

14.8

Основы физического моделирования „идеальных“ агроэкосистем

© Г.Г. Панова, О.Р. Удалова, Е.В. Канаш, А.С. Галушко, А.А. Кочетов, Н.С. Прияткин, М.В. Архипов, И.Н. Черноусов

Агрофизический научно-исследовательский институт,
195220 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: gaiane@inbox.ru

Поступило в Редакцию 27 декабря 2019 г.
В окончательной редакции 25 февраля 2020 г.
Принято к публикации 3 марта 2020 г.

Представлены научно-технические основы физического моделирования „идеальных агроэкосистем“, характеризующихся высокой степенью управляемости потоками вещества и энергии между окружающей средой и растениями с сопутствующей биотой, где становится возможным в максимальной степени раскрыть генетически обусловленный потенциал любой сельскохозяйственной культуры, создать экологически гармоничные оптимизированные высокоэффективные комплексы микроклимат–сорт (гибрид)–технология для получения стабильно высоких урожаев качественной растительной продукции. Показано, что создание таких агроэкосистем возможно при комплексном решении задач: оптимизации условий световой, воздушной и корнеобитаемой среды обитания в соответствии с потребностями той или иной культуры; создания или подбора гибридов и сортов, дающих высокие урожаи качественной растительной продукции в условиях регулируемой агроэкосистемы; контроля физиологического состояния растений и обнаружения стресса на ранних этапах его возникновения с помощью неинвазивных физических методов; использования качественного посевного материала по результатам неповреждающей экспресс-оценки внутренних дефектов методом рентгенографии в сочетании с морфометрическим анализом; разработки и применения высокоэффективных экологически безопасных регуляторов роста и метаболизма растений.

Ключевые слова: физическое моделирование, „идеальная“ агроэкосистема, вегетационно-облучательное оборудование, агроботехнологии, физические методы контроля, генетико-селекционные технологии, высокопродуктивные растения.

DOI: 10.21883/JTF.2020.10.49792.429-19

Введение

Эффективное управление продукционным процессом растений, обеспечивающее максимальную реализацию генетически обусловленного потенциала продуктивности, становится возможным при поддержании в оптимальных диапазонах значений условий среды их обитания и антропогенных факторов воздействия [1].

Разработка системы многомерной оптимизации условий жизнеобеспечения растений и агротехнологий их культивирования с учетом физиологических особенностей сортов и гибридов является приоритетной фундаментальной научно-исследовательской задачей, выполнение которой осуществимо только в условиях регулируемой агроэкосистемы (РАЭС) [2], где физическое моделирование почвенно-растительных систем и процессов в сочетании с возможностями круглогодичного интенсивного выращивания растений при широком варьировании свето-температурных условий, эдафических факторов является основой для получения знаний об особенностях продукционного процесса растений и о механизмах их взаимодействия со средой обитания. Научные основы данного направления заложены при создании Агрофизического научно-исследовательского института в 1932 году академиками А.Ф. Иоффе, Н.И. Вавиловым и в дальнейшем развиты В.П. Мальчевским,

членом-корреспондентом ВАСХНИЛ Б.С. Мошковым и академиком РАСХН Е.И. Ермаковым. Именно в РАЭС, характеризующейся высокой степенью управляемости потоками вещества и энергии между окружающей средой и растениями с сопутствующей биотой, становится возможным в максимальной степени раскрыть генетически обусловленный потенциал той или иной сельскохозяйственной культуры и создать экологически гармоничные оптимизированные высокоэффективные комплексы микроклимат–сорт (гибрид)–технология для получения стабильно высоких урожаев качественной растительной продукции. Опубликованные к настоящему времени результаты исследований в нашей стране и за рубежом касаются изучения вопросов оптимизации одной из сред (световой, корнеобитаемой или воздушной) для роста, развития растений, реализации их продукционного потенциала [3–5]. Так, в литературе подчеркивается, что вопросы оптимизации спектра и интенсивности фотосинтетически активной радиации (ФАР) в продукционном процессе растений на разных этапах их вегетации, изучения возможностей использования света разного спектрального состава в организации направленного биосинтеза биологически ценных соединений различного назначения остаются малоизученными и весьма актуальными. При этом важным аспектом исследований является поиск и обоснование возможности снижения

затрат электроэнергии на единицу производимой продукции, которые при реализации интенсивной светокультуры составляют более 40% [6–12].

Вопросы оптимизации состава и свойств корнеобитаемой среды растений в условиях защищенного грунта, так же как и световой среды, остаются нерешенными, так как это многокомпонентная задача с несколькими переменными, зависящими от задаваемых условий и продукционного, адаптационного потенциала выращиваемого сорта или гибрида овощной культуры. На сегодняшний день существуют более 1000 составов питательных растворов для выращивания растений, несколько систем культивирования растений и методов обеспечения корневых систем элементами питания. Каждый имеет свои достоинства и недостатки [2]. Выбор того или иного способа формирования корнеобитаемой среды часто в большей степени определяется экономической целесообразностью. Если селекция овощных культур ведется исходя из наиболее экономичной технологии производства, то продукция по вкусовым характеристикам и биохимическому составу существенно отличается в худшую сторону по отношению к овощным культурам, производимым в открытом грунте в южных регионах.

В связи с этим исследования, направленные на решение вопросов многомерной оптимизации среды обитания растений и технологий их выращивания для производства высоких урожаев качественной растительной продукции, являются весьма актуальными. Результаты таких исследований позволят в условиях защищенного грунта заметно снизить себестоимость единицы продукции. Культивирование растений в условиях многомерной оптимизации среды их обитания в течение вегетации — достаточно трудоемкое, но перспективное направление, поскольку только таким образом, увеличивая КПД продукционного процесса растений, можно обеспечить не только круглогодичное получение высококачественной свежей растительной продукции в любых климатических условиях, но и высокую рентабельность ее промышленного производства. Конструирование „идеальной“ агроэкосистемы с оптимизируемой средой обитания и адаптированными к условиям выращивания высокопродуктивными сельскохозяйственными культурами в ФГБНУ АФИ достигается посредством научно-обоснованных:

1) оптимизации условий световой, воздушной и корнеобитаемой среды обитания в соответствии с потребностями той или иной культуры;

2) создания или подбора гибридов и сортов, дающих высокие урожаи качественной растительной продукции в условиях РАЭС;

3) контроля физиологического состояния растений и обнаружения стресса на ранних этапах его возникновения с помощью метода спектроскопии отраженной от поверхности листьев радиации;

4) использования качественного посевного материала по результатам неинвазивной и неповреждающей экспресс-оценки с применением метода рентгенографии;

5) разработки и применения высокоэффективных экологически безопасных регуляторов роста и метаболизма растений.

Цель настоящей работы — охарактеризовать научно-технические основы создания „идеальных“ агроэкосистем с высокой степенью управляемости потоками вещества и энергии между окружающей средой и растениями с сопутствующей биотой, обеспечивающих максимально возможную реализацию генетически обусловленного потенциала сельскохозяйственной культуры.

1. Материалы и методы

Исследования проводили на биополигоне ФГБНУ АФИ с регулируемыми условиями микроклимата. Для выращивания растений использовали оригинальные опытные образцы вегетационных светостановок (ВСУ), включая ризотронную технику [13–16]. Объектом исследований являлся широкий спектр сортов и гибридов сельскохозяйственных культур. Растения выращивали в серии вегетационных экспериментов при варьировании условий световой, корнеобитаемой и воздушной среды. Для оценки качественных характеристик семенного материала и физиологического состояния вегетирующих растений, изменений биологических и химических свойств почв, почвозаменителей, особенностей поведения сопутствующих растениям микроорганизмов использовали физические методы экспресс-диагностики (рентгенографические, спектрофотометрические), а также стандартные, общепринятые химические и микробиологические методы [17–20].

2. Результаты исследований

На основе обобщения и оценки результатов исследований особенностей продукционного процесса овощных культур в моделируемых условиях световой, корнеобитаемой и воздушной сред разработаны оптимизированные технологии круглогодичного выращивания растений на тонкослойных или малообъемных аналогах почв в регулируемых по параметрам микроклимата помещениях при полностью искусственном освещении, позволяющие получать стабильно высокие урожаи свежей овощной продукции высокого качества при максимально возможном снижении затрат ресурсов и энергии (более чем в дв. раза) на ее производство и обеспечения условия его безотходности. Технологии включают использование оригинального вегетационно-облучательного оборудования различного типа (одно- и многоярусные вегетационные светостановки с горизонтальным или вертикальным размещением светильников), методы и приемы организации в нем световой и корнеобитаемой среды, агротехнологические способы и средства культивирования растений и воздействия на их продукционный процесс, созданный нами реестр адаптированных к условиям выращивания в РАЭС высокопродуктивных



Рис. 1. Вегетационные светоустановки на биополигоне ФГБНУ АФИ со светодиодными светильниками, усовершенствованными по спектральному составу.

Таблица 1. Показатели продуктивности салата при выращивании на тонкослойном аналоге почвы под разными источниками света

Источники света	Число листьев, штук/растение	Площадь листьев, cm^2 /растение	Урожай	
			g/m^2	% от контроля
Лампы ДНаЗ (эталон)	13.8 ± 2.0	3110.0 ± 410.0	4370.0 ± 390.0	100
Светодиодный светильник с усовершенствованным спектральным составом	13.6 ± 32.5	2810.3 ± 515.5	3880.0 ± 260.2	89

Таблица 2. Показатели продуктивности томата при выращивании на тонкослойном аналоге почвы под разными источниками света

Источники света	Число плодов, штук на растение	Масса плодов, $\text{g}/\text{растение}$	Масса 1-го плода, g	Урожай плодов	
				kg/m^2	% от контроля
Лампы ДНаЗ	48.0 ± 6.0	340.8 ± 66.611	7.1 ± 0.5	8.5 ± 1.8	100
Светодиодный светильник с усовершенствованным спектральным составом	43.6 ± 5.0	415.2 ± 82.4	$9.5 \pm 0.9^*$	10.3 ± 1.3	121

Примечание. * — значение достоверно отличается от контрольного на 5%-ном уровне значимости.

и скороспелых сортов и гибридов овощных культур, методы экспресс-оценки качества семенного материала перед посевом [13-16,21-24]. Технологии предназначены для реализации в культивационных сооружениях, оснащенных микроклиматическим оборудованием и системами его регуляции. Исследование влияния спектрального состава света на продуктивность овощных культур (листовой салат, томат, огурец) позволило установить, что различия в реакции растений могут быть связаны с их особенностями поглощения световой энергии от источников света, что наиболее выражено в диапазонах спектра 425–475 и 615–685 nm. По результатам исследований определен оптимальный спектральный состав света для листовых, листостебельных, а также

для плодовоовощных культур (рис. 1), реализованный в изготовленных световых устройствах на основе светодиодов (ноу-хау). Сравнительные испытания созданных светодиодных светильников, судя по показателям роста, развития, продуктивности основных сельскохозяйственных культур и качеству формируемой растительной продукции, показали сходство их влияния на растения с таковым у широко используемых в растениеводстве защищенного грунта промышленных газоразрядных натриевых ламп с достаточно высоким КПД в области ФАР (табл. 1, 2). При этом вследствие более высокого КПД в области ФАР у разработанных светодиодных светильников затраты электроэнергии на единицу получаемой растительной продукции были на 20–25% ниже

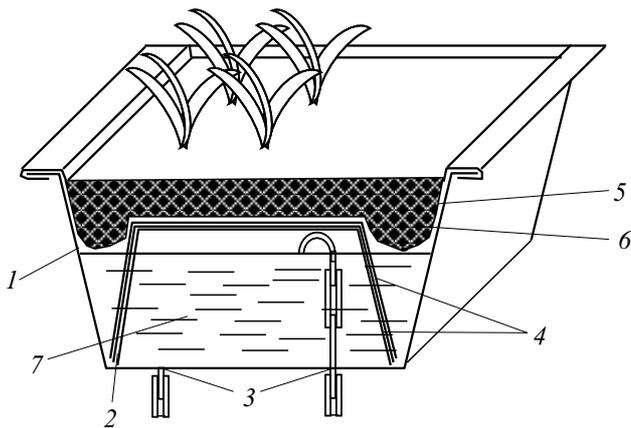


Рис. 2. Упрощенная схема устройства для выращивания растений на малообъемном аналоге почвы (МАП): 1 — лоток; 2 — подставка; 3 — сливные патрубки; 4 — синтетические ткани; 5 — плотная синтетическая ткань; 6 — почвозаменитель; 7 — питательный раствор.

по сравнению с таковыми при использовании ламп ДНаЗ-400. Несмотря на то что созданные светодиодные светильники в 4 раза выше по стоимости, чем светильники на основе ламп ДНаЗ или ДНаТ, обеспечивающие такую же мощность светового потока в области ФАР, имеющиеся возможности варьирования мощности светового потока и его спектрального состава на протяжении онтогенеза растений, а также совершенствование производства технической составляющей светодиодных светильников, позволят в обозримом будущем снизить разницу в стоимости между указанными светильниками и создавать существенно более эффективные источники света с легко управляемым световым потоком, оптимизированным под выращиваемые сельскохозяйственные культуры.

При разработке корнеобитаемых сред для выращивания растений методом малообъемной панопоники [2] (рис. 2) определены составы субстратов, питательных растворов, а также способы и режимы их подачи к корневым системам растений, при которых более полно реализуется продукционный потенциал выращиваемых культур. Разработка метода культивирования растений на тонкослойном аналоге почвы (ТАП) включала использование суспензии (ноу-хау) кембрийской глины, сапропеля, гидрофильной ткани типа лавсан, питательного раствора [21]. Схематически устройство для выращивания растений на ТАП изображено на рис. 3.

Подачу питательного раствора осуществляли автоматически от 1 до 3 раз в сутки в зависимости от возраста растений. Сравнительные агробиологические испытания способа культивирования на ТАП и малообъемном аналоге почвы (МАП) показали сходный результат по показателям роста, продуктивности и качеству растительной продукции. При этом в отличие от способа культивирования растений на МАП выращивание их на ТАП не требовало последующей операции по биокомпостированию

субстрата, так как тонкий слой аналога почвы расходовался почти полностью на протяжении вегетационного периода, а ткани имели многократное использование. Выращивание растений на ТАП было более управляемым и прогнозируемым в связи с отсутствием влияния особенностей состава субстрата на основе природных компонентов. Полученные положительные результаты влияния на растения, а также технологическая простота и экономическая целесообразность позволили рекомендовать использование ТАП для выращивания овощных культур в культивационных сооружениях защищенного грунта и, в частности, в фитотехкомплексах.

Изучено влияние параметров воздушной среды (температура воздуха в световой и ночной период) на продукционный процесс основных овощных культур при их выращивании по разработанным технологиям малообъемной и тонкослойной панопоники при искусственном освещении, и выявлены оптимальные сочетания их значений [25].

Безотходность технологии производства растительной продукции обеспечивается применением экологически безопасных способов био конверсии и биокомпостирования растительных остатков, субстратов с помощью выделенных нами из проб компоста и с поверхности растений микроорганизмов с высокой активностью целлюлолитических ферментов гидролитического и/или оксигеназного типа. Впервые исследована динамика активности открытых в 2010–2011 гг. новых ферментов — монооксигеназных целлюлаз [26] — в смесях растительных остатков и отработанных субстратов на протяжении их биокомпостирования [27]. Обоснована гипотеза о том, что уменьшение активности указанных ферментов связано с постепенным истощением компостных смесей по

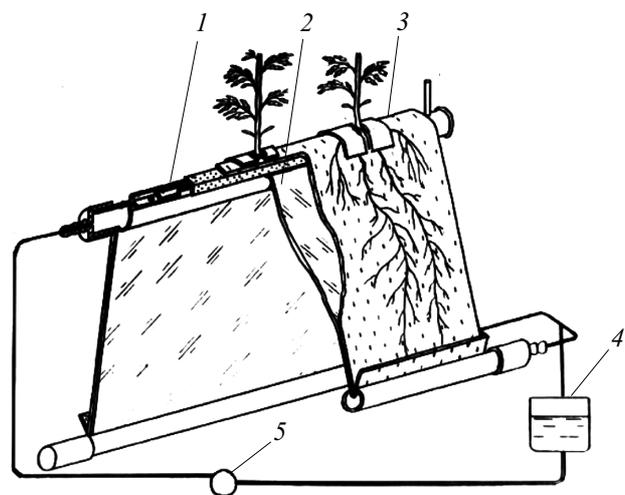


Рис. 3. Упрощенная схема устройства для выращивания растений на тонкослойном аналоге почвы (ТАП): 1 — распределитель питательного раствора; 2 — полимерная наклонная подложка; 3 — пористый почвенный аналог с корнями растений; 4 — резервуар с питательным раствором; 5 — насос.

Таблица 3. Урожайность основных овощных культур и качество растительной продукции в современных промышленных теплицах с искусственной досветкой и в вегетационных светоустановках биополигона ФГБНУ АФИ

Культура	Промышленные тепличные комплексы** (эталон)		Биополигон ФГБНУ АФИ		ПДК*** на нитраты в растениях, mg/kg сырой массы
	Урожайность, kg/m ² в год	Содержание нитратов, mg/kg сырой массы*** / % от эталона	Урожай за год, kg сырой массы/m ²	Содержание нитратов, mg/kg сырой массы*** / % от эталона	
Томат	70–85 (стебель — 4 метра)	40–420/100	80–100 (1 ярус установки, стебель — 0,50 м) 40–60 (1 ярус установки, стебель — 0,25 м)	20–140*/35*	300
Огурец	90–135 (стебель — 4 метра)	100–300/100	90–150 (стебель — 2 метра)	60–120*/45*	400
Салат	46–50	1800–4700/100	70–90 (1 ярус установки)	1200–1400*/40*	2000

Примечание. * — значение достоверно отличается от контрольного на 5%-ном уровне значимости; ** — по данным публикаций: [39–41] и др.); *** — по данным публикаций [42–44].

показателю микроэлементов, в частности, необходимых для работы оксигеназ соединений меди.

На основе результатов экспериментальных испытаний создан банк данных по наиболее адаптированным к условиям интенсивной светокультуры сортам и гибридам овощных культур. Разработана оригинальная селекционная методология получения новых форм сельскохозяйственных культур с прогнозируемым комплексом хозяйственно-ценных признаков, базирующаяся на теории эколого-генетической организации количественных признаков (ТЭГОКП) и методах изучения взаимодействия генотип-среда в регулируемой агроэкосистеме [28]. Она реализована при селекции ультраскороспелых линий мягкой пшеницы и при интродукции дайкона в Север-Западный регион России. Разработана стратегия создания новых линий редиса, адаптированных для выращивания в светокультуре, получены новые его формы и показано в агробиологических испытаниях их превосходство на 40–70% по продуктивности над лучшими из родительских сортов при сочетании с высокой устойчивостью к стеблеванию, скороспелостью (23–25 суток) и товарностью [29].

Для оперативного управления состоянием растений и улучшения качественных характеристик получаемой растительной продукции нами разработаны и испытаны новые высокоэффективные и экологически безопасные композиции различного типа: на основе микробных экзометаболитов; на основе наноматериалов производных фуллеренов и кремнезольных наноструктур; на основе вытяжек из растительного сырья (сухой лист стевии (*Stevia rebaudiana* Bertoni)) с высоким содержанием полезных для здоровья человека ингредиентов; усовершенствованы составы хелатных микроудобрений на основе природных материалов: торф, сапрпель и др. Выявлен

ряд механизмов положительного воздействия биологически активных композиций на почвенно-растительный комплекс в регулируемых и полевых условиях [30–32]. Результаты успешных испытаний свидетельствуют о перспективе создания на основе созданных композиций новых форм полифункциональных препаратов и технологий их применения в АПК.

Разработаны и апробированы усовершенствованные физические методы экспресс-оценки качественных характеристик семенного материала и диагностики физиологического состояния растений по спектральным характеристикам их листьев [33,34]. На основе комплексного интроскопического исследования качества семян основных овощных культур, сформированных в условиях открытого и защищенного грунта, создан банк данных их рентгенограмм и разработаны методические указания по рентгенографическому анализу качества семян овощных культур [20,35,36]. Получены новые знания о пролонгированном влиянии дефицита минерального питания на физиологическое состояние зерновых культур, их урожайность и качество семенного материала, которые при проведении агротехнологических мероприятий позволяют эффективно учитывать сортовые особенности растений, отзывчивость на внесение удобрений и с более высокой точностью рассчитывать дозы удобрений для оптимизации производственного процесса [37,38].

Использование указанных разработок коллектива ФГБНУ АФИ в области светокультуры растений обеспечивает высокую продуктивность овощных и других культур при сокращении сроков вегетации и свидетельствует о возможности при внедрении разработанных агротехнологий повысить урожайность выращиваемых культур на 20–45% и более при снижении в 2–10 раз расходов на ресурсы, затрачиваемые на единицу продук-

ции, по сравнению с таковыми в современных отечественных и зарубежных тепличных комплексах (табл. 3). С учетом многоярусности вегетационных светоустановок и использования полезной площади по всему объему производственного помещения потенциальный урожай с квадратного метра может быть выше указанных величин в число раз, определяемое количеством ярусов или высотой формирования плети длинностебельных растений. Например, с полезного объема помещений высотой 4 метра, занятого растениями, можно получить за год: томат — 4 урожая по 300–350 kg/m²; огурец — 6 урожаев по 180–300 kg/m², редис — 15 урожаев по 500–600 kg/m², зеленные культуры — 12–17 урожаев по 320–720 kg/m². Значения урожайности превышают в 2–4 раза у плодовоовощных культур, в 6–14 раз у редиса и зеленных культур таковые в современных промышленных тепличных комплексах с регулируемым микроклиматом и досветкой искусственным светом [25,39–41]. При этом себестоимость производимой продукции составит: томат — 250 RUB/kg; огурец — 55 RUB/kg; редис — 125 RUB/kg; зеленные культуры — 145 RUB/kg. Получаемая овощная продукция имеет высокие качественные показатели по содержанию витаминов, минеральных элементов и другим характеристикам пищевой ценности. По качеству она соответствует требованиям санитарно-гигиенических нормативов Российской Федерации и может быть рекомендована для детей, учащихся, людей с ослабленным иммунитетом и подорванным здоровьем. Содержание нитратов в ней значительно ниже установленных санитарных норм, полностью отсутствуют пестициды и другие загрязнители [42–44].

Полученные знания об особенностях производственного процесса различных сортов и гибридов сельскохозяйственных культур при их культивировании в моделируемых условиях среды обитания и при агротехнологических воздействиях позволили нам разработать эффективные и экологически безопасные технологии, методы и средства, обеспечивающие оптимизацию световой, корнеобитаемой, воздушной сред и реализацию производственного потенциала, а следовательно получение высоких урожаев качественной растительной продукции при снижении затрат ресурсов и энергии на ее производство.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального бюджетного государственного научного учреждения „Агрофизический научно-исследовательский институт“ из средств Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы, этап № 0667-2019-0013.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Вершинин П.В., Мельникова М.К., Мичурин Б.Н., Мошков Б.С., Поясов Н.П., Чудновский А.Ф. Основы агрофизики / Под ред. А.Ф. Иоффе, И.Б. Ревута. М.: Физматлит, 1959. 910 с.
- [2] Ермаков Е.И. Избранные труды. СПб.: Изд-во ПИЯФ РАН, 2009. 192 с.
- [3] Черноусов И.Н. К вопросу о прецизионном растениеводстве. В кн. Тенденции развития агрофизики в условиях изменяющегося климата. Мат. Межд. конф. (СПб, 20–21 сент. 2012 г.), 2012. С. 139–143.
- [4] Avercheva O.V., Bassarskaya E.M., Kochetova G.V., Zhigalova T.V., Berkovich Y.A., Konovalova I.O., Radchenko S.G., Lapach S.N., Yakovleva O.S., Tarakanov I.G. // Life Sciences in Space Research. 2016. Vol. 11. P. 29–42. DOI: 10.1016/j.lssr.2016.12.001
- [5] Коновалова И.О., Беркович Ю.А., Ерохин А.Н., Смолянина С.О., Яковлева О.С., Знаменский А.И., Тараканов И.Г., Радченко С.Г., Лапач С.Н. // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2016. Т. 50. № 4. С.35–41. DOI: 10.21687/0233-528X-2016-50-4-35-41
- [6] Тихомиров А.А., Лисовский Г.М., Сидько Ф.Я. Спектральный состав света и продуктивность растений. Новосибирск: Наука, 1991. 168 с.
- [7] Tamulaitis G., Duchovskis P., Bliznikas Z., Brazaityte A., Novickovas A., Zukauskas A. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. Vol. 38. P. 3182–3187. DOI: 10.1088/0022-3727/38/17/S20
- [8] Liu W. // Agrotechnology. 2012. Vol. 1. N 1. DOI: 10.4172/2168-9881.1000101 Liu
- [9] Darko E., Heydarizadeh P., Schoefs B., Sabzalian M.R. // Phil. Trans. R. Soc. B. 2014. Vol. 369. P. 20130243. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2013.0243>
- [10] Ouzounis T., Rosenqvist E., Ottosen C.-O. // Hortscience. 2015. Vol. 50. N 8. P. 1128–1135. DOI: 10.21273/HORTSCI.50.8.1128
- [11] Cocetta G., Casciani D., Bulgari R., Musante F., Kolton A., Rossi M., Ferrante A. // Eur. Phys. J. Plus. 2017. Vol. 132. P. 43. <https://doi.org/10.1140/epjp/i2017-11298-x>
- [12] Чуб В.В., Миронова О.Ю., Морозов Я.А., Волков А.В. // Спецвыпуск „Фотон-экспресс-наука 2019“. 2019. № 6. DOI: 10.24411/2308-6920-2019-16029
- [13] Панова Г.Г., Черноусов И.Н., Удалова О.Р., Александров А.В., Карманов И.В., Аникина Л.М., Судаков В.Л., Якушев В.П. // Доклады РАСХН. 2015. № 4. С. 17–21.
- [14] Пат. РФ на полезную модель № РФ № 142236. „Многоярусное устройство для выращивания растений“ / Черноусов И.Н., Александров А.В., Панова Г.Г. 2014. Бюл. № 17.
- [15] Пат. РФ на полезную модель № 137446 „Устройство для выращивания растений“ / Панова Г.Г., Черноусов И.Н., Александров А.В., Желтов Ю.И. 2014. Бюл. № 5.
- [16] Пат. РФ на полезную модель № 108705 „Устройство для выращивания растений“ / Желтов Ю.И., Панова Г.Г., 2011. Бюл. № 27.
- [17] Якушев В.П., Канаши Е.В., Осипов Ю.А., Якушев В.В., Лекомцев П.В., Воронаев В.В. // Сельскохозяйственная биология. 2010. № 3. С. 94–101.

- [18] Yakushev V., Kanash E., Rusakov D., Blokhina S. // Adv. Animal Biosciences: Precision Agriculture (ЕСРА). 2017. Vol. 8. N 2. P. 229–232. DOI: 10.1017/S204047001700053X
- [19] Методика анализа семян. Н. 1995. 399 с.
- [20] Архипов М.В., Потрахов Н.Н., Прияткин Н.С., Гусакова Л.П., Шукина П.А., Борисова Н.Р. Неинвазивные технологии экспресс-оценки и отбора биологически полноценных семян для выращивания растительной продукции в вегетационно-облучательном оборудовании нового типа. СПб: АФИ, 2019. 56 с.
- [21] Пат. РФ на полезную модель № 189309 „Фитотехкомплекс для выращивания растений“ / Черноусов И.Н., Панова Г.Г., Удалова О.Р., Александров А.В. 2019. Бюл. № 15.
- [22] Пат. РФ на полезную модель № 181028 „Устройство для гидропонного бесубстратного выращивания растений“ / Конончук П.Ю., Судаков В.Л., Хомяков Ю.В., Панова Г.Г., Удалова О.Р. 2018. Бюл. № 19.
- [23] Пат. РФ на изобретение № 2541405 „Комплексное микроудобрение и способ его получения“ / Аникина Л.М., Якушев В.В., Снявина Н.Г., Панова Г.Г., Чарыков Н.А., Кескинов В.А., Кескинова М.В., Семенов К.Н., 2015. Бюл. № 4.
- [24] Пат. РФ на полезную модель № 85292 „Устройство для рентгенодиагностических исследований зерна и семян“ / Архипов М.В., Демьянчук А.М., Великанов Л.П., Потрахов Н.Н., Грязнов А.Ю., Потрахов Е.Н., 2009. Бюл. № 22.
- [25] Отчет о НИР. Рег. № АААА-А18-118041190203-8 „Разработать автоматизированные ресурсосберегающие технологии культивирования растений для получения высоких урожаев качественной растительной продукции в регулируемых условиях“ / ФГБНУ АФИ. 2018. 48 с.
- [26] Vaaje-Kolstad G., Westereng B., Horn S.J., Liu Z., Zhai H., Sørli M., Eijsink V.G. // Science. 2010. Oct. Vol. 8. 330 (6001). P. 219–222. DOI: 10.1126/science.1192231
- [27] Борцова О.А., Дубовицкая В.И., Вертебный В.Е., Хомяков Ю.В., Панова Г.Г., Галушко А.С. // Агрофизика. 2018. № 4. С. 17–23. DOI: 10.25695/AGRPH.2018.04.03
- [28] Кочетов А.А., Макарова Г.А., Мирская Г.В., Снявина Н.Г. // Агрофизика. 2012. № 1. С.40–44.
- [29] Снявина Н.Г., Кочетов А.А., Мирская Г.В., Рушина Н.А., Панова Г.Г., Артемьева А.М. // Овощи России. 2018. № 3 (41). С. 56–59.
- [30] Panova G.G., Ktitirova I.N., Skobeleva O.V., Sinjavina N.G., Charykov N.A., Semenov K.N. // Plant Growth Regulation. 2016. Vol. 79(3). P. 309–317. DOI: 10.1007/s10725-015-0135-x
- [31] Shilova O.A., Khamova T.V., Panova G.G. et al. // Glass. Phys. Chem. 2018. Vol. 44. P. 26. <https://doi.org/10.1134/S108765961801011X>
- [32] Panova G.G., Serebryakov E.B., Semenov K.N., Charykov N.A., Shemchuk O.S., Elena V., Andrusenko E.V., Kanash E.V., Khomyakov Y.V., Shpanev A.M., Dulneva L.L., Podolsky N.E., Sharoyko V.V. // J. Nanomaterials. 2019. ID 2306518. 13 p. <https://doi.org/10.1155/2019/2306518>
- [33] Kanash E.V., Panova G.G., Blokhina S.Yu. // Acta Horticulturae. 2013. Vol. 1009. P. 37–44.
- [34] Yakushev V., Kanash E., Rusakov D., Blokhina S. // Adv. Animal Biosciences: Precision Agriculture (ЕСРА) 2017. Vol. 8. P. 2. P. 229–232. DOI: 10.1017/S204047001700053X
- [35] Архипов М.В., Потрахов Н.Н. // Труды Кубанского Гос. аграрного ун-та. 2015. № 54. С. 367–370.
- [36] Прияткин Н.С., Архипов М.В., Гусакова Л.П., Потрахов Н.Н., Кропотов Г.И., Цибизов И.А., Винеров И.А. // Агрофизика. 2018. № 2. С. 29–39. DOI: 10.25695/AGRPH.2018.02.05
- [37] Канаши Е.В., Гусакова Л.П., Архипов М.В., Вилчико А.К. // Агрофизика. 2017 № 1. С. 36–442.
- [38] Чесноков Ю.В., Канаши Е.В., Мирская Г.В., Кочерина Н.В., Русаков Д.В., Ловассер У., Бернер А. // Физиология растений. 2019. Т. 66. № 1, С. 46–57. DOI: 10.1134/S0015330319010044
- [39] Нестеров С. // Мир теплиц. 2013. № 6. С. 14–17.
- [40] Детков Н.С. // Картофель и овощи. 2016. № 11. С. 2–4
- [41] Kozai T., Niu G., Takagaki M. Eds. Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production. 2016. London: Academic Press, P. 7–33. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801775-3.00002-0>
- [42] Гигиенические требования к безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. СанПиН 2.3.2.1078-01“, 06.11.2001.
- [43] Commission Regulation (EU) No 1258/2011: Amending Regulation (EC) No 1881/2006 as regards maximum levels for nitrates in foodstuffs. Official Journal of the European Union. 2011. Vol. 320. P. 15–17.
- [44] Экологические проблемы современного овощеводства и качество овощной продукции. Сб. науч. тр. Вып. 1. М.: ФГБНУ ВНИИО, 2014. 544 с.