динамику роста и развития растительных организмов, изучать влияние и оценивать оптимальность внешних условий для реализации продукционного потенциала растений, а также проводить корректировку технологии культивирования на основе полученных данных.

Ключевые слова: биоэлектrogenез, неинвазивные электроды, оптика листьев, конверсия света, Arduino.

MULTIFUNCTIONAL SENSOR COMPLEX FOR PHYTOMONITORING UNDER INTENSIVE PHOTOCULTURE CONDITIONS

T. E. Kuleshova^{1, 2}, N. R. Gall¹, O. R. Udalova², G. G. Panova²

¹Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences
26, Polytekhnicheskaya St., St. Petersburg, 194021
E-mail: www.piter.ru@bk.ru;

²Agrophysical Research Institute (ARI)
14, Grazhdanskiy pr., St. Petersburg, 195220
E-mail: gaiane@inbox.ru

The paper presents the results of testing the developed non-invasive complex of sensors for long-term automatic monitoring of the parameters of the plant's environment (temperature, humidity, illumination) and the dynamics of the plant state (growth indicators, bioelectric potentials of the root zone, optical parameters of leaves) when growing plants under conditions of intensive photoculture. The use of the multifunctional complex of sensors when growing plants in intensive photoculture makes it possible to track the dynamics of growth and development of plant organisms, to study the effect and assess the optimality of external conditions for realizing the production potential of plants, and also to adjust the cultivation technology based on the obtained data.

Key words: bioelectrogenesis, non-invasive electrodes, leaf optics, light conversion, Arduino.

ВВЕДЕНИЕ

Для повышения эффективности использования ресурсов (свет, CO₂, вода, электричество, удобрения) при выращивании растений в регулируемых условиях интенсивной светокультуры (тепличные комплексы, растительные фабрики и т. д.) необходимо осуществлять мониторинг параметров окружающей среды и функционального состояния растительных организмов (Kozai, 2018; Панова и др., 2020). При этом исходя из выявленных потребностей той или иной культуры можно проводить оптимизацию условий светового и воздушного режимов, а также корнеобитаемой среды растений, следствием чего будет получение стабильно высоких урожаев качественной растительной продукции.

Исследования физиологических процессов, происходящих в интактных растениях, с применением методов автоматической регистрации и созданием на их основе систем управления жизнедеятельностью растений были начаты В. Г. Кармановым в Агрофизическом научно-исследовательском институте (АФИ) еще в 50-х гг. XX в. (Карманов, 1959). На начальном этапе данное направление называлось «физиологический мониторинг», термин «фитомониторинг» был введен в 1987 г. В качестве основных физиологических показателей, поддающихся непрерывной автоматической регистрации, были предложены ксилемный поток, тургор и рост (Лялин и др., 1987). Например, для управления продолжительностью освещения был

выбран процесс транспирации – свет автоматически включался, как только транспирация начиналась в темноте, и выключался при достижении транспирацией на свету ночного уровня (Мелешенко, Карманов, 1966). При этом выявлена динамическая адаптация растений к чередованию периодов света и темноты, выражающаяся в опережающей реакции растения (изменение толщины листовой пластинки) на включение и выключение света (Карманов, Кочетов, 2014).

Основными принципами методики фитомониторинга являются непрерывность регистрации информации, безопасность для растения, сохранение условий внешней среды и синхронность получения информации о разных физиологических процессах (Карманов, 1969). Наиболее информативными и репрезентативными показателями являются не абсолютные значения регистрируемых параметров, а формы кривых, характеризующих их суточное изменение, а также многосуточные тренды изменений параметров (Плугатарь и др., 2015). Созданная в АФИ серия миниатюрных полупроводниковых высокочувствительных датчиков для фитомониторинга позволяет исследовать целый спектр ключевых физиологических и физико-химических процессов, происходящих в интактных растениях, и определять скорости ксилемных потоков в разных органах растений, изменение тургора органов, рост растений и нарастание биомассы, водный потенциал органов растений, концентрации элементов минерального питания, интенсивность фотосинтеза, дыхания и т. д.

В настоящее время широкое распространение получили цифровые технологии «умного сельского хозяйства», в том числе использование оптических критериев (индексов отражения), характеризующих особенности спектральных показателей посева при воздействии различных стрессоров (Якушев и др., 2020), интеллектуальные системы распознавания состояния растений на основе методов и средств компьютерного зрения (Шестакова и др., 2018), анализ цифровых изображений и алгоритмов распознавания объектов для выявления инфицированных растений, отслеживания динамики роста листы и степени зрелости плодов, прогнозирования продуктивности светокультур (Прошкин, Соколов, 2019), управление параметрами микроклимата с учетом состояния светопоглощающей системы растений (Басарыгина и др., 2017), исследование неоднородности микроклимата, влияющей на количественные и качественные характеристики растений (Ferentinos et al., 2017).

Наряду с изучением перечисленных характеристик весьма актуальным представляется исследование процессов биоэлектrogenеза и его природы. Известно, что метаболические реакции, протекающие в ходе поглощения корневой системой питательных элементов, способствуют возникновению электрического градиента потенциалов в корнеобитаемой среде (Железова, Самсонова, 2014). В свою очередь, состояние ризосферы (водный режим, транспорт ионов) оказывает воздействие на

транспирацию и оптические свойства листовой поверхности (Ильницкий, 2007).

Цель данной работы заключалась в разработке и тестировании многофункционального комплекса датчиков для одновременного мониторинга параметров окружающей среды и регистрации состояния растительных организмов (динамики поглощения света их надземной частью и электрогенеза в прикорневой зоне) *in vivo* в процессе развития.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Мониторинг параметров окружающей среды (температуры, влажности, освещенности), а также состояния растительных организмов осуществлялся с помощью разработанной системы неинвазивных датчиков и микроконтроллера. Измерительная установка (рис. 1) включает в себя: 1) емкость для выращивания и объект исследования; 2) систему электродов для регистрации биоэлектрических потенциалов (БЭП) по методике, описанной в работе (Кулешова и др., 2019); 3) источник света; 4) ультразвуковой датчик расстояния HC SR04; 5) датчик освещенности BH1750, расположенный под листовой поверхностью, для измерения пропускательной способности листа растения; 6) датчик DHT11 для измерения температуры и влажности воздуха; 7) аппаратную платформу Arduino Mega, построенную на микроконтроллере ATmega2560 и осуществляющую автоматическую регистрацию указанных параметров через каждые 15 минут (задается пользователем). Поглощение света А листьями определяется по формуле:

$$A = (k \cdot I - I_T) / I,$$

где k – коэффициент, учитывающий отражение от листа, определен в работе (Кулешова и др., 2020); I – интенсивность приходящего на лист светового потока; I_T – интенсивность прошедшего сквозь лист света, регистрируемая с помощью датчика освещенности BH1750.

Растения выращивались в лабораторном фитотроне в условиях искусственного освещения (Березкина и др., 2016) и на биополигоне АФИ в условиях интенсивной светокультуры (Панова и др., 2015).

Проведена серия экспериментов, направленных на решение следующих задач:

1. Определение степени корреляции величины генерируемого в прикорневой зоне электрического тока и интенсивности конверсии света путем изучения динамики поглощения света листьями растений и одновременной генерации в прикорневой зоне биоэлектрических потенциалов.

Для решения данной задачи был выбран модельный объект – хлорофитум хохлатый (*Chlorophytum comosum* (Thunb.) Jacques). Выбор объекта обусловлен оптическими свойствами его листьев (усвоенная энергия напрямую связана с нарастанием зеленой биомассы) и наличием развитой корневой системы, проявляющей электрические свойства уже на ранних стадиях развития (Tou et al., 2019). Источниками света служили светодиодные

лампы, излучающие теплый белый свет, продолжительность светового периода составляла 12 часов в сутки. В качестве корнеобитаемой среды использовался универсальный готовый питательный грунт Terra Vita (Россия), содержащий не менее 150 мг л⁻¹ азота (NH₄+NO₃), 270 мг л⁻¹ фосфора (P₂O₅) и 300 мг л⁻¹ калия (K₂O).

2. Исследование влияния световой среды на динамику поглощения света листьями, генерацию в прикорневой зоне биоэлектрических потенциалов и рост растений.

Для оценки влияния ИК-излучения и расположения источников света относительно растительной культуры на выбранные параметры использовались галогеновые лампы и ДНаТ, которые сравнивались со светодиодными лампами со схожим спектром в видимой области, но с отсутствием ИК-диапазона. Уровень облученности был нормирован и составлял 75 Вт м⁻² ФАР. В качестве объектов исследования были выбраны растения салата (сорт Азарт) и огурца (гибрид F₁ Нева) из коллекции ООО «Агроника» и селекционно-семеноводческой компании «Гавриш» соответственно.

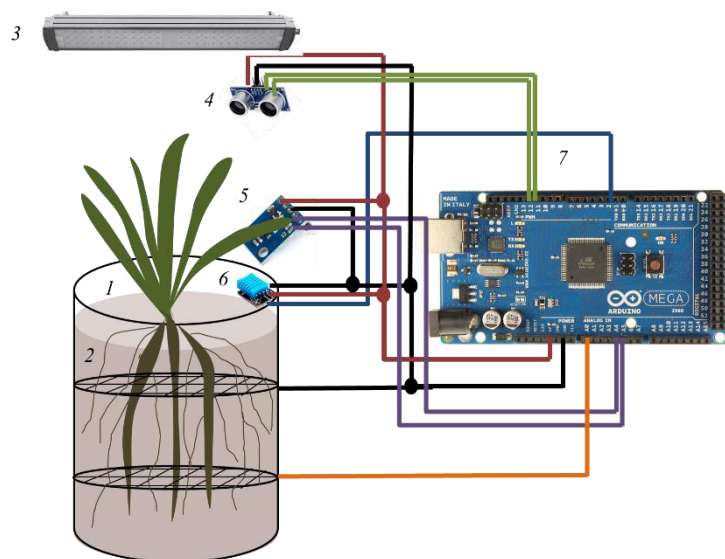


Рис. 1. Схематичное изображение экспериментальной установки и разводки выводов:

1 – исследуемый образец в емкости для выращивания; 2 – система электродов для измерения биопотенциалов прикорневой зоны; 3 – источник света; 4 – ультразвуковой датчик; 5 – датчик освещенности; 6 – датчик температуры и влажности; 7 – аппаратная платформа

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. Корреляция величины генерируемого в прикорневой зоне электрического тока и интенсивности конверсии света

На рис. 2 представлено сравнение выявленной в ходе фитомониторинга с помощью разработанного комплекса датчиков динамики пропускания света листьями хлорофитума и генерируемых в прикорневой зоне биоэлектрических потенциалов. Листья хлорофитума оптически плотные, величина коэффициента поглощения света лежит в пределах 0,6–0,7 – наблюдаемые незначительные изменения в процессе развития, по-видимому, связаны с тем, что хлорофитум как многолетнее растение имеет большую продолжительность жизни и более медленную скорость роста листовой пластины, чем, например, зеленые культуры, отличающиеся более динамичными изменениями поглощательной способности, как это

будет показано далее. Увеличение светопоглощательной способности (обратной пропускательной способности) листьев хлорофитума установлено на 7–8-й день развития, оно коррелирует с повышением БЭП. Также снижение величины бипотенциала связано с уменьшением пропускания света листьями хлорофитума.

Коэффициент корреляции БЭП и температуры воздуха составил 0,26, БЭП и влажности воздуха – 0,04. Значение коэффициента корреляции БЭП и поглощения света составило 0,76, что свидетельствует о тесной взаимосвязи и, по-видимому, о конверсии света листьями растений в электрический ток в ризосфере. Диаграмма рассеяния, отражающая зависимость интенсивности генерируемой в прикорневой зоне электрической энергии от мощности потребленной растением световой энергии (последовательность их расчета приведена в работе (Кулешова и др., 2020)), представлена на рис. 3.

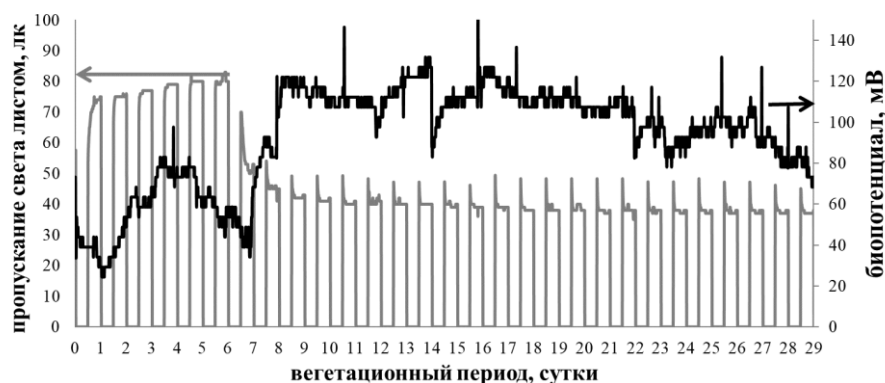


Рис. 2. Динамики пропускания света листовой поверхностью хлорофитума и биоэлектрических потенциалов в прикорневой зоне

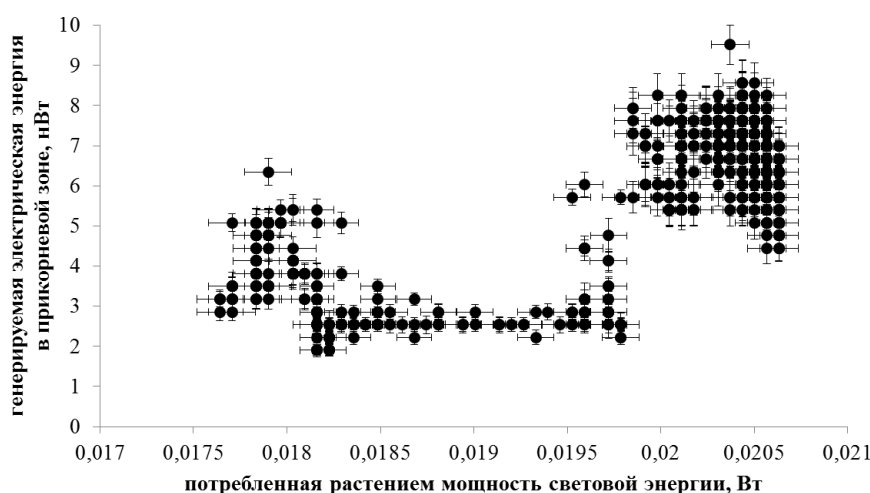


Рис. 3. Диаграмма рассеяния зависимости между динамикой поглощения света хлорофитумом и биопотенциалов ризосферы

2. Влияние световой среды на динамику поглощения света листьями растений и генерацию в прикорневой зоне биоэлектрических потенциалов.

Проведено сравнение влияния двух источников света – галогеновых и светодиодных ламп — на пропускательную способность листьев салата (*Lactuca sativa* L.) сорта Азарт, пропорциональную их оптической плотности, динамику биопотенциалов в прикорневой зоне и изменение параметров окружающей среды (рис. 4). Наличие ИК-излучения в спектре галогеновой лампы стало причиной повышения температуры (на $>10^{\circ}\text{C}$) и снижения влажности (на $\sim 10\%$) окружающего растения воздуха. С одной стороны, это обусловило более интенсивное поглощение света листьями (меньшую интенсивность пропускания), с другой – величина БЭП, генерируемых в прикорневой зоне, была ниже по сравнению с облучением светодиодными лампами. Неравномерное изменение пропускания света листьями связано с тем, что датчик освещенности был размещен в данном случае на поверхности почвогрунта, а не жестко закреплен под листовой пластиной. Таким образом можно наблюдать изменения, связанные с нарастанием верхних ярусов листьев и затенением фотодиода.

Изучено влияние двух источников света (ламп ДНаТ и светодиодного светильника) со схожими спектрами в видимой области, характеристики

которых представлены в работе (Кулешова и др., 2020), на пропускательную способность листьев огурца (при фиксированном размещении датчика освещенности под листовой пластиной), скорость роста, определяемую расстоянием между датчиком и объектом, и изменение параметров окружающей среды (рис. 5). В спектре излучения лампы ДНаТ, как и у галогенового источника, присутствует значительная доля ИК составляющей, что также приводит к повышению температуры воздуха во время работы лампы и большим перепадам, то есть более значительному снижению температуры и влажности по окончании светового периода по сравнению с облучением растений в процессе развития светодиодным светильником. Значительный разброс параметров внешней среды отражается на поглощательных свойствах листьев – под натриевым источником света динамика его поглощения листьями являлась более неравномерной, на 16–17-й день развития наблюдалось снижение поглощения, тогда как при светодиодном освещении отмечены стабильные значения. Кроме того, под лампами ДНаТ поглощение света листьями огурца являлось более низким. Скорость роста растений составила 0,2 см в день при светодиодном освещении и 0,5 см в день при освещении лампами ДНаТ. Как видно, под лампами ДНаТ растения огурца развивались быстрее.

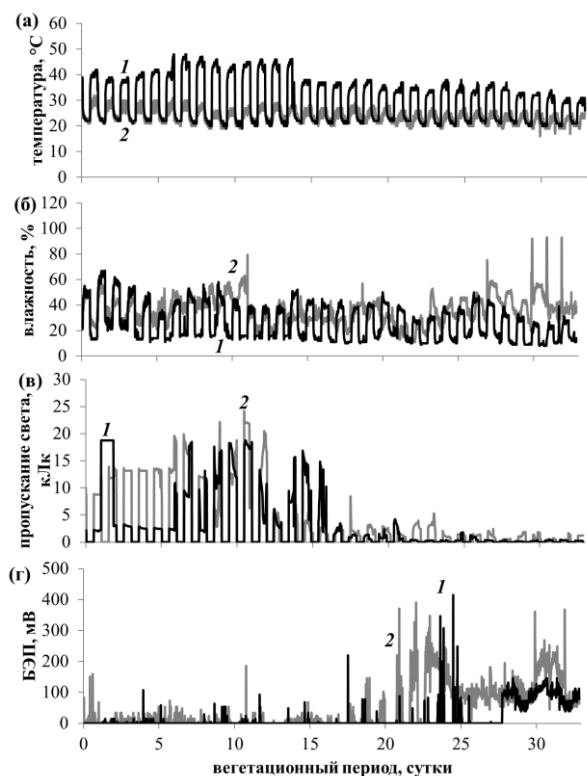


Рис. 4. Динамики температуры (а) и влажности (б) воздуха, пропускательной способности листьев салата (в) и биопотенциалов в прикорневой зоне (г) в процессе развития при облучении галогеновыми (1) и светодиодными (2) лампами

ВЫВОДЫ

Таким образом, проведена апробация разработанного метода мониторинга состояния растений и среды их обитания на примере ряда овощных культур (салат, огурец) в условиях вариации световой среды при полностью искусственном освещении.

С помощью разработанного многофункционального метода фитомониторинга выявлена корреляция изменений температуры и влажности воздуха с электрическими свойствами корневой системы и преобразованием световой энергии в условиях искусственного освещения. Экспериментально полученные зависимости позволяют сделать вывод о наличии связи между процессами поглощения энергии света листьями и генерации биоэлектрических потенциалов в ризосфере.

Установлено более выраженное положительное влияние на рост растений источников света с наличием ИК-составляющей по сравнению со светодиодными светильниками с той же интенсивностью излучения и схожим спектром в области ФАР, но с отсутствием ИК-диапазона. Однако при этом светодиодные светильники можно размещать в непосредственной близости от растений, в отличие от, например,

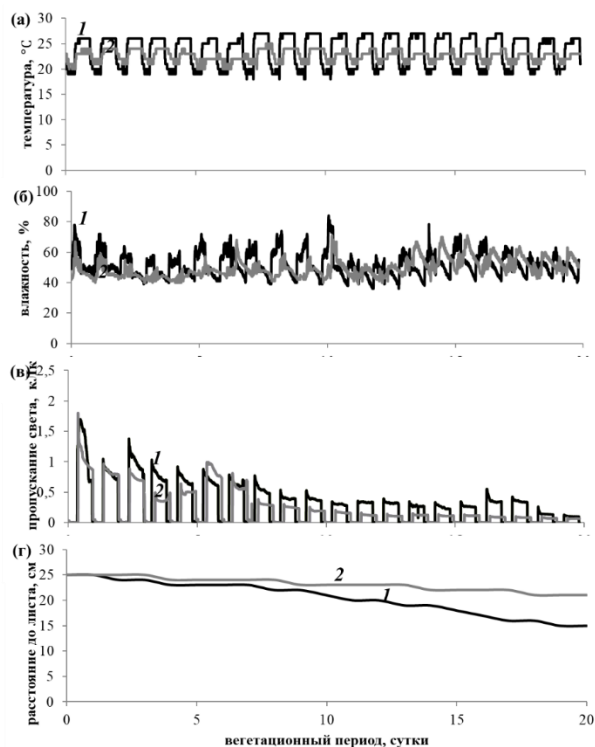


Рис. 5. Динамики температуры (а) и влажности (б) воздуха, пропускательной способности листьев огурца (в) и скорости роста (г) при облучении лампами ДНаТ (1) и светодиодными светильниками (2)

галогеновых ламп, что позволяет значительно уменьшить габариты фитокамер.

Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования систем фитомониторинга состояния растений и их потребностей в фотосинтетически активной радиации и минеральном питании.

Список литературы

- Басарыгина Е. М., Лицингер О. Г., Путилова Т. А. Измерительная система фитомониторинга // АПК России. 2017. Т. 24. № 5. С. 1141–1146.
- Березкина Т. Э., Блащенко М. Н., Кулешов Д. О., Галль Н. Р. Экспериментальный лабораторный фитотрон с программируемым светодиодным источником для изучения влияния длительности светового дня и спектра излучения на растения // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 6. С. 129–130.
- Железова С. В., Самсонова В. П. Пространственная неоднородность электрического сопротивления почвы и ее связь с урожайностью ячменя в полевом опыте Центра точного земледелия // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2014. № 6. С. 79–83.
- Ильницкий О. А., Радченко С. С., Лискер И. С., Палий И. Н., Радченко Н. С. Оптические свойства листьев растений в ближнем инфракрасном излучении в связи с их водным режимом // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. 2007. № 94. С. 55–60.
- Карманов В. Г. Использование микрорезисторной техники для получения информации о среде и жизнедеятельности растений // Вопросы экспериментальной биофизики и кибернетики растений. Труды АФИ. 1969. № 24. С. 5–10.
- Карманов В. Г. Приложение автоматики и кибернетики к растениеводству // ДАН СССР. 1959. Т. 128. № 1.
- Карманов И. В., Кочетов А. А. Динамическая реакция стевии (*Stevia Rebaudiana Bertoni* L.) на изменение фотопериода и влажности почвы // Агрофизика. 2014. № 3. С. 18–24.
- Кулешова Т. Э., Бушлякова А. В., Галль Н. Р. Неинвазивное измерение биоэлектрических потенциалов растений // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. № 5. С. 6–8.
- Кулешова Т. Э., Желнина А. И., Удалова О. Р., Панова Г. Г., Галль Н. Р. Динамика конверсии света листьями растений в электрический ток в прикорневой зоне // Актуальные вопросы биологической физики и химии. 2020. Т. 5. № 3. С. 379–385.
- Кулешова Т. Э., Черноусов И. Н., Удалова О. Р., Аникина Л. М., Хомяков Ю. В., Александров А. В., Середин И. С., Феофанов С. В., Щеглов С. А., Галль Н. Р., Панова Г. Г. Влияние спектральных особенностей световой среды на поглощение света листьями салата и его нетто-продуктивность // Биофизика. 2020. Т. 65. № 1. С. 112–124.
- Лялин О. О., Радченко С. С., Карманов В. Г. Проблемы фитомониторинга на современном этапе // Физические методы и средства получения информации в агромониторинге. Л.: АФИ, 1987. С. 30–35.
- Мелешенко С. Н., Карманов В. Г. Математическая модель водного обмена растения с учетом механизма положительной обратной связи // Биофизика. 1966. Т. 11. № 3–6. С. 731.
- Панова Г. Г., Черноусов И. Н., Удалова О. Р., Александров А. В., Карманов И. В., Аникина Л. М., Судаков В. Л., Якушев В. П. Научно-технические основы круглогодичного получения высоких урожаев качественной растительной продукции при искусственном освещении // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2015. № 4. С. 17–21.
- Панова Г. Г., Удалова О. Р., Канаш Е. В., Галушко А. С., Кочетов А. А., Прияткин Н. С., Архипов М. В., Черноусов И. Н. Основы физического моделирования «идеальных» агроэкосистем // Журнал технической физики. 2020. Т. 90. № 10. С. 1633–1639.
- Плутатарь Ю. В., Ильницкий О. А., Корсакова С. П., Паштецкий А. В. Экологический фитомониторинг: исторический экскурс, состояние и перспективы // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. 2015. № 114. С. 7–13.
- Прошкин Ю. А., Соколов А. В. Мониторинг состояния светокультур системами технического зрения // Инновации в сельском хозяйстве. 2019. № 2. С. 189–198.
- Шестакова Ю. А., Кирпичников А. П., Ляшева С. А., Шлеймович М. П. Интеллектуальная система распознавания состояния растений // Вестник Технологического Университета. 2018. Т. 21. № 10. С. 175–180.
- Якушев В. П., Петрушин А. Ф., Матвеев Д. А., Блохина С. Ю., Канаш Е. В., Якушев В. В. Новый метод количественной оценки внутриполевой изменчивости по оптическим характеристикам посевов для точного земледелия // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2020. № 2. С. 4–10.
- Ferentinos K.P., Katsoulas N., Tzounis A., Bartzanas T., Kittas C. Wireless sensor networks for greenhouse climate and plant condition assessment // *Biosystems Engineering*, 2017, no. 153, pp. 70–81.
- Kozai T. (ed.). *Smart Plant Factory: The next generation indoor vertical farms*. Springer, 2018.
- Tou I., Azri Y. M., Sadi M., Lounici H., Kebbouche-Gana S. Chlorophytum microbial fuel cell characterization // *International Journal of Green Energy*, 2019, v. 16, no. 12.

References

- Basarygina E. M., Licinger O. G., Putilova T. A. Izmeritel'naja sistema fitomonitoringa [Phytomonitoring measuring system] // *APK Rossii*, 2017, t. 24, no. 5, pp. 1141–1146.
- Berezkina T. E., Blashenkov M. N., Kuleshov D. O., Gall' N. R. Jeksperimental'nyj laboratornyj fitotron s programmiruемым svetodiodnym istochnikom dlja izuchenija vlijanija dlitel'nosti svetovogo dnja i spektra izluchenija na rastenija [Experimental laboratory phytotron with a programmable LED source to study the effect of daylight hours and radiation spectrum on plants] // *Pribory i tehnika jeksperimenta*, 2016, no. 6, pp. 129–130.

- Zhelezova S. V., Samsonova V. P. Prostranstvennaja neodnorodnost' jelektricheskogo soprotivlenija pochvy i ee svjaz' s urozhajnost'ju jachmenja v polevom opyte Centra tochnogo zemledelija [Spatial heterogeneity of the soil electrical resistance and its relationship with the yield of barley in the field experiment of the Center for precision agriculture] // *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2014, no. 6, pp. 79–83.
- Il'nickij O. A., Radchenko S. S., Lisker I. S., Palij I. N., Radchenko N. S. Opticheskie svojstva list'ev rastenij v blizhnem infrakrasnom izluchenii v svjazi s ih vodnym rezhimom [Optical properties of plant leaves in near infrared radiation in connection with their water regime] // *Bjulleten' Gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada*, 2007, no. 94, pp. 55–60.
- Karmanov V. G. Ispol'zovanie mikrorezistornoj tehniki dlja poluchenija informacii o srede i zhiznedejatel'nosti rastenij [Using microresistor technology to obtain information about the environment and life of plants] // *Voprosy jeksperimental'noj biofiziki i kibernetiki rastenij*, *Trudy AFI*, 1969, no. 24, pp. 5–10.
- Karmanov V. G. Prilozhenie avtomatiki i kibernetiki k rastenievodstvu [Application of automation and cybernetics to horticulture] // *DAN SSSR*, 1959, t. 128, no. 1.
- Karmanov I. V., Kochetov A. A. Dinamicheskaja reakcija stevii (*Stevia Rebaudiana Bertoni* L.) na izmenenie fotoperioda i vlazhnosti pochvy [Dynamic reaction of stevia (*Stevia Rebaudiana Bertoni* L.) to changes in photoperiod and soil moisture] // *Agrofizika*, 2014, no. 3, pp. 8–24.
- Kuleshova T. E., Bushljakova A. V., Gall' N. R. Neinvazivnoe izmerenie bioelektricheskikh potencialov rastenij [Noninvasive measurement of bioelectric potentials of plants] // *Pis'ma v ZhTF*, [Technical Physics Letters] 2019, t. 45, no. 5, pp. 6–8.
- Kuleshova T. E., Zhelnina A. I., Udalova O. R., Panova G. G., Gall' N. R. Dinamika konversii sveta list'jami rastenij v jelektricheskij tok v prikornevoj zone [Dynamics of the conversion of light by plant leaves into electric current in the root zone] // *Aktual'nye voprosy biologicheskoi fiziki i himii*, 2020, t. 5, no. 3, pp. 379–385.
- Kuleshova T. E., Chernousov I. N., Udalova O. R., Anikina L. M., Homjakov Ju. V., Aleksandrov A. V., Seredin I. S., Feofanov S. V., Shcheglov S. A., Gall' N. R., Panova G. G. Vlijanie spektral'nyh osobennostej svetovoj sredy na pogloshhenie sveta list'jami salata i ego netto-produktivnost' [The influence of the spectral properties of the lighting environment on light absorption by lettuce leaves and the net productivity of lettuce] // *Biofizika*, 2020, t. 65, no. 1, pp. 112–124.
- Ljalin O. O., Radchenko S. S., Karmanov V. G. Problemy fitomonitoringa na sovremennom jetape [Phytomonitoring problems at the present stage] // *Fizicheskie metody i sredstva poluchenija informacii v agromonitoringe*. Leningrad.: AFI, 1987, pp. 30–35.
- Meleshhenko S. N., Karmanov V. G. Matematicheskaja model' vodnogo obmena rastenija s uchetom mehanizma polozhitel'noj obratnoj svjazi [Mathematical model of water exchange in a plant taking into account the positive feedback mechanism] // *Biofizika*, 1966, t. 11, no. 3–6, pp. 731.
- Panova G. G., Chernousov I. N., Udalova O. R., Aleksandrov A. V., Karmanov I. V., Anikina L. M., Sudakov V. L., Jakushev V. P. Nauchno-tehnicheskie osnovy kruglogodichnogo poluchenija vysokih urozhav kachestvennoj rastitel'noj produkcii pri iskusstvennom osveshhenii [Scientific and technical foundations of year-round high yields of high-quality plant products under artificial lighting] // *Doklady Rossijskoj akademii sel'skohozjajstvennyh nauk*, 2015, no. 4, pp. 17–21.
- Panova G. G., Udalova O. R., Kanash E. V., Galushko A. S., Kochetov A. A., Prijatkin N. S., Arhipov M. V., Chernousov I. N. Osnovy fizicheskogo modelirovanija «ideal'nyh» agrojekosistem [Fundamentals of physical modeling of «ideal» agroecosystems] // *Zhurnal tehnicheckoj fiziki* [Technical Physics], 2020, t. 90, no. 10, pp. 1633–1639.
- Plugatar' Ju. V., Il'nickij O. A., Korsakova S. P., Pashtekij A. V. Jekologicheskij fitomonitoring: istoricheskij jekskurs, sostojanie i perspektivy [Ecological phytomonitoring: historical excursion, state and prospects] // *Bjulleten' Gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada*, 2015, no. 114, pp. 7–13.
- Proshkin Ju. A., Sokolov A. V. Monitoring sostojanija svetokul'tur sistemami tehnicheckogo zrenija [Monitoring the state of light cultures with technical vision systems] // *Innovacii v sel'skom hozjajstve*, 2019, no. 2, pp. 189–198.
- Shestakova Ju. A., Kirpichnikov A. P., Ljasheva S. A., Shlejmovich M. P. Intellekturnaja sistema raspoznavanija sostojanija rastenij [Intelligent plant condition recognition system] // *Vestnik Tehnologicheskogo Universiteta*, 2018, t. 21, no. 10, pp. 175–180.
- Jakushev V. P., Petrushin A. F., Matveenkov D. A., Blohina S. Ju., Kanash E. V., Jakushev V. V. Novyj metod kolichestvennoj ocenki vnutripolevoj izmenchivosti po opticheskim harakteristikam posevov dlja tochnogo zemledelija [A new method for quantifying intra-field variability by optical characteristics of crops for precision farming] // *Vestnik rossijskoj sel'skohozjajstvennoj nauki*, 2020, no. 2, pp. 4–10.
- Ferentinos K. P., Katsoulas N., Tzounis A., Bartzanas T., Kittas C. Wireless sensor networks for greenhouse climate and plant condition assessment // *Biosystems Engineering*, 2017, no. 153, pp. 70–81.
- Kozai T. (ed.). *Smart Plant Factory: The next generation indoor vertical farms*. Springer, 2018.
- Tou I., Azri Y. M., Sadi M., Lounici H., Kebbouche-Gana S. Chlorophytum microbial fuel cell characterization // *International Journal of Green Energy*, 2019, v. 16, no. 12.