

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Санкт-Петербургское отделение Российской академии наук
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Агрофизический научно-исследовательский институт»
Совет молодых ученых ФГБНУ АФИ
Совет молодых ученых СПбО РАН



СБОРНИК ТРУДОВ
II Школы молодых агрофизиков
«ЭНЕРГИЯ РАЗВИТИЯ АГРОФИЗИКИ»
(ЭРА)

ФГБНУ АФИ, Санкт-Петербург
17–18 сентября 2026 г.

Санкт-Петербург,
2026

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Санкт-Петербургское отделение Российской академии наук
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Агрофизический научно-исследовательский институт»
Совет молодых ученых ФГБНУ АФИ
Совет молодых ученых СПбО РАН



СБОРНИК ТРУДОВ
II Школы молодых агрофизиков
«ЭНЕРГИЯ РАЗВИТИЯ АГРОФИЗИКИ»
(ЭРА)
ФГБНУ АФИ, Санкт-Петербург
17–18 сентября 2026 г.

Санкт-Петербург,
2026

УДК 581.1:631.42:631.52

ББК 40.1

С 23

- С 23 Сборник трудов II Школы молодых агрофизиков «Энергия развития агрофизики» (ЭРА), ФГБНУ АФИ, Санкт-Петербург, 17–18 сентября 2026 г. – СПб.: ФГБНУ АФИ, 2026. – 95 с.

Сборник содержит материалы II Школы молодых агрофизиков «Энергия развития агрофизики», которая прошла в ФГБНУ АФИ с 17 по 18 сентября 2026 г. и была организована совместно с Минобрнауки РФ и Санкт-Петербургским отделением РАН. В материалах представлены лекции ведущих ученых в области агрофизики и результаты исследований молодых ученых из 25 научных и образовательных учреждений 12 городов по следующим основным направлениям: агро- и биотехнологии; биофизика и биохимия растений; мелиорация и агроклимат; моделирование агроэкосистем; физиология, генетика и селекция растений; физика и физико-химия почв.

Материалы даны в авторской редакции

Ответственные за выпуск:

Кулешова Т. Э.

Бучкина Н. П.

ЛЕКЦИИ

ОСНОВНЫЕ АБИОТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОДУКТИВНОСТЬЮ У РАСТЕНИЙ

Ю. В. ЧЕСНОКОВ

ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»,

Гражданский пр., д.14, г. Санкт-Петербург, Россия

E-mail: yuv_chesnokov@agrophys.ru

Одним из основных вопросов современной агрофизики является: увеличение продуктивности сельскохозяйственных культур и установление механизмов управления ею. Продукционный процесс растений зависит не только от ландшафтно-климатических факторов и запасов элементов минерального питания растений в почве (или корнеобитаемой среде), но также и от физиологических особенностей конкретной сельскохозяйственной культуры. Одним из основных направлений в области регуляции урожайности является выяснение точек приложения отдельных факторов, ограничивающих продукционный процесс. Такие точки приложения могут быть как на молекулярно-генетическом, молекулярно-физиологическом, так и на организменном уровне, учитывая синергетику свойств растений. При этом воздействие на продукционный процесс должно быть множественным – по возможности направленным на максимальное количество лимитирующих факторов. При этом под лимитирующим фактором понимают любой экологический фактор (например, температура, свет, влажность, питательные вещества), который ограничивает жизнедеятельность, рост или размножение организма, так как его значение выходит за пределы оптимального диапазона (его слишком мало или слишком много). Закон минимума Либиха гласит, что даже если все необходимые ресурсы находятся в изобилии, рост и выживание организма зависят от того ресурса, который присутствует в минимальном количестве. Закон толерантности Шелфорда дополняет концепцию тем, что ограничивать жизнедеятельность может не только недостаток, но и избыток фактора (например, слишком яркое солнце или губительная жара). Так, например, фотосинтез определяет тот факт, что, если растению хватает воды и углекислого газа, но не хватает солнечного света, именно свет становится лимитирующим фактором для выработки кислорода. В сельском хозяйстве сколько бы удобрений вы ни вносили в почву, урожай не вырастет выше определенного уровня, если растениям критически не хватает влаги. В данном случае вода является лимитирующим фактором. Чем полнее создаётся комплекс благоприятных для роста и развития растений условий, тем выше будет урожай. Фактически продуктивность сельскохозяйственных культур – результат их существования в конкретных почвенно-климатических условиях.

Продукционным процессом растений, можно управлять с помощью нескольких основных видов абиотических факторов внешней среды, которые подразделяются на два основных класса – физические и химические (рис. 1).

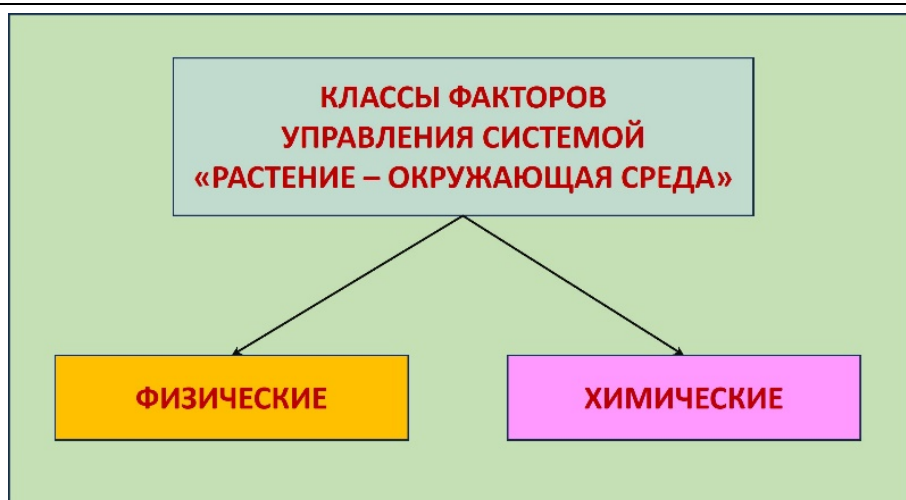


Рисунок 1. Основные виды абиотических факторов внешней среды

Физические факторы – первый важный класс факторов регулирования продукционного процесса у растений (рис. 2). Это – система определенных физических факторов и мероприятий, целенаправленных на создание и поддержание благоприятного для культурных растений водного, теплового и воздушно-светового режимов, а также требуемой активности почв или субстратов.

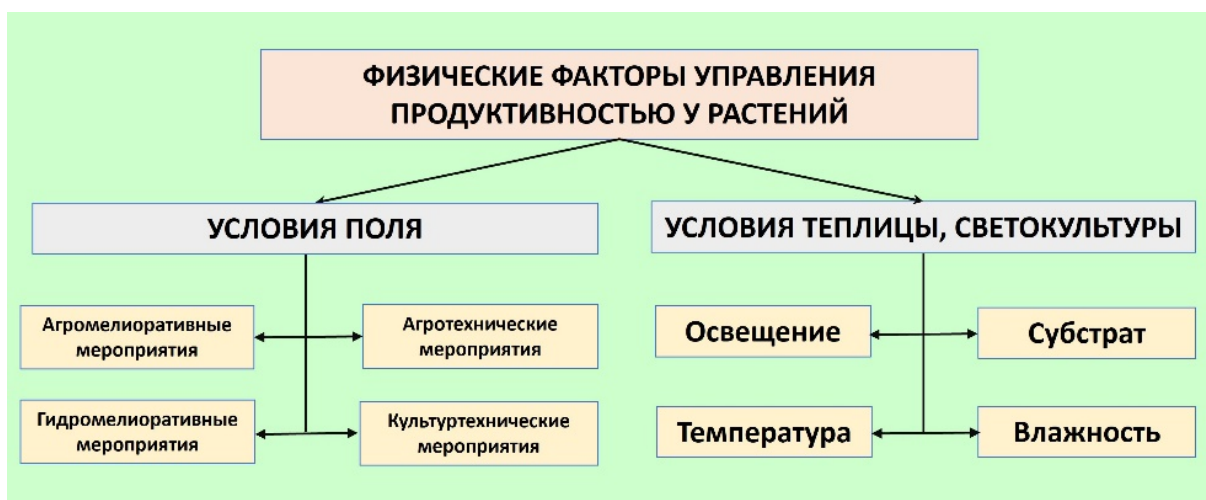


Рисунок 2. Физические факторы управления продуктивностью у растений

При интенсификации сельского хозяйства благоприятные условия для роста и развития культурных растений, помимо механической обработки, могут создаваться с помощью других приёмов регулирования водного, теплового и газового режимов почв. При этом, интенсивная механическая обработка пахотных земель зачастую приводит к почвозащущающим процессам, поэтому в настоящее время общей тенденцией земледелия является минимизация физического воздействия на почвы. До сих пор остаются актуальными приёмы изменения минералогического и гранулометрического составов почв: пескование тяжёлых и глинование лёгких почв. Без сомнения, почвы с водопрочной структурой – наиболее благоприятны для роста и развития растений. Оструктурирование почв повышает водо- и воздухопроницаемость. Для этого в своё время широко использовались специальные вещества – искусственные и синтетические структурообразователи.

Ещё одним приёмом воздействия на физические свойства почв является мульчирование. Данный приём уменьшает испарение влаги из почвы, предотвращает коркообразование, перегрев почвы летом и промерзание зимой, сохраняет рыхлость почвы, снижает количество сорных растений и прочие неблагоприятные факторы воздействия на почву и растения. Например, академик А. Ф. Иоффе в 1930-х годах прошлого века предложил использовать для этих целей синтетические пленки, предотвращающие развитие сорной растительности и повышающие температуры почв [1]. Улучшение тепло-, водо-, воздушных свойств почв благотворно влияет и на активность почвенных организмов, что также является ещё одним благоприятным фактором агрофизического воздействия.

В условиях теплицы контролировать улучшение тепло-, водо-, воздушных свойств окружающей среды и потому управлять продуктивностью у сельскохозяйственных растений и почв удобнее. В строго контролируемых условиях светокультуры контролировать рост и развитие растений можно более эффективно и функциональнее, а потому управлять продуктивностью у сельскохозяйственных растений в строго контролируемых условиях можно более действенно чем в условиях теплицы и, тем более, чем в условиях поля. Под руководством академика Россельхозакадемии, доктора с.-х. наук Е. И. Ермакова были разработаны принципы физического моделирования агроэкосистем и методологии создания совершенных регулируемых агроэкосистем в закрытых помещениях на площадях порядка 350 м² и более, позволяющих проводить регулируемое управление продуктивностью у растений [2]. Основное достоинство данной системы заключается в возможности целенаправленно изменять какой-то один или несколько определенных физических, физико-химических и/или химических факторов внешней среды, воздействующих на растения в системе «генотип-среда», при полной неизменности остальных абиотических и/или эдафических факторов окружающей среды [3, 4], чего никак нельзя добиться, например, в условиях теплицы или тем более в условиях поля. В Агрофизическом научно-исследовательском институте под руководством заведующего Отделом светофизиологии растений и биопродуктивности агроэкосистем кандидата биол. наук Г. Г. Пановой создан усовершенствованный агробиополигон интенсивных круглогодичных исследований, оснащенный микроклиматическим оборудованием и разработанными в институте оригинальными вегетационно-облучательными системами выращивания разнообразных культур, разработана методология моделирования агроэкосистемы в регулируемых условиях, а также научно-технические основы регулирования и оптимизации продукционным процессом у растений [5, 6].

Еще одним классом факторов, используемых для управления продуктивностью у растений, являются химические факторы (рис. 3).



Рисунок 3. Химические факторы управления продуктивностью у растений

Химические факторы – это система мероприятий, направленная на регулирование продуктивности сельскохозяйственных растений посредством химизации – восполнения запасов элементов минерального питания растений в почве, некорневых подкормок макро- и микроэлементами, регулирования кислотного и солевого режима почв, а также с помощью применения химических средств защиты растений. Основное усилие земледельцев направлено на создание в почве необходимого количества и пропорциональности основных или макроэлементов питания: фосфора, калия и азота (так называемого макро производственного потенциала), что достигается внесением в почву соответствующих удобрений, чаще всего минеральных. Регулируя поступление минеральных веществ в растения, также следует помнить, что недостаток одного из макроэлементов может привести к накоплению в почве другого, что, конечно же, затруднит коррекцию основных элементов питания в почве и, как следствие, управление продуктивностью у растений. Количество потребляемых растениями жизненно необходимых элементов определяется их доступными формами в почвенном растворе, а условия поступления этих элементов зависят от кислотного и солевого режимов. Поэтому регулирование последних – важный агротехнический приём. В настоящее время для рационального использования минеральных удобрений используется точное или прецизионное земледелие. Этот подход с помощью современной электронной техники позволяет дозированно вносить в почву минеральные удобрения в зависимости от содержания NPK в том или ином агрохимическом контуре сельскохозяйственных угодий. На сегодняшний день, можно с уверенностью констатировать, что путь управления продуктивностью у сельскохозяйственных растений посредством химических факторов воздействия полностью реализован в промышленном сельском хозяйстве.

Существуют две основные концепции, призванные спасти человечество от экологического и продовольственного кризиса, а именно: устойчивого развития сельского хозяйства и повсеместное внедрение в сельское хозяйство результатов и методов адаптивного растениеводства. Первая система основана на традиционных способах растениеводства, вторая – на инновационных подходах, требующих дальнейшего исследования генетических ресурсов растений, а также широкого применения методов биологического регулирования продуктивности сельскохозяйственных культур. Биологическое регулирование можно определить как совокупность физических, химических, биофизических и физико-химических мероприятий, направленных на восстановление трофической системы «почва – растение – действенный слой атмосферы», одно из эффективных направлений управления продукционным процессом растений. Биологическое регулирование за счёт использования совокупности физических, агрофизических и физико-химических методов направленного воздействия на биологию растений позволяет не только дополнительно повысить урожайность культурных растений с улучшением качества получаемой продукции, но и увеличить сохранность выращенного урожая. По существу – это новый – агрофизический шаг адаптивного растениеводства, развивающий адаптивное земледелие.

Методология биологического регулирования опирается на следующие три ключевых положения: (1) продукционный процесс растений в значительной степени определяется скоростью передвижения питательных веществ из корня в листья, и из листьев в корень. При этом в основе транспорта нутриентов в трофосистеме «почва – растение» лежат осмотические механизмы; (2) одним из путей, обеспечивающих транспорт питательных веществ в высших растениях, является единая система протопластов растительных клеток, объединённых в одно целое многочисленными плазмолеммами, что позволяет растениям поглощать питательные вещества не только корнями, но и листьями; (3) зелёные сосудистые растения способны поглощать и усваивать органические соединения. Именно поэтому зелёные сосудистые растения можно рассматривать как факультативные гетеротрофные организмы с

симбионтным пищеварением и симбионтным питанием. Например, в растительной клетке присутствуют как «автотрофные» органоиды (хлоропласты – отвечают за фотосинтез), так и «гетеротрофные» (митохондрии – отвечают за выработку энергии в клетке).

Существенным моментом функционирования системы «почва – растение» является то, что в процессе биологического круговорота соединений элементов, необходимых живым существам, происходит круговорот органических молекул, многократно используемых на различных пищевых уровнях системы. Ведущую роль в этом процессе играют гуминовые вещества почвы, являясь одним из основных звеньев функционирования экологических систем. Воздействие на метаболизм растений растворами гуминовых веществ, модифицированных соединениями микроэлементов, – множественное, и оно позволяет растениям реализовать свои резервные функции, а также увеличить устойчивость посевов к неблагоприятным условиям и болезням.

Таким образом, методы управления продуктивностью у растений посредством физических и химических факторов воздействия, создают необходимые условия для роста и развития растений, благодаря чему закладывают фундамент управления продуктивностью у сельскохозяйственных культур, заставляя растения посредством биологического регулирования проявлять свои резервные функции, и тем самым, способствуют дополнительному повышению урожая и улучшению качества получаемой растениеводческой продукции.

Список литературы

1. Иоффе А.Ф. О физике и физиках: Статьи, выступления, письма. Л.: Наука. 1985. С. 222–246.
2. Ермаков Е. И. Избранные труды. СПб.: ПИЯФ РАН, 2009. 191 с.
3. Чесноков Ю. В., Мирская Г. В., Канаш Е. В., Кочерина Н. В., Русаков Д. В., Ловассер У., Бёрнер А. Идентификация и картирование QTL у яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) в контролируемых условиях агроэкобиополигона в отсутствии и при внесении азотного удобрения // Физиология растений. 2018. Т. 65, № 1. С. 52–65.
4. Егорова К. В., Синявина Н. Г., Кочетов А. А., Чесноков Ю. В. Оценка селекционно значимых морфологических признаков в популяции удвоенных гаплоидов *Brassica rapa* L. в контролируемых условиях регулируемой агроэкосистемы // Овощи России. 2020. № 4. С. 28–31
5. Панова Г. Г., Драгавцев В. А., Канаш Е. В., Архипов М. В., Черноусов И. Н. Научно-технические основы оптимизации производственного процесса в регулируемой агроэкосистеме // Агрофизика. 2011. № 1. С. 29–37
6. Панова Г. Г., Удалова О.Р., Канаш Е. В., Кочетов А. А., Артемьева А. М., Прияткин Н. С., Синявина Н. Г., Мирская Г. В., Галушко А. С., Кулешова Т. Э., Хомяков Ю. В., Журавлева А. С., Чесноков Ю. В. Возможности регулируемой агроэкосистемы в управлении производственным процессом растений // Материалы международной научной конференции «Агрофизический институт: 90 лет на службе земледелия и растениеводства» ФГБНУ АФИ, Санкт-Петербург, Россия, 14–15 апреля 2022 г. СПб.: ФГБНУ АФИ. 2022. С. 161–168

РЕГУЛИРУЕМАЯ АГРОЭКОСИСТЕМА КАК НЕОТЪЕМЛЕМАЯ ЧАСТЬ НАУЧНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО БЕЗОПАСНОГО КОНТРОЛИРУЕМОГО И УСТОЙЧИВОГО СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Г. Г. ПАНОВА¹, О. Р. УДАЛОВА¹, Е. В. КАНАШ¹, Н. Г. СИНЯВИНА¹, М. В. АРХИПОВ¹,
Т. Э. КУЛЕШОВА¹, Г. В. МИРСКАЯ¹, А. С. ГАЛУШКО¹, Е. Н. ВОЛКОВА¹, Ю. В. ХОМЯКОВ¹,
Н. С. ПРИЯТКИН¹, А. С. ЖУРАВЛЕВА¹, А. М. АРТЕМЬЕВА², Ю. В. ЧЕСНОКОВ¹

¹ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург;

²ФГБНУ ФИЦ ВИР имени Н. И. Вавилова, Санкт-Петербург

Неуклонный рост численности населения на нашей планете в современных условиях беспрецедентных вызовов (экономический кризис, изменения климата, кризис глобальных тенденций природопользования) и взаимосвязанное с этим обострение проблемы обеспечения его продовольствием в необходимых для жизнедеятельности объемах требуют в том числе и привлечения научно-технического потенциала для ее решения, в частности: ускоренного создания адаптированных к регионам выращивания сортов и гибридов сельскохозяйственных культур, модернизации существующих и разработки новых масштабируемых технико-технологических систем производства растительной продукции, отличающихся существенно более высокой эффективностью, пластичностью и безопасностью. Достижение указанных целей становится возможным только при наличии знаний о взаимосвязанных процессах обмена потоками вещества и энергии, особенностях взаимодействия на уровне генотип-среда в агроэкосистемах, что объективно и наиболее информативно при физическом моделировании последних в регулируемых условиях, иначе в регулируемой агроэкосистеме (РАЭС) [1, 2]. Благодаря возможности круглогодичного интенсивного выращивания растений при широком варьировании свето-температурных условий, эдафических факторов в регулируемой агроэкосистеме возможна точная оценка реакции растений (существующих и впервые создаваемых сортов) на технологии, применяемые в современных системах земледелия, и создание высокоэффективных для конкретного региона возделывания систем сорт-технология. Особенно важно то, что в РАЭС можно избавиться от существующего в естественных условиях влияния «экологических шумов», значительно снижая экологическую составляющую фенотипической дисперсии. Это позволяет более четко идентифицировать свойства генотипа по фенотипу [3–6].

Значительный интерес в мире к моделированию агро- и экосистем в сооружениях с регулируемыми условиями связан со стремлением на основе экспериментальных исследований познать сценарии возможного развития биосферных процессов в эпоху техногенеза, однако на сегодняшний день оказалось невозможно учесть все многообразие биосферных процессов и явлений, особенно в таких трудноуправляемых биокосных системах как почвы и почвоподобные образования [2]. Сложность формирования решения вопросов многомерной оптимизации состава и свойств корнеобитаемой, световой и воздушной среды для выращиваемых сельскохозяйственных культур обусловлена тем, что это многокомпонентная задача с несколькими переменными, зависящими от задаваемых условий и физиологических особенностей выращиваемого сорта, гибрида, линии, формы, генотипа. Вследствие этого и других не до конца учтенных процессов не обоснованы оптимальные технологии производства растительной продукции и в современных растительных фабриках, ситифермах и др., где растения выращиваются в максимально контролируемых условиях при полностью искусственном освещении, и имеется много возможностей для улучшения и совершенствования производственного процесса в них [7]. Это отражается негативным образом на рентабельности производства в таких фабриках [8].

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 упомянутых исследований позволят в условиях защищенного грунта заметно снизить себестоимость единицы продукции [9–11].

Однако из сведений, представленных в литературе, следует, что в основном исследователи уделяют внимание вопросам совершенствования одной из сред (световой, корнеобитаемой или воздушной) для роста, развития растений, реализации их продукционного потенциала [12–15], и не используется системный подход многомерной оптимизации. Так, в литературе подчеркивается, что вопросы формирования 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% [11, 16–21].

В отношении корнеобитаемой среды 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. Для выращивания по выбранной наиболее экономичной технологии производства ведется селекция овощных культур, продукция которых по вкусовым характеристикам и биохимическому составу существенно отличается в худшую сторону по сравнению с продукцией овощных культур, производимой в открытом грунте в южных регионах.

В ФГБНУ АФИ со дня его создания используется системный подход к решению задачи обеспечения стабильного получения высоких урожаев качественной растительной продукции, включая разработку методов, приемов и технических устройств контроля и оптимизации световой, корнеобитаемой и воздушной среды и изучение влияния их параметров на физиологическое состояние растений, механизмы и закономерности их взаимодействия с сопутствующей биотой и средой обитания, а также агро-, био- и генетико-селекционные технологии повышения эффективности продукционного процесса растений в регулируемых условиях интенсивной светокультуры [3, 22–26].

Для реализации системного подхода в разработке методов оптимизации условий среды обитания растений в ФГБНУ АФИ создан и постоянно совершенствуется, модернизируется в соответствии с новыми знаниями и сведениями в области светотехники и светофизиологии растений, агрофизики, агробиологии, и т. д. агробиополигон с регулируемыми условиями, представляющий собой комплекс помещений общей площадью 450 м², оснащенный системами контроля и регуляции микроклимата и разработанным в ФГБНУ АФИ оригинальным вегетационно-облучательным оборудованием различного типа, позволяющим выращивать разнообразные по габитусу и величине растения, а также аппаратурой для дистанционной и контактной диагностики их физиологического состояния на протяжении онтогенеза.

Вегетационно-облучательное оборудование – автоматизированные вегетационные светустановки, в которых воплощены оригинальные методы и приемы формирования световой, корнеобитаемой среды растений с возможностью варьирования значениями их параметров для повышения эффективности реализации продукционного потенциала

растений при максимально возможном снижении затрат ресурсов и энергии на единицу производимой продукции. Вегетационно-облучательное оборудование представлено одноярусными и многоярусными устройствами различного типа, включая уникальную ризотронную технику для прижизненного исследования роста и развития корневых систем растений. В течение года на вегетационных светоустановках биополигона с регулируемыми условиями можно снимать 6–7 урожаев огурца; 4–5 – томата; 4 – яровых зерновых культур; 12–24 – салата, капустных и других листостебельных и листовых овощных культур и, таким образом, быстро получать воспроизводимую достоверную информацию о влиянии исследуемого фактора(ов) на растения, а также экспериментально оценивать эффективность применения разрабатываемых технологий, агротехнических приемов и средств при культивировании растений в благоприятных и стрессовых условиях [3, 22–26]. Ризотрон – автоматизированное вегетационно-облучательное оборудование, предназначенное для выращивания растений на вертикальной пористой тонкослойной корнеобитаемой среде с целью исследования роста и развития корневых систем на протяжении всего онтогенеза растений, поглощения ими питательных веществ, исследования микробиотического комплекса в ризоплане и ризосфере растений, а также для проведения физиолого-биохимических исследований и изучения реакции растений на воздействие различных факторов [24, 25]. Ризотронная техника представлена на биополигоне ризотронами двух типов РОСТ-4М и РОСТ-4СМ [25].

Агробιοполигон интенсивных исследований, таким образом, обеспечивает прохождение ускоренными темпами разработки от лабораторного уровня к уровню испытаний в полевых условиях при существенном сокращении материальных и временных расходов на достижение искомого результата. Полученные знания на агробιοполигоне о закономерностях и механизмах взаимодействия растений со средой обитания в регулируемых условиях послужили основой для формирования представлений о том, какая должна быть уникальная научно-технологическая инфраструктура в регулируемых условиях для реализации системы «сорт-технология» по созданию новых локально адаптированных форм, линий и сортов с использованием современных методов генотипирования и фенотипирования организмов, геномной и маркер-вспомогательной селекции; практического получения линий и сортов селективных культур с комплексом хозяйственно-ценных признаков, адаптированных для использования в локальных условиях с выходом на новые технологии направленного улучшения стрессоустойчивости растений и получения растительной продукции высокого качества с заданными функциональными характеристиками посредством применения созданных высокоэффективных и экологически безопасных препаратов на основе кремнезольных и углеродных структур.

Таким образом, использование регулируемой агроэкосистемы с возможностями физического моделирования и изучения действия определенного (ых) фактора (ов) на растения при нахождении остальных факторов в благоприятных значениях, системного подхода к оптимизации условий среды для выращиваемых культур с учетом их генетико-физиологических особенностей позволило бы оперативно создавать, испытывать и совершенствовать новые потенциально перспективные средства, методы, технологии, обеспечивающие повышение эффективности и экологической безопасности сельскохозяйственного производства, а также удовлетворить потребность ускоренной селекции за счет сокращения вдвое (до 4–5 лет) сроков создания новых линий и сортов по сравнению с традиционной селекцией в открытом грунте и значительного уменьшения объема прорабатываемого селекционного материала вследствие благоприятности и выровненности условий выращивания растений, а также более четкого подбора родительских пар по принципу благоприятного взаимодополнения по селектируемым признакам.

Список литературы

1. Ермаков. Е. И. Регулируемая агроэкосистема в познании и управлении продукционным процессом // Регулируемая агроэкосистема в растениеводстве и экофизиологии. Сб. науч. трудов. Санкт-Петербург: Изд-во ПИЯФ РАН, 2007. С. 4–20.
2. Ермаков Е. И. Избранные труды. СПб.: Изд-во ПИЯФ РАН, 2009. 192 с.
3. Синявина Н. Г., Панова Г. Г., Кулешова Т. Э., Чесноков Ю. В. Светокультура растений в современных сооружениях искусственного климата (обзор) // Сельскохозяйственная биология. 2024. Т. 59. № 5. С. 869–892.
4. Sinyavina N. G., Kochetov A. A., Kocherina N. V., Egorova K. V., Kurina A. B., Panova G. G., Chesnokov Y. V. Breeding approaches for controlled conditions of artificial light culture for small radish and radish (*Raphanus sativus* L.) // Horticulturae. 2023. Т. 9. № 6. С. 678.
5. Кочетов А. А., Мирская Г. В., Синявина Н. Г. Егорова К. В. Трансгрессивная селекция: методология ускоренного получения новых форм растений с прогнозируемым комплексом хозяйственно ценных признаков // Российская сельскохозяйственная наука. 2021. № 6. С. 29–37.
6. Bhattarai K., Ogden A. B., Pandey S., Sandoya G. V., Shi A., Nankar A. N., Jayakodi M., Huo H., Jiang T., Tripodi P., Dardick C. Improvement of crop production in controlled environment agriculture through breeding // Front. Plant Sci. 2025. 15, 1524601.
7. Schueller J. K. Implications for plant factories from manufacturing and agricultural equipment technologies // In: Proceedings of Plant Factory Conference. Kyoto. 2014. P. 5.
8. Gómez C., Currey C. J., Dickson R. W., Kim H. J., Hernández R., Sabeh N. C., Burnett S. E. Controlled environment food production for urban agriculture // HortScience. 2019. Vol. 54. No 9. P. 1448–1458.
9. Lubna F. A., Lewus D. C., Shelford T. J., Both A.-J. What You May Not Realize about Vertical Farming // Horticulturae. 2022. Vol. 8. P. 322.
10. van Delden S. H., Sharath Kumar M., Butturini M., Graamans L. J. A., Heuvelink E., Kacira M., Marcelis L. F. M. Current status and future challenges in implementing and upscaling vertical farming systems // Nature Food. 2021. Vol. 2. P. 944–956.
11. Ahmed H. A., Tong Y., Li L., Sahari S. Q., Almogahed A. M., Cheng R. Integrative Effects of CO₂ Concentration, Illumination Intensity and Air Speed on the Growth, Gas Exchange and Light Use Efficiency of Lettuce Plants Grown under Artificial Lighting // Horticulturae. 2022. Vol. 8, No 3. P. 270.
12. Tong Y., Yang Q., Shimamura S. Analysis of Electric-Energy Utilization Efficiency in a Plant Factory with Artificial Light for Lettuce Production // In International Symposium on New Technologies for Environment Control, Energy-Saving and Crop Production in Greenhouse and Plant. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany. 2014. Vol. 1037. P. 277–284.
13. Черноусов И. Н. К вопросу о прецизионном растениеводстве // В кн.: Тенденции развития агрофизики в условиях изменяющегося климата. Мат. Межд. конф. СПб: Изд-во Агрофизического НИИ, 2012. С. 139–143.
14. 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. Optimizing LED lighting for space plant growth unit: Joint effects of photon flux density, red to white ratios and intermittent light pulses // Life Sciences in Space Research. 2016. Vol. 11. P. 29–42.
15. 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. Оптимизация светодиодной системы освещения витаминной космической оранжереи // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2016. Т. 50. №. 4. С. 35–41.
16. Тихомиров А. А., Лисовский Г. М., Сидько Ф. Я. Спектральный состав света и продуктивность растений. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1991. 168 с.

17. Tamulaitis G., Duchovskis P., Bliznikas Z., Brazaityte A., Novickovas A., Zukauskas A. High-power light-emitting diode based facility for plant cultivation // J. Phys. D: Appl. Physics. 2005. Vol. 38. P. 3182–3187.
18. Liu W. Light environmental management for artificial protected horticulture // Agrotechnology. 2012. Vol. 1, No 1. P. 101–104.
19. Darko E., Heydarizadeh P., Schoefs B., Sabzalian M. R. Photosynthesis under artificial light: the shift in primary and secondary metabolism // Phil. Trans. R. Soc. B. 2014. Vol. 369. P. 20130243.
20. Ouzounis T., Rosenqvist E., Ottosen C.-O. Spectral effects of artificial light on plant physiology and secondary metabolism: a review // Hortscience. 2015. Vol. 50, No 8. P. 1128–1135.
21. Cocetta G., Casciani D., Bulgari R., Musante F., Kolton A., Rossi M., Ferrante A. Light use efficiency for vegetables production in protected and indoor environments // Eur. Phys. J. Plus. 2017. Vol. 132. P. 43.
22. Архипов М. В., Прияткин Н. С., Мусаев Ф. Б., Джафаров И. Г., Потрахов Н. Н., Гусакова Л. П., Панова Г. Г. Современные возможности неинвазивной оценки качества и ростового потенциала семян на примере шпината огородного (*Spinacia oleracea* L.) // Сельскохозяйственная биология. 2025. Т. 60. № 1. С. 60–69.
23. Kanash E. V., Kuleshova T. E., Ezerina E. M., Rusakov D. V., Kocherina N. V., Dobrokhotov A. V., Gorshkov O. A., Panova G. G., Sinyavina N. G. Influence of the sunlike light spectral composition on radish in controlled environment agriculture: morphophysiological characteristics and diffuse reflection indices of leaves // Horticulturae. 2026. Vol. 12. № 1.
24. Панова Г. Г., Черноусов И. Н., Удалова О. Р., Александров А. В., Карманов И. В., Аникина Л. М., Судаков В. Л. Научно-технические основы круглогодичного получения высоких урожаев качественной растительной продукции при искусственном освещении // Доклады РАСХН. 2015. № 4. С. 17–21.
25. Ермаков Е. И., Панова Г. Г., Желтов Ю. И. Влияние эдафических факторов в ризотроне на рост и продуктивность растений яровой пшеницы // В сборнике: Регулируемая агроэкосистема в растениеводстве и экофизиологии АФИ – 75 лет. Санкт-Петербург, 2007. С. 158–164.
26. 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.

СПЕКТР ЛАБОРАТОРНЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ АНТИОКСИДАНТНОГО СТАТУСА РАСТЕНИЙ

Ю. В. ХОМЯКОВ

ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург

E-mail: himlabafi@yandex.ru

История возникновения жизни на планете Земля началась с появления анаэробных организмов, которые не нуждались в газообразном кислороде, хотя они его естественно включали в свой состав наряду с углеродом, водородом и азотом. Эволюция фотосинтеза преимущественно у синезеленых водорослей (цианобактерий) привела к их способности примерно 2,5 млрд. лет назад поглощая энергию Солнца расщеплять воду и получать водород в качестве восстановителя в метаболических процессах и молекулярный кислород. Поскольку этот процесс происходил в водной среде, значительная часть кислорода оказывалась не в атмосфере, а взаимодействовала с различными металлами, сульфидами металлов, ионами двухвалентного железа, приводя к образованию различных руд и минералов, что подтверждается современными геологическими и геохронологическими исследованиями. Лишь после этого молекулярный кислород стал накапливаться в атмосфере Земли. Накопление газообразного кислорода в атмосфере, свободного кислорода в водной среде привело к гибели значительной части анаэробных организмов. Выжили анаэробы, закрепившиеся в бескислородных средах или те, которые стали аэробами, перестроив свой метаболизм под реакции аэробного дыхания и выработавшие защитные от разрушающего действия кислорода механизмы [1, 2].

В целом появление молекулярного кислорода имело и имеет важное значение для жизни на Земле. Во-первых, в стратосфере сформировался озоновый слой, защищающий поверхность нашей планеты от УФ-С радиации (электромагнитные волны 100–280 нм), губительной для живых организмов. Это позволило постепенно живым организмом заселить сушу, выйдя из водной среды.

Во-вторых, появившийся свободный кислород привел к окислению токсичных для живых организмов ионов двухвалентного железа в Мировом океане и осаждению его в виде нерастворимых соединений трехвалентного железа. В какой-то степени эта реакция защищала и сами организмы от избытка выделяющегося кислорода.

Выжившие организмы для эффективной выработки химической энергии с использованием органических соединений сформировали современный дыхательный метаболизм, где кислород является конечным акцептором электронов в функционирующей электрон-транспортной цепи (окислительное фосфорилирование).

Длительный процесс эволюции живых организмов формировал у них разнообразные защитные механизмы еще до связывания кислорода растворенными в воде восстановителями и появления озонового слоя.

Опасность высоких уровней свободного кислорода для живых организмов определяется наличием так называемых активных форм кислорода (АФК), значительная часть из которых является свободными радикалами и определяет развитие окислительного стресса.

Сам кислород в обычном триплетном состоянии способен окислять ряд соединений, но наибольшую опасность представляют такие его формы, как синглетный кислород, супероксид-радикал, пероксид-радикал и их протонированные формы. Существует также множество активных форм кислорода в виде органических свободных радикалов, функционирующих в живых организмах при возникновении окислительного стресса. Активные формы кислорода формируются как спонтанно, так в результате процессов фотосинтеза, дыхания, связаны с работой оксидоредуктаз и даже некоторых антиоксидантов. Как правило активным формам кислорода приписывают лишь негативную роль, связанную с

окислением ненасыщенных органических соединений, разрушением органических молекул не содержащих двойных и тройных связей (белки, нуклеотиды, углеводы), что приводит к образованию токсичных продуктов, разрушению мембран, нарушению метаболизма, возникновению мутаций, приводя в конечном счете к старению и гибели клеток и организмов в целом.[2, 3, 4].

Современные представления о роли активных форм кислорода в живых организмах отводят им не только негативную роль, но и выделяют эволюционно сформировавшееся их участие в регуляции роста и развития растений, формировании сигнальных систем, защите от патогенов, защите от механических повреждений(ран), развитии апоптоза (внезапной клеточной смерти) в качестве защитного механизма.

В эволюции живых организмов для противодействия окислительному стрессу выработались различные системы защиты:

- окислительно-восстановительные ферменты (оксидоредуктазы) – каталазы, пероксидазы, супероксиддисмутазы, глутатионредуктазы и др.;
- низкомолекулярные антиоксиданты – флавоноиды, аскорбиновая кислота, SH-соединения, убихинон, каротиноиды, витамины А, Е, К и др.;
- макромолекулярные неферментные соединения – белки-переносчики железа и др.

По механизмам действия принято выделять первичные и вторичные антиоксиданты.

Первичные АО являются донором электронов и атомов водорода, образуя при этом низкорективный легкогасимый радикал, который обрывает цепную реакцию свободнорадикального окисления (фенольные соединения)

Вторичные АО – чаще всего удаляют ферментативным путем супероксид-радикал, пероксид водорода (оксидоредуктазы и их субстраты -восстановители), гасят синглетный кислород, хелатируют переходные металлы, предотвращая образование гидроксил-радикала (фентоновские превращения). Часто один и тот же антиоксидант работает по разным механизмам [2, 4].

В ходе жизнедеятельности организмов в них постоянно образуются активные формы кислорода, но благодаря системам антиоксидантной защиты их уровень низкий. Однако, их образование значительно возрастает при различных стрессовых воздействиях на растения – засоление, засуха, воздействие токсикантов, патогенов, повышенные и пониженные температуры, нарушение минерального питания, воздействие озона. Таким образом антиоксидантный статус организма является важнейшим диагностическим признаком стрессустойчивости, развития стресса, защитных и сигнальных механизмов.

Существует большое разнообразие методов оценки антиоксидантного статуса растений, их тканей, клеток, органоидов разной информативности, точности и сложности.

Образование активных форм кислорода

Наиболее сложным и трудоемким является прямое их измерение:

- методы детекции синглетного кислорода по его собственной фосфоресценции или взаимодействию с флуоресцентными зондами;
- ЭПР с применением спиновых ловушек – позволяет напрямую детектировать образование радикалов и продуктов их взаимодействия с органическими молекулами, но не обладает селективностью к самим АФК;
- хромогенные индикаторы (производные тетразолия и гем цитохрома с – чувствительны и избирательны к супероксидному радикалу – фотометрическое детектирование, доступная реализация;
- детектирование по флуоресценции – флуоресцентные и флуорогенные зонды – не всегда избирательны, но комбинация разных агентов позволяет повысить избирательность.

Позволяют работать с живыми тканями и клетками с оптическим детектированием и визуализацией;

- спектрофотометрическое измерение уровня накопленного пероксида водорода или супероксидного аниона по продуктам их реакции при измерении -доступный метод;

- разработаны методы определения пероксида водорода с применением нанозондов и амперометрического детектирования – метод чувствительный, избирательный, но требует специфического оборудования.

Накопление продуктов окисления.

Наиболее распространен метод оценки перекисного окисления липидов по накоплению ТБК-реактивных продуктов (МДА и др.). Метод доступен, легко воспроизводим, но не очень селективен из-за разнообразия ТБК-продуктов.

Возможно определение окисленных форм белков, нуклеиновых кислот – метод трудоемок, используется редко, чаще в специальных исследованиях.

Распространенным является определение уровня окисленного глутатиона, но чаще в этот показатель используется в комплексе с определением уровня восстановленного глутатиона.

Уровень активности окислительно-восстановительных ферментов

Определение активности окислительно-восстановительных ферментов в растительных тканях является одним из самых распространенных в лабораторной практике в связи с высокой информативностью и доступностью реализации. В настоящее время отработаны методики определения каталазы, пероксидазы, супероксиддисмутаза, аскорбатпероксидазы, глутатионредуктазы.

Наиболее часто для индикации развития окислительного стресса оценивают активность пероксидазы бензидиновым методом.

Возможно изучение активности и других оксидоредуктаз с учетом специфики субстрата.

Применение электрофоретического разделения изоформ ферментов позволяет повысить информативность и наглядность при физиологических исследованиях, выявлении реакции растений на стресс и др.

Накопление различных антиоксидантов неферментной природы

Антиоксиданты неферментной природы представлены большим химическим разнообразием, отражающим метаболизм, в том числе вторичный растительных организмов, что предполагает и соответствующий спектр методов их определения.

Наиболее распространены и доступны методы группового определения класса соединений (фенолы, полифенолы, флавоноиды, антоцианы и др.) с пересчетом на содержание конкретного компонента. Значительно более трудоемкими, затратными, но информативными являются методы идентификации профиля соединений с применением методов хроматографии, хромато-масс-спектрометрии, ИК Фурье – спектрометрии, Рамановской спектрометрии и т. д. Наибольшая проблема в реализации этого метода – наличие стандартных образцов соединений и методы выделения (дороговизна компонентов, не всегда известны компоненты, конъюгированность их в растениях, сложности выделения и сохранения).

Часто разные методы определения компонентов дают неоднозначные результаты, как например определение восстановленной и окисленной форм глутатиона. Спектрофотометрические методы их определения с различными реагентами отражают их соотношение, но показывают заниженные результаты в сравнении с методом высокоэффективной жидкостной хроматографии, что необходимо учитывать при планировании исследований [6].

Уровень накопления антиоксидантов может быть оценен и по общей антиоксидантной активности экстрактов растительных тканей. В настоящее время наиболее распространены следующие вариации:

– амперометрическое детектирование, в том числе с применением хроматографической колонки (позволяет идентифицировать конкретное вещество, обладающее антиоксидантными свойствами) – метод доступный, легко и быстро реализуем;

– определение антиоксидантной активности с DPPH; реализуется по способности экстракта гасить радикал (концентрация экстракта для погашения 50% радикалов) и с применением калибровочного реагента Trolox – синтетического водорастворимого аналога витамина Е в качестве эталона антиоксидантной активности. Метод DPPH широко используется в лабораторных исследованиях, описан в научной литературе, но требует подбора разведений экстракта, повторения реакции при измерении каждой пробы, что увеличивает его трудоемкость.

Особое внимание нужно обратить на аскорбиновую кислоту. Ее содержание в часто определяют для характеристики функциональной ценности растительного продукта, забывая, что это важнейший водорастворимый антиоксидант растений, участвующий в своих восстановленной и окисленной формах в реализации окислительно-восстановительных процессов в тканях, участвующий в регуляции роста и развития растений [2]. В настоящее время распространены титриметрические, спектрофотометрические, флюориметрические и хроматографические методы ее определения, доступные для реализации.

Большое разнообразие и вовлеченность окислительно-восстановительных процессов в общий метаболизм и процессы жизнедеятельности растений часто обуславливают сложность интерпретации результатов.

Самым важным условием при изучении окислительно-восстановительного статуса растений является комбинирование показателей и методов оценки. При исследовании должны соблюдаться методические особенности работы с живыми растительными объектами (учет формы нахождения компонента, его локализацию, устойчивость при выделении, неоднородность распределения и уровня в зависимости от фазы развития растения, его физиологического состояния, исследуемого органа, ткани или более мелких структур).

Список литературы

1. Пиневиц А. В. Аверина С. Г. Оксигенная фототрофия. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2002. 236 с.
2. Шарова Е. И. Антиоксиданты растений//учебное пособие. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2016. 140 с.
3. Прадедова Е. В. Редокс-процессы биологических систем (обзор) / Е. В. Прадедова, О. Д. Нимаева, Р. К. Салаяев // Физиология растений. 2017. Т. 64. № 6. С. 433–445.
4. Борисова Г. Г. и др. Методы оценки антиоксидантного статуса растений/ учебно-методическое пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та, 2012. 72 с.
5. Сибгатулина Г. В. и др. Методы определения редокс-статуса культивируемых клеток растений: учебно-методическое пособие. Казань: Казанский (Приволжский) Федеральный университет, 2011. 61 с.
6. Pradedova E. V., Nimaeva O. D., Putilina T. E., Semenova N. V., Sobenin A. M., Salyaev R. K. Determination of Glutathione and Its Redox Status in Isolated Vacuoles of Red Beetroot Cells // Journal of Stress Physiology & Biochemistry. Vol. 12. No. 1. 2016. P. 87–107.

HSI-АГРОМОНИТОРИНГ: АГРОФИЗИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕНСОРА RESONON PIKA L В СОЧЕТАНИИ С МЕТОДАМИ ФИЛЬТРАЦИИ

А. И. НОВИКОВ, Ю. В. ЧЕСНОКОВ

ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург

Современное управление агротехнологиями растений постепенно переходит от эпизодических визуальных наблюдений к системам непрерывного инструментального мониторинга посевов [8]. Многие культурные растения являются ключевыми продовольственными культурами нуждаются в своевременной диагностике стрессовых состояний (дефицит азота, водный стресс) для принятия обоснованных управленческих решений [9, 11]. При этом концепция точного земледелия в отечественной и зарубежной практиках развивается в направлении перехода от мультиспектральных спутниковых данных к гиперспектральным эталонам, получаемым с бортовых и наземных носителей, что позволяет повысить детальность и достоверность оценок состояния культур [3].

Цель работы – обоснование агрофизического подхода к оценке состояния культурных растений, выращиваемых в полевых условиях, основанного на взаимодополнении и взаимоусилении эффекта использования сенсоров узкополосного расщепления отраженного электромагнитного излучения в диапазоне 400–1000 нм, современных способов обработки данных и теории фильтрации.

Для обоснования агрофизического подхода в данном направлении необходимо определить объект и используемые аппаратные (инструментальные) и программные (информационные) методы. В качестве объекта исследования могут выступать любые посевы культурных растений, расположенные на определенной площади различной конфигурации. Обоснование выбора перечисленных методов и их сочетания в едином программно-аппаратном комплексе представлено в работах по HSI-агромониторингу, где определены составляющие эффективного управления системой «дистанционный детектор – поле – наблюдатель» [1], а также рассмотрены вопросы рационального выбора сегментации фоновых пикселей для определения параметров растительных объектов на разных оптических фонах [2].

Инструментальная методологическая основа HSI-агромониторинга включает захват изображения гиперспектральной камерой, установленной на аэродинамической базе в положении надира. Технология захвата изображений предусматривает формирование многомерных данных «координаты пикселя – длина волны узкополосного отраженного излучения» в диапазоне от 400 до 1000 нм с определенным шагом и, в перспективе, по мнению современных исследователей, позволит регистрировать прецизионные изменения отражательной способности поверхности листовых пластин и стеблей растений, связанные с физиологическим состоянием [4, 7].

Программная методологическая основа HSI-агромониторинга рассматривается как двухэтапный процесс.

На первом этапе производят выбор и разработку нейросетевых алгоритмов (например, сверточные нейронные сети, архитектуры YOLO, трансформеры и другие варианты) для извлечения значимых оптометрических признаков из многомерных гиперспектральных данных и классификации типов стресса [10, 12, 14].

На втором этапе в составе бортового вычислительного модуля аэродинамической платформы и наземного сервера обработки данных необходимо реализовать адаптивный рекурсивный фильтр Калмана. Данный программно-аппаратный модуль предусматривается

для выполнения фильтрации шумов гиперспектрального сенсора и атмосферных искажений, ассимиляции разновременных нейросетевых оценок в единый временной ряд, а также для реконструкции непрерывной фазовой траектории вегетационного состояния посевов с прогнозом на шаг вперед.

Методология данного вида фильтрации для задач мониторинга культурных растений по данным с сенсоров аэродинамической платформы апробирована в работах по оценке индекса листовой поверхности риса с использованием мультиспектральных данных [13], а также для ассимиляции мультимодальных данных с сенсоров аэродинамических платформ в модели роста культур [6]. Фильтр Калмана объединяет прогноз от инерциальной системы (IMU) с уточнениями от спутниковой системы (GNSS), что критически важно для точной геопривязки гиперспектральных снимков, чувствительных к движениям носителя [5].

С технической точки зрения фильтр Калмана представляет собой программный алгоритм рекурсивной байесовской оценки, интегрированный в бортовой вычислительный модуль аэродинамической платформы. Он не является отдельным физическим устройством, а реализуется, как правило, в виде встраиваемого программного модуля на распространенных языках программирования (например, C/C++ или аналогичных) с использованием открытых библиотек (например, *embedded-kf*). Данное обстоятельство позволяет выполнять его на одноплатных компьютерах (например, Raspberry Pi 3) или промышленных контроллерах (например, Manifold на базе NVIDIA Tegra K1) в реальном времени. Алгоритм, как правило, объединяет два потока данных – высокочастотный (100–400 Гц) от инерциальной системы (IMU) аэродинамической платформы и низкочастотный (1–10 Гц) от спутниковой системы (GNSS) в единую оптимальную оценку положения, скорости и ориентации платформы (включая начальную выставку [15]) с учетом ковариаций шумов каждого из источников. В случае нелинейных моделей движения аэродинамической платформы могут применяться расширенный фильтр Калмана (EKF) [16], используемый в большинстве навигационных систем, или сигма-точечный фильтр (UKF), обеспечивающий значительное снижение ошибки оценивания в сложных сценариях.

В контексте гиперспектрального агромониторинга данный модуль выполняет две критически важные функции: во-первых, он обеспечивает высокоточную геопривязку каждого пикселя гиперспектрального снимка путем ассимиляции данных GNSS/IMU в момент экспозиции камеры, компенсируя вибрации и угловые колебания платформы. Во-вторых, на наземном сервере постобработки этот же алгоритм может быть развернут для динамической фильтрации временных рядов спектральных оценок: сглаживания случайных ошибок измерений, обусловленных атмосферными искажениями и шумами гиперспектрального сенсора (Resonon Pika L), и реконструкции непрерывной траектории изменения биофизических параметров посева (индекса листовой поверхности, содержания хлорофилла, водного стресса и других показателей) с прогнозом на шаг вперед.

Предлагаемый агрофизический подход реализует трехступенчатую схему обработки данных.

На первой ступени (сенсорной) осуществляют гиперспектральную съемку, при необходимости с компенсацией движения базовой платформы, что обеспечит получение высокодетализированных многомерных данных об изменении интегральных оптических характеристик, отраженных от поверхности листовых пластин и частей растений в структуре посевов.

На второй ступени (аналитической) нейросетевые модели преобразуют многомерные спектральные сигнатуры в оценки физиологических параметров (содержание хлорофилла, индекс листовой поверхности, биомасса) с автоматическим выделением зон стресса [14].

На третьей ступени (динамической) фильтр Калмана выполняет ассимиляцию разновременных оценок, полученных нейросетями, обеспечивая робастность системы мониторинга в условиях неполных и зашумленных данных.

Таким образом, фильтр Калмана в предлагаемом программно-аппаратном комплексе выполняет роль интеллектуального конвейера ассимиляции данных (рис.), который на первом уровне (бортовом) интегрирует навигационную информацию для геометрической коррекции гиперспектральных данных, а на втором уровне (наземном) ассимилирует разновременные нейросетевые оценки, обеспечивая робастность и непрерывность системы мониторинга даже в условиях пропусков данных вследствие погодных ограничений.

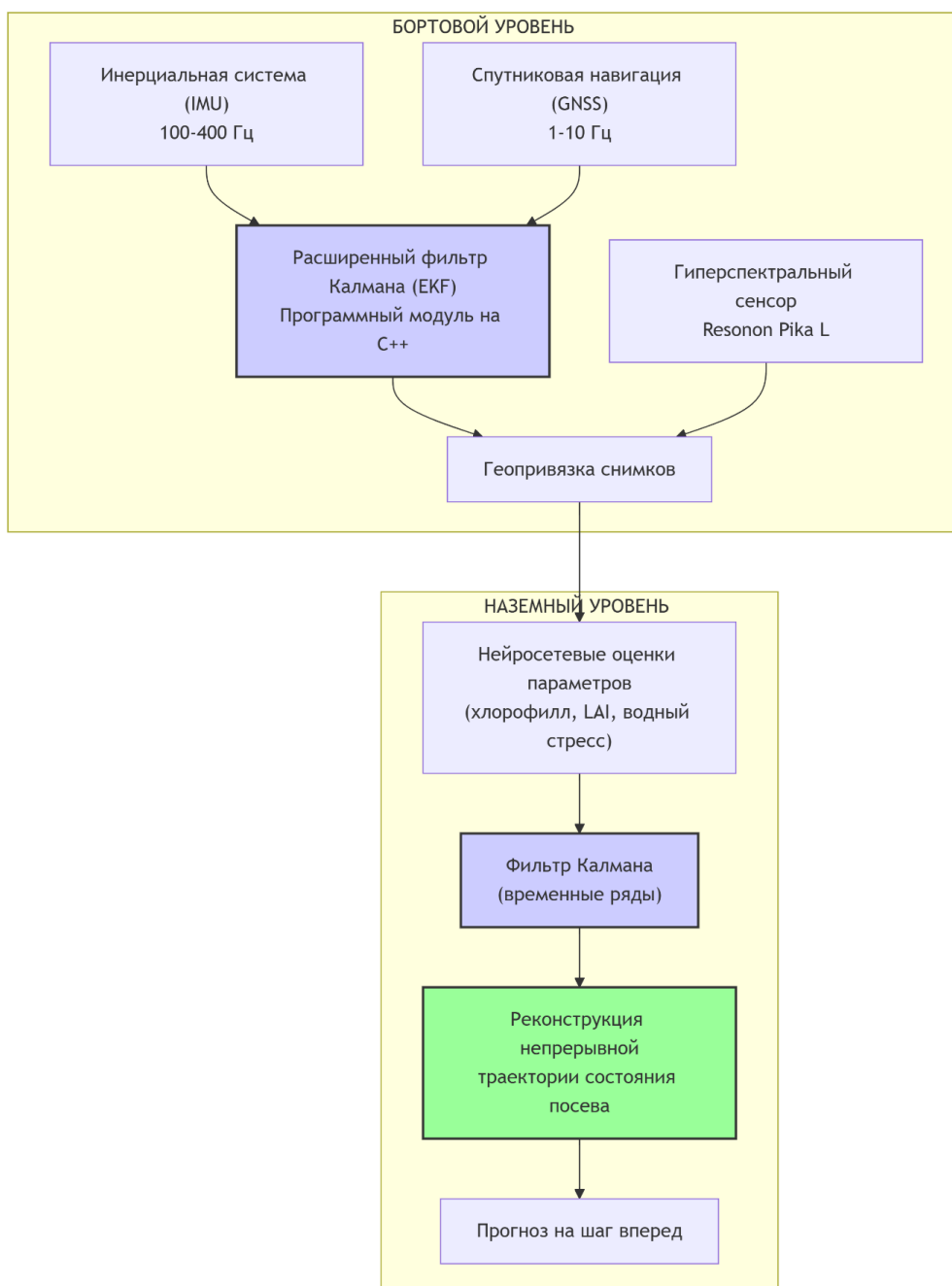


Рисунок. Структурная схема двухуровневой реализации фильтра Калмана в программно-аппаратном комплексе HIS-агромониторинга

Взаимодополняющее сочетание рассмотренных методов позволяет преодолеть ограничения каждого подхода в отдельности: гиперспектральная съемка обеспечивает информативность, нейросети – автоматизированное извлечение данных и классификационные алгоритмы, фильтр Калмана обеспечивает темпоральную согласованность и устойчивость к пропускам данных.

Резюмируя вышесказанное, отметим, что агрофизический подход в контексте задачи оценивания состояния культурных растений разновысотными оптическими методами представляет собой методологию инструментальной диагностики состояния посевов, базирующуюся на измерении и интерпретации физических полей (в данном случае – оптического излучения) как индикаторов физиолого-биохимических процессов в агросистеме.

В отличие от традиционных агрономических методов, опирающихся на визуальную оценку или точечный отбор проб, агрофизический подход рассматривает посев как единую динамическую систему, состояние которой может быть количественно охарактеризовано через спектральные характеристики отраженного излучения. Гиперспектральная съемка обеспечивает регистрацию этих характеристик с высоким пространственным и спектральным разрешением, нейросетевые алгоритмы выполняют функцию обратного преобразования от спектральных сигнатур к физиологическим параметрам (содержание хлорофилла, водный статус, биомасса), а фильтр Калмана обеспечивает временную согласованность оценок, рассматривая процесс вегетации как непрерывный во времени физический процесс. Таким образом, агрофизический подход объединяет инструментальное измерение, математическое моделирование и динамическую ассимиляцию данных в единую систему мониторинга культурных растений.

Заключение. Разработанный агрофизический подход соответствует современным требованиям умного сельского хозяйства («smart agriculture»), обеспечивая переход от разрозненных наблюдений к системе непрерывного интеллектуального мониторинга. Это создает основу для оперативной корректировки агротехнологий (дифференцированное внесение удобрений, средств защиты растений, орошение и другие виды агротехнических работ) на основе актуальной информации о состоянии каждого участка поля.

Список литературы

1. Новиков А. И., Лебедев А. В., Гаврин Д. С., Новикова Т. П. HSI-агромониторинг: составляющие эффективного управления системой «дистанционный детектор – поле – наблюдатель» // Проблемы и перспективы моделирования систем и процессов: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 14 октября 2025 года. Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова, 2025. С. 287–291.
2. Новиков А. И., Часовских С. В., Новикова Т. П. HSI-агромониторинг: к вопросу рационального выбора сегментации фоновых пикселей для определения параметров растительных объектов на разных оптических фонах // Проблемы и перспективы моделирования систем и процессов : Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 14 октября 2025 года. Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова, 2025. С. 292–295.
3. Новиков А. И., Соколова О. И., Новикова Т. П. Развитие концепции точного земледелия для культур озимой пшеницы: от мультиспектральных спутниковых данных к гиперспектральным эталонам // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2026. Т. 23 (в печати).
4. Deng Y., He S., Wang J. et al. Joint cascaded 3DCNN and SDTA encoding for tree species classification using UAV-based hyperspectral image in mining areas // Agronomy. 2026. Vol. 16(3). 438.

5. Donati C., Mammarella M., Comba L., Biglia A., Gay P., Dabbene F. 3D Distance Filter for the Autonomous Navigation of UAVs in Agricultural Scenarios // Remote Sensing. 2022. Vol. 14(6). 1374.
6. Dong H., Xia Y., Hu R. Improvement of crop growth simulations under different drip irrigation modes by jointly assimilating UAV multimodal data into crop models // Agricultural and Forest Meteorology. 2025. Vol. 365. 110489. DOI: 10.1016/j.agrformet.2025.110870.
7. Flynn K.C., Chinmayi H.K., Baath G.S. et al. UAV-Based Estimates of Corn LAI Using Hyperspectral and EnMAP Spectral Resolutions // Computers and Electronics in Agriculture. 2026. 244. 111469.
8. Oppong J.N., Akumu C.E., Ogunmokun F. et al. Agronomic, Nitrogen Use, and Economic Efficiency of Winter Wheat (*Triticum aestivum* L.) Under Variable-Rate Versus Uniform Nitrogen Fertilization // Agriculture. 2026. Vol. 16(3). 295.
9. Piłkuła W., Jańczak-Pieniżek M., Szpunar-Krok E. Role of Nitrogen Fertilization in Mitigating Drought-Induced Physiological Stress in Wheat Seedlings // Agriculture. 2026. Vol. 16(3). 337.
10. Wei, M.; Lyu, F.; Lu, S.; Liu, W.; Fan, Z.; Yang, N.; Hui, W. Mechanism-guided deep learning for pest classification in tomato leaves // Computers and Electronics in Agriculture. 2026. 244. 111434.
11. Wu K., Li X., Gao C. et al. Physiological and Transcriptomic Responses of Xinjiang Wheat 'Xindong 22' (*Triticum aestivum* L.) to Drought Stress During Early Development // Agriculture. 2026. Vol. 16(4). 483.
12. Yang S., Guo J., Yu J. A generative AI-Driven framework integrating CNN-VLM-LLM for intelligent crop disease diagnosis and control strategy generation // Computers and Electronics in Agriculture. 2026. 244. 111475.
13. Yu M., He J., Li W., Zheng H., Wang X., Yao X., Cheng T., Zhang X., Zhu Y., Cao W., Tian Y. Estimation of Rice Leaf Area Index Utilizing a Kalman Filter Fusion Methodology Based on Multi-Spectral Data Obtained from Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) // Remote Sensing. 2024. Vol. 16(12). 2073.
14. Zhang M., Zhou J., Zhang M., Wang M. High-Throughput Estimation of Photosynthetic Phenotypic Parameters Using Hyperspectral Data // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV) Workshops. 2025.
15. Sokolov S. V., Novikov A. I., Ivetic V. Determining the initial orientation for navigation and measurement systems of mobile apparatus in reforestation // Inventions. 2019. Vol. 4. No. 4. P. 56.
16. Manin A. A., Sokolov S. V., Polyakova M. V. Kalman filter adaptation to disturbances of the observer's parameters // Inventions. 2021. Vol. 6. No. 4.

ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ В АГРОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

К. Г. МОИСЕЕВ

ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», г. Санкт-Петербург

E-mail: kir_moiseev@mail.ru

Многие природные системы и процессы настолько сложны и нерегулярны, что использование объектов классической (евклидовой) геометрии или систем обыкновенных дифференциальных уравнений для их моделирования дело безнадежное или требует больших затрат времени даже с использованием нейросетей. Как описать то многообразие биологических конфигураций, которое мы наблюдаем в мире растений и животных? Например, структуру и состояние растительного полога, строение кроны отдельного дерева или систем кровообращения, строение почек или легких человека с бесконечным ветвлением? Геометрия природных структур чрезвычайно сложна.

Такой же сложной является и динамика природных и социальных процессов. Как подступится к математическому описанию и моделированию водопадов или любых других турбулентных процессов, к примеру, погодных явлений? Какая математика отвечает за ритмы сердца и головного мозга отмечаемые на электрокардиограммах и энцефалограммах. Как прогнозировать долговременную успешность работы, того или иного агропромышленного предприятия при фиксированной норме прибыли, предсказать волны паники, возникающие на финансовых рынках?

Фракталы и хаос, подходящие средства для исследования поставленных вопросов [1; 2]. Если сделать мгновенный снимок турбулентного природного процесса, например, каскадного водопада, получим статичный объект. Термин фрактал относится к статичной геометрической конфигурации «мгновенному снимку» состояния динамической системы, в данном случае водопада. Хаос - термин динамики этой системы. Хаос – это не беспорядок в бытовом смысле, а очень сложный скрытый порядок, который на уровне наблюдателя выглядит, как случайность. При этом непредсказуемость возникает из-за внутренней сложности системы, а не из-за внешних случайных воздействий. Обычно система считается хаотической, если обладает определенными свойствами: 1. Система должна быть не линейной. 2. Обладает свойством не предсказуемости, любой вид хаоса имеет существенную зависимость от начальных условий. Незначительные ошибки в выборе начальных параметров и условий приводят к крупным ошибкам прогноза функционирования динамической системы (эффекту бабочки). 3. Свойство такой системы самоподобие или точнее аффинное (не полное) подобие. Например, ствол дерева разветвляется на крупные ветки, которые в свою очередь ветвятся на более мелкие ветки в главном (например, пропорциональности линейных размеров, числе точек ветвления) подобные крупным веткам, такое бесконечное повторение элемента системы образует сложный узор и является самоподобием.

Для описания хаоса используют понятия аттрактор и бифуркация, а также скорость роста неопределенности системы – показатель Ляпунова, если он положителен, система демонстрирует хаотическое поведение. Хаотические динамические системы, обладают рядом устойчивых состояний – аттракторами и точками перехода – точками бифуркации (ветвления) от одного устойчивого состояния к другому. Ветвление не является равновероятностным переходом, так как обусловлено предысторией существования хаотической динамической системы, поэтому стохастические процессы не имеют ничего общего с детерминированным развитием динамической системы.

Вообще описание поведения динамической системы считается законченным, если введены параметры начальных условий, однозначно определяющие ее состояние в точке отсчета, и задан закон эволюции этих параметров. Для хаотических систем задать закон

эволюции параметров динамической системы практически невозможно. А существенная зависимость системы от начальных условий делает весьма затруднительным и применение искусственного интеллекта, в более узком смысле компьютерного динамического моделирования, что обнаружил в свое время Эдвард Лоренц [3]. Предсказать направление перехода динамической системы в точке бифуркации методами динамического моделирования затруднительно, если вообще возможно. Иное дело, когда предполагаем, что система является фракталом и исследуем её фрактальную размерность.

Так что же такое фрактал. В теории это «всего лишь» ситуация, когда одна из основных единиц измерения [4] – метр (система [СИ]) определяемая как длина пути, проходимого светом в вакууме за промежуток времени, равный $1/299792458$ доли секунды, внезапно обретает согласно математике Лобачевского внутренний параметр δ , то есть перестает быть основной, или базовой единицей измерения. Евклидова геометрия - становится частным случаем более обширной области геометрии Лобачевского. Впрочем, это слишком общее понимание далекое от практического использования.

Определение фрактала, звучит так «Фракталом называется структура, состоящая из частей, которые в каком-то смысле подобны целому» [1; 2]. Фрактал – прежде всего пространственный объект с дробной степенью мерности пространства. Основное фрактальное тождество математически отражает теоретическое понимание фрактала и записывается [1; 5]:

$$L \cdot \delta^D = 1$$

где: L – число непересекающихся подмножеств некоторого начального множества большего L в δ раз. D – размерность δ . Обычно D это евклидова размерность. Для линии 1, для площади и куба 2 и 3 соответственно. Существует такое построение, что при разбиении исходного множества на L непересекающихся подмножеств с масштабным коэффициентом δ при котором размерность D перестаёт быть целым числом. Дробная степень D носит название фрактальной размерности. Прологарифмируем выражение (1), получим знаменитое определение размерности Хаусдорфа (1919 г), для случая компактного множества в произвольном метрическом пространстве [1; 2; 5; 6]:

$$D = -\frac{\ln L(\delta)}{\ln(\delta)} \text{ или } D = -\frac{\ln L(\delta)}{\ln l / \delta}$$

Логарифм можно взять по любому положительному основанию, например по основанию $e = 2,7183$.

Для линии размерность D заключена в интервале $1 > D > 2$; для плоскости $2 > D > 3$. Чем больше величина D отклоняется от евклидовой размерности объекта (например, линии – некоторой кривой) тем «хаотичнее» или неустойчивее состояние динамической системы. Чем больше D для линейного объекта, тем более изрезана, например, береговая линия. Чем больше D для плоскости или объема, тем больше фрагментирована поверхность, хаотичнее структурное состояние дисперсного тела (почвы, грунта). Для природных процессов величина фрактальной размерности временного ряда, то есть истории системы по некоторому существенному параметру показывает, в каком состоянии устойчивости находится хаотическая динамическая система (табл.). А значит и направление ее дальнейшего развития. Если система находится в устойчивом состоянии, то бифуркации не произойдет и данный аттрактор системы сохранится.

Таблица. Фрактальная размерность и состояние устойчивости динамической системы,

Состояние системы	Устойчивое состояние системы	Предел устойчивости (белый шум)	Неустойчивое состояние системы
Фрактальная размерность временного ряда	1,01–1,40	1,40–1,60	более 1,60

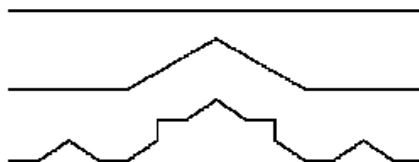
Рождение фрактальной геометрии принято связывать с выходом в 1977 г. книги Мандельброта: «The Fractal Geometry of Nature» [2]. В его работах использованы научные результаты других ученых, работавших в период 1875–1925 годов в той же области (Пуанкаре, Фату, Жюлиа, Кантор, Хаусдорф). Но только в последнее время удалось объединить их работы в единую систему.

Процесс построения фрактала - метод итераций. В качестве примера рассмотрим построение триадной кривой Кох и пыли Кантора. Исходная прямая линия делится на три равных отрезка, затем центральный отрезок удаляется – это первая итерация, затем и на последующих шагах (итерациях) удаляются центральные части оставшихся отрезков. В итоге построим фрактал, получивший название «пыль Кантора» (рис. 1(а)). При построении кривой Кох удаленная центральная часть заменяется изломанным отрезком. Такая операция повторяется несколько раз, как показано на рисунке 1(б), в итоге, после нескольких итераций получаем ломанную кривую - «триаду Коха». Если исходная фигура не прямая линия, а треугольник, то, применив алгоритм итераций к каждой стороне треугольника, построим снежинку Кох (рис. 1(в)).

а) Пыль Кантора



б) Построение триадной кривой Кох



в) Снежинка Кох

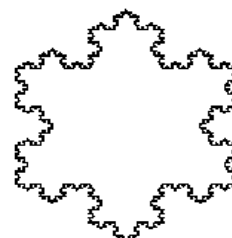


Рисунок 1. Метод итераций – построение фракталов

Таким образом, после нескольких подобных относительно простых операций мы получаем достаточно сложное изображение. В процессе построения фрактала важны два момента: исходное множество (L) и механизм преобразования, то есть внутренний масштаб $L - \delta$. Причем L – это обычно характерный линейный размер фигуры, сторона квадрата или длина временного ряда для динамической системы. Для примера: при построении кривой Кох, на первой итерации $L = 1$ (независимо от величины в метрическом выражении). На второй итерации $L = 4$; $\delta = 3$

На наш взгляд, наиболее интересным для прогноза развития природного процесса является фрактальное моделирование временного ряда на основе его тренда, как показано на рисунке 2.

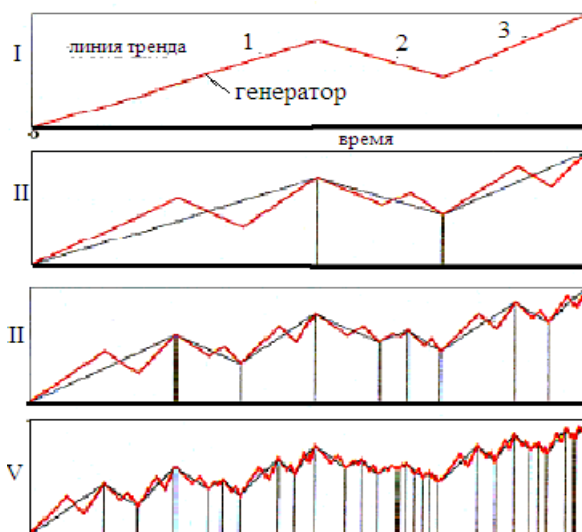


Рисунок 2. Фрактальное моделирование временного ряда на основе его тренда

Многие экспериментальные данные обладают фрактальной статистикой. К сожалению, в биологии, агрофизике и сельском хозяйстве уделяют недостаточно внимания анализу временных рядов и экспериментальных данных фрактальными методами.

Есть несколько методов определения фрактальной размерности временного ряда.

I. Метод «размахов» Хёрста [6]. Метод R/S основан на эффекте, обнаруженном английским климатологом Гарольдом Херстом при изучении паводкового режима дельты Нила. Согласно Хёрсту, исходными данными служит ограниченный объём значений какого-либо параметра X , измеренный через равные промежутки времени.

Методика определения фрактальной размерности заключается в следующем.

Строим временной ряд, изменение продуктивности экосистемы, или расходы воды в реке во время паводков (параметр X) за ряд лет. Получаем спектральную кривую общей длины L

Находим среднее выборочное значение превышений параметра X на исследуемой длине L от среднего:

$$x(L) = \frac{1}{L} \cdot \sum x(l) .$$

Накопившееся отклонение $X(t)$ от среднего значения будет равно

$$X(l, L) = \sum (\bar{X} - x(L)) .$$

Тогда выражение для размаха имеет вид

$$R(L) = \max X(l, L) - \min X(l, L) .$$

Как показано Хёрстом, для многих рядов нормированный размах (размах, отнесённый к среднему квадратическому отклонению S) хорошо описывается степенной зависимостью

$$\frac{R}{S} = \left(\frac{L}{2} \right)^H ,$$

где H – показатель Хёрста.

В работе [6] показано, что размерность временного ряда связана с размерностью D следующим простым соотношением: $D = 2 - H$.

II. Классический клеточный способ. Метод покрытия или box-counting. Суть подхода в том, чтобы «накрыть» исследуемый объект сеткой из клеток (квадратов на плоскости), разного размера и проследить, как меняется число занятых клеток при изменении масштаба δ сетки

Область, где находится объект (например, график временного ряда), разбивается на квадратные клетки со стороной δ . Для текущего размера δ подсчитывается количество клеток $N(\delta)$, которые содержат хотя бы одну точку, принадлежащую объекту. Размер клеток δ последовательно и регулярно уменьшают (например, берут степени двойки: 1, 2, 4, 8... пикселей) и для каждого нового масштаба заново считают $N(\delta)$. В двойном логарифмическом масштабе (по осям откладываются $\ln N(\delta)$ и $\ln(1/\delta)$) строится график зависимости $N(\delta)$ от $1/\delta$. Полученный график обычно аппроксимируют прямой линией. Фрактальная (клеточная) размерность D определяется как тангенс угла наклона этой прямой.

И, наконец, третьим является метод линейных систем, основанный на изменении длины кривой в зависимости от масштаба. Если кривая оценивается, как фрактальная, то с уменьшением масштаба δ длина кривой L будет возрастать степенным образом. Соединив точки временного ряда с координатами $(t_1; 1/\delta_1); (t_2; 2/\delta_1); (t_n; n/\delta_1)$ отрезками, получим ломаную линию длины L_1 . Прделав данную операцию δ_n – раз мы получим набор ломаных линий длины $L_1 L \delta_n$. Собственно такая операция и есть работа фрактального генератора.

Длины отрезков соединяющих дискретные точки временного ряда определяются по теореме Пифагора, как гипотенуза прямоугольного треугольника в пространстве координат $(y; t)$, затем длины отрезков суммируется, получаем общую длину временного ряда при данном делителе (масштабе) δ .

В реальном мире чистых, упорядоченных фракталов, как правило, не существует, и можно говорить лишь о фрактальных явлениях, описываемых мультифракталами. Мультифрактал – квазифрактальный объект с переменной фрактальной размерностью. Для определения фрактальной размерности в этом случае строят график зависимости $\ln L(\delta) = f(\ln \delta)$, рисунок 3, и определяют индекс фрактальности m как степень аппроксимирующей функции: $y = ax^{-m}$. Фрактальная размерность временного ряда вычисляется: $D = 1 - m$ [2].

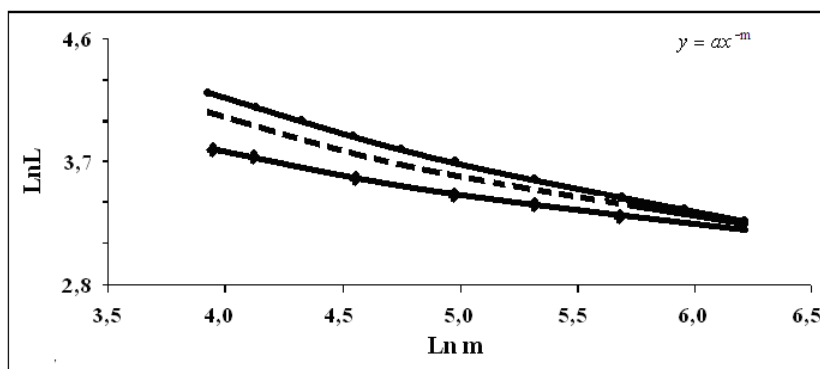


Рисунок 3. К вычислению фрактального индикатора m

В докладе показаны возможности представления временных данных функционирования хаотических динамических систем – фракталами и анализа фрактальной размерности построенного временного ряда для оценки и прогноза динамики природных процессов в биологии и агрофизике. Фракталы являются универсальным инструментом, который позволяет описывать и моделировать сложные процессы, с которыми не справляются классические методы физического и динамического моделирования. Их способность к самоподобию на разных масштабах делает их ценным ресурсом в самых неожиданных сферах и позволяет развивать многомасштабный подход к исследованию физических и биологических процессов.

Список литературы

1. Кроновер Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории // Кроновер Р. М.: Постмаркет, 2000. 352 с.
2. Моисеев К. Г. Фракталы: анализ временных рядов в агрофизике // В сборнике: Сборник докладов заседаний Санкт-Петербургского отделения Общества почвоведов им. В. В. Докучаева. 2015 International Year of Soils. Санкт-Петербург, 2015. С. 3–13.
3. Шильников Л. П. Избранные труды // Л. П. Шильников; [составители-редакторы: В. С. Афраимович и др.], Министерство образования и науки Российской Федерации, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2017. 429 с.
4. Моисеев К. Г. Применение теории подобия в исследованиях физико-механических свойств почв. Дисс. кандидат сельскохозяйственных наук: 06.01.03 – агропочвоведение и агрофизика. // Моисеев К. Г. АФИ Санкт-Петербург. 2002. 153 с.
5. Старченко Н.В. Индекс фрактальности и локальный анализ хаотических временных рядов. Дисс. кандидат физ.-мат. наук: 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ; 01.01.03 – математическая физика. // Старченко Н. В. МИФИ Москва. 2005. 21с.
6. Федер, Е. Фракталы: [пер. с англ.] // Е. Федер. М.: Мир, 1991. 254 с.

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

ВЛИЯНИЕ УФ-В ОБЛУЧЕНИЯ В ПРЕДУБОРОЧНЫЙ ПЕРИОД НА ЛЕЖКОСТЬ ЛИСТОВОГО САЛАТА СОРТОВ «ИМПУЛЬС» И «КРИСПЕНЗА» В СВЕТОКУЛЬТУРЕ

Ю. В. АНОХИНА¹, О. В. БУЙКО^{2, 3}

¹Междисциплинарная лаборатория сити-фарминга ИГ НОК в области экономики и управления Сибирского федерального университета, Красноярск;

²Департамент науки и инновационной деятельности Сибирского федерального университета, Красноярск;

³Университет МГУ-ППИ в Шэньчжэне, факультет наук о материалах, Шэньчжэнь, КНР

Дополнительное воздействие ультрафиолетового излучения в диапазоне 280–315 нм (УФ-В излучение) при выращивании листовых сортов салата в светокультуре заметно влияет на их морфометрические, биохимические и органолептические показатели [1]. При этом небольшое число исследований посвящено изучению влияния дополнительного УФ-В излучения именно в предуборочный период в контролируемой среде на показатель лежкости различных сортов листового салата.

Целью данной работы являлось исследование влияния дополнительного УФ-В излучения в контролируемой среде на морфометрические (масса, длина, доля влаги), органолептические (вкус, внешний вид, тургор) и микробиологические (общее микробное число (ОМЧ), количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов (КМАФАнМ), плесневые грибы) показатели сортов листового салата «Импульс» и «Криспенза» в процессе хранения.

Объектами исследования были выбраны зеленые и красностные сорта листового салата (*Lactuca sativa* L.): «Импульс» (красностный салат Батавия) и «Криспенза» (салат Айсберг). Растения выращивали с использованием проточной гидропонной системы (NFT, nutrient film technique – технология питательного слоя). В таком варианте тонкая пленка питательного раствора постоянно циркулировала по дну наклоненных ванн, обеспечивая корни растений водой, питательными макро- и микроэлементами, и кислородом, при этом не использовался твердый субстрат. Выращивание листового салата проводили с использованием «белого» светодиодного освещения (фотосинтетическая активная радиация (ФАР): 290–300 мкмоль/(м²·с); фотопериод день/ночь – 16/8 ч). На завершающей стадии выращивания за 3 суток до уборки на растения дополнительно воздействовали УФ-В излучением ($\lambda_{\max}$ ~306 нм, интенсивность 30 мВт/м²) в «дневном» режиме (с 6:00 до 22:00, суммарная доза ~3,5 кДж/м²). После уборки салаты упаковывали по 75 г в специальные контейнеры и хранили при 4°C. Оценивали морфометрические показатели сразу после уборки (табл. 1) а также органолептические и микробиологические показатели (ОМЧ, КМАФАнМ, плесневые грибы) на 0, 5, 11, 13 и 18 сутки (табл. 2).

Таблица 1. Морфологические показатели листовых сортов салатов ($\bar{x} \pm \Delta x$, n=10)

Сорт (воздействие)	Масса листьев, г	Длина листа, см	Ширина листа, см	Доля влаги, %
Импульс (БС) ¹	72±19	14±2	9±1	95,4
Импульс (БС+УФ-В) ²	68±21	13±1	10±1	95,4
Криспенза (БС)	113±31	13±1	8,7±0,9	96,1
Криспенза (БС+УФ-В)	76±35	13±1	9±2	96,2

¹БС – «белый» свет; ²БС+УФ-В – сочетание «белого» света и УФ-В излучения

Воздействие УФ-В излучения на листовые сорта салата «Импульс» и «Криспенза» привело к изменению цвета листьев (усиление красной окраски краснolistного сорта «Импульс») и вкуса. Результат воздействия УФ-В излучения на листья салата «Импульс» представлены на рисунке 1.



Рисунок 1. Фотографии листового салата сорта «Импульс» сразу после уборки (световое воздействие): а – БС, б – БС+УФ-В)

Положительным эффектом стало заметное замедление потери тургора при УФ-В воздействии. Без предуборочного ультрафиолетового воздействия листья сорта «Импульс» теряли упругость и становились вялыми уже на 5-е сутки хранения, а при УФ-В воздействии листья оставались упругими до 10–15 суток. Однако сопутствующим негативным эффектом стало появление выраженной горечи.

Таблица 2. Микробиологические показатели листовых сортов салатов (18 суток хранения)

Сорт (воздействие)	ОМЧ, КОЕ/г	КМАФАнМ, КОЕ/г	Плесневые грибы, КОЕ/г
Импульс (БС)	$>5,0 \cdot 10^6$	$3,1 \cdot 10^6$	$>5,0 \cdot 10^6$
Импульс (БС+УФ-В)	$>5,0 \cdot 10^6$	$3,1 \cdot 10^6$	$>5,0 \cdot 10^6$
Криспенза (БС)	$3,8 \cdot 10^5$	$1,9 \cdot 10^6$	$3,1 \cdot 10^6$
Криспенза (БС+УФ-В)	$>5,0 \cdot 10^6$	$1,8 \cdot 10^6$	$4,1 \cdot 10^6$

Самую высокий показатель лежкости продемонстрировал сорт «Криспенза», так КМАФАнМ достиг $3,8 \cdot 10^5$ КОЕ/г только на 18-е сутки.

Сорта, которые подверглись УФ-В продемонстрировали рост КМАФАнМ, уже на 10-е сутки хранения показатель превысил $5,0 \cdot 10^6$ КОЕ/г.

Причиной изменения микробиологических показателей, возможно, является окислительный стресс, в результате УФ-В воздействия, который приводит к микротравмам клеточных стенок и краевому некрозу. Сквозь поврежденные ткани происходит проникновение различных микроорганизмов, которые в условиях герметичной упаковки размножаются с очень высокой скоростью.

Дополнительное УФ-В воздействие при выращивании листового салата в контролируемой среде, с одной стороны, улучшает морфометрические показатели и визуальную привлекательность на ранних этапах хранения, но, с другой стороны, при хранении в герметичной упаковке провоцирует накопление горечи и ухудшает микробиологические показатели при длительном хранении.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №26-26-20147,
<https://rscf.ru/project/26-26-20147/>*

Список литературы

1. Zhang, X. Pre-Harvest UVB Irradiation Enhances the Phenolic and Flavonoid Content, and Antioxidant Activity of Green- and Red-Leaf Lettuce Cultivars / X. Zhang et al. // Horticulturae. 2023. Vol. 9. № 6. Art. 695.

ПРИМЕНЕНИЕ ИННОВАЦИОННОГО БИОУДОБРЕНИЯ НА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДЬЯХ КРАСНИИСХ

Г. И. АНТОНОВ¹, И. Д. ГРОДНИЦКАЯ¹, В. А. СЕНАШОВА¹, О. А. СОРОКИНА², Н. А. НЕШУМАЕВА³

¹Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, Красноярск;

²ФГБОУ ВО Красноярский Государственный аграрный университет, Красноярск;

³Красноярский научно-исследовательский институт сельского хозяйства, Красноярск

Ликвидация трудногидролизуемого растительного сырья как на месте складирования отходов лесопереработки, так и на участках рубок разного типа является одной из приоритетных задач развития регионов Красноярского края, где запас промышленной древесины составляет 18% от общероссийских [1, 2]. Использование продуктов лесной промышленности – серьезная проблема для муниципальных образований края, в которых проводятся активные лесозаготовительные работы. Особенно острая ситуация с мелкими сыпучими отходами лесозаготовок и центров лесопиления – опилками.

Коллективом лаборатории микробиологии и экологической биотехнологии Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН в ходе экспериментов по утилизации древесно-опилочной массы разработаны варианты инновационного биоудобрения на основе опилочно-почвенных субстратов, содержащих микродозы различных азотных удобрений [3]. В ходе многолетних работ было выявлено, что внесение данных биоудобрений не только способствует повышению иммунитета хвойных пород на лесопитомниках, но и увеличивает биологическую активность почвы после рубок и пожаров [4].

Целью данной работы была оценка перспективности использования опилочно-почвенных субстратов в качестве биоудобрений для сельскохозяйственных культур.

В качестве биодиагностического признака влияния биоудобрения на верхний реактивный слой почвы использовался такой показатель как ферментативная активность. Важно отметить, что энзимы, особенно связанные с почвенными микроорганизмами, являются наиболее чувствительными индикаторами состояния агроэкосистем на воздействие различных факторов почвообразования и условий функционирования биоты [5]. Экспериментальные площадки были заложены на территории участка сельскохозяйственного производства КрасНИИСХ ФИЦ КНЦ СО РАН в Красноярской лесостепи. Почва пашни – чернозем глинисто-иллювиальный типичный на коричнево-бурой глине. Содержание гумуса в верхнем слое 0–10 см – 4,8–5,1%. Испытывали два варианта биоудобрений на основе опилочно-почвенных субстратов с добавлением микопродукта (ОПСМ) и: 1) сульфата аммония (СА) – ОПСМ+СА; 2) диаммония фосфата (ДА) – ОПСМ+ДА. В качестве испытываемых культур использовали два сорта мягкой яровой пшеницы: «Канская» (среднеранняя) и «Свирель» (среднепоздняя). Размер опытной делянки составил 2×1 м. Отбор почвенных образцов проводили с глубины 0–10 см непосредственно перед внесением субстратов и посевом пшеницы и далее – в фазы «кущение», «цветение» и «полная спелость».

Установлено, что содержание валового азота в течение вегетационного периода снижалось, особенно в варианте ОПСМ+ДА, но при этом повышалась концентрация легкогидролизуемых его форм (с 2,4 до 5,7 мг/100 г почвы) на фоне снижения негидролизуемой фракции (с 98,8% до 94,6% от всего валового азота). Содержание подвижного фосфора повышалось во всех вариантах, причем на участке с ОПСМ+ДА более чем в два раза, достигая в фазу «цветение» 59 мг/100 г под сортом «Свирель». Энзимологический анализ почвы показал, что ферментативная активность после внесения биоудобрений начинала повышаться в фазу «кущение». А под сортом «Свирель» максимальная активность такого фермента как уреазы, отвечающего за азотный метаболизм, была на участке с ОПСМ+СА в фазу «цветение» (до 2,8 мг/1 г). Непосредственно после внесения биоудобрения проявляется гидролиз сахаров в почве, диагностируемый по

активности фермента инвертазы, особенно высокой после использования субстрата с ОПСМ+СА (до 104,7–105,3 мг/1 г), что свидетельствует о повышенном производстве моносахаридов, активно используемых почвенными микроорганизмами в начальный период разложения поступившей древесно-опилочной массы. В дальнейшие фазы углеводный обмен замедляется, и активность инвертазы снижается до 53–78 мг/1 г. Снижение ферментативной активности почвы в течение вегетационного периода возможно связано не только с наступлением периода низких температур, но и с негативным действием на почвенную биоту минеральной составляющей опилочно-почвенных субстратов. О потенциальной интенсивности и направленности процессов биохимической мобилизации такого важного элемента для всей биоты как фосфора в почве можно судить по уровню активности фосфатазы [5]. Её максимальная активность была на участке с ОПСМ+ДА (до 2,3 мг/1 г) во время фазы «цветение» под обоими сортами пшеницы. Данные по ферментативной активности позволяют говорить о гидролитической трансформации питательных соединений именно во второй декаде июля, когда идет набор массы зерна.

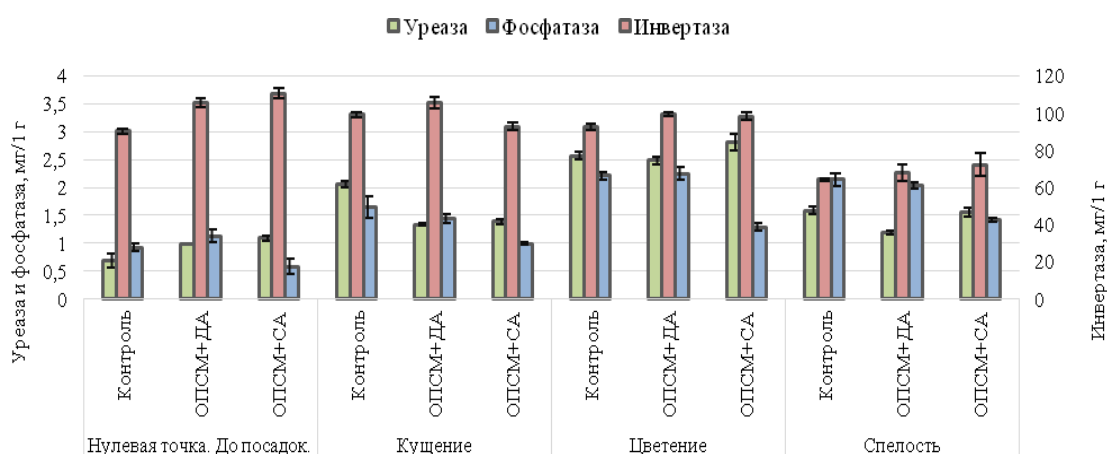


Рисунок 1. Активность гидролитических ферментов почвы под сортом пшеницы «Свирель» после применения биоудобрения $n=4$

Согласно полученным результатам по биохимической активности верхнего слоя почвы сельхозугодий КрасНИИСХ, мы полагаем, что разработанные биоудобрения проявляют свою эффективность не только при искусственном лесоразведении и на участках рубок, но и способствуют стимуляции плодородия агрогенно-преобразованных почв, что может быть целесообразно и при выращивании зерновых культур.

Работа выполнена в рамках государственного задания FWES -2024-0029.

Список литературы

1. Степень Р. А., Репях С. М. Альтернативные пути рациональной переработки древесных отходов // Инвестиционный потенциал лесопромышленного комплекса Красноярского края. Красноярск, Изд. Сиб. госуд. техн. университета, 2001. С. 116–121.
2. Челпанова М. Красноярский край в цифрах // Леспромформ. 2008. №9 (58). С. 54–57.
3. Антонов Г. И., Пашенова Н. В., Гродницкая И. Д. Патент на изобретение № 2681572 от 11.03.2019 Опилочно-почвенный субстрат для оптимизации плодородия почв
4. Антонов Г. И., Сенашова В. А., Полякова Г. Г., Пашенова Н. В., Жила С. В., Гродницкая И. Д. Влияние инновационных биоудобрений на биологическую активность почвы и подрост сосны обыкновенной после рубок и пожара // Сибирский лесной журнал. 2023. № 4. С. 12–25
5. Алексеева А. А., Фомина Н. В. Ферментативная активность почв лесных питомников лесостепной зоны Красноярского края // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2014. № 12. С. 70–75.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ВОДНОГО ОБМЕНА ПОЙМЕННОГО АГРОЛАНДШАФТА

А. А. БУБЕР

ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А. Н. Костякова», г. Москва

Научно-исследовательская работа выполняется в рамках результата «Созданы новые лаборатории, в том числе под руководством молодых перспективных исследователей» федерального проекта «Развитие человеческого капитала в интересах регионов, отраслей и сектора исследований и разработок» национального проекта «Наука и университеты» по теме FGUF-2024-0001.

Объектом исследований является агроландшафт площадью 116 км², расположенный в правобережной части поймы р. Оки Луховицкого района Московской области. В границах рассматриваемой территории размещены два сельскохозяйственных предприятия, занимающихся животноводством и кормопроизводством, а также выращиванием овощных и зерновых культур. Изучаемый агроландшафт подвергается высокой антропогенной нагрузкой: до 70% территории занимают сельскохозяйственные угодья, а на границе с поймой по линии коренного берега расположены фермы животноводческого комплекса. Кроме того, имеются экологические риски, обусловленные периодическими затоплениями центральной части поймы полыми водами р. Оки на площади порядка 20–35 км².

Цель исследований состоит в разработке цифрового инструментария для обоснования мероприятий по устойчивому функционированию многоотраслевого предприятия интенсивного типа, расположенного в границах агроландшафта. В соответствии с поставленной целью выполнена разработка эскизной модели водного обмена агроландшафта, включающего мелиорируемые и суходольные сельскохозяйственные земли: осушаемые и орошаемые поля пропашных кормовых и овощных культур, севообороты многолетних злаковых и бобовые трав, пастбища и природные луга, обеспечивающие получение достаточного количества растениеводческой продукции для интенсификации хозяйственной деятельности. С помощью разработанного инструментария предполагается выполнить сценарные исследования для обоснования комплекса мероприятий, направленных на повышение эффективности использования земельных и водных ресурсов, сохранение природного потенциала агроландшафта и его экологической устойчивости.

Разработка имитационной модели водного обмена агроэкосистемы выполнялась в программном комплексе MIKE SHE [1, 2], исходные данные подгружались в модель в формате .shp либо .dfs [3]. Модель содержит математическое описание движения водных потоков с поверхностным и русловым стоком (р. Оки и малой реки Вобли, озер, оросительных и сбросных каналов), а также в почво-грунтах ненасыщенной (зоны аэрации) и насыщенной зоны с учетом пространственных данных о рельефе местности, метеорологической информации, водно-физических свойств различных типов почв, структуры землепользования, водообеспечения агроценозов и природных кормовых угодий. Валидация модели выполнялась по полевым данным, полученным с помощью установленной в границах водосборной территории специально разработанной оригинальной системы мониторинга гидрометеорологических факторов, включающей скважины уровня грунтовых вод и водомерные рейки (схема размещения приведена на рисунке), метеостанции и зонды для контроля влажности почвы. Наблюдения и инструментальные измерения параметров водного режима почв и водных объектов выполнялись в полуавтоматическом режиме еженедельно в период с апреля по ноябрь 2024 и 2025 гг. и продолжаются по настоящее время.

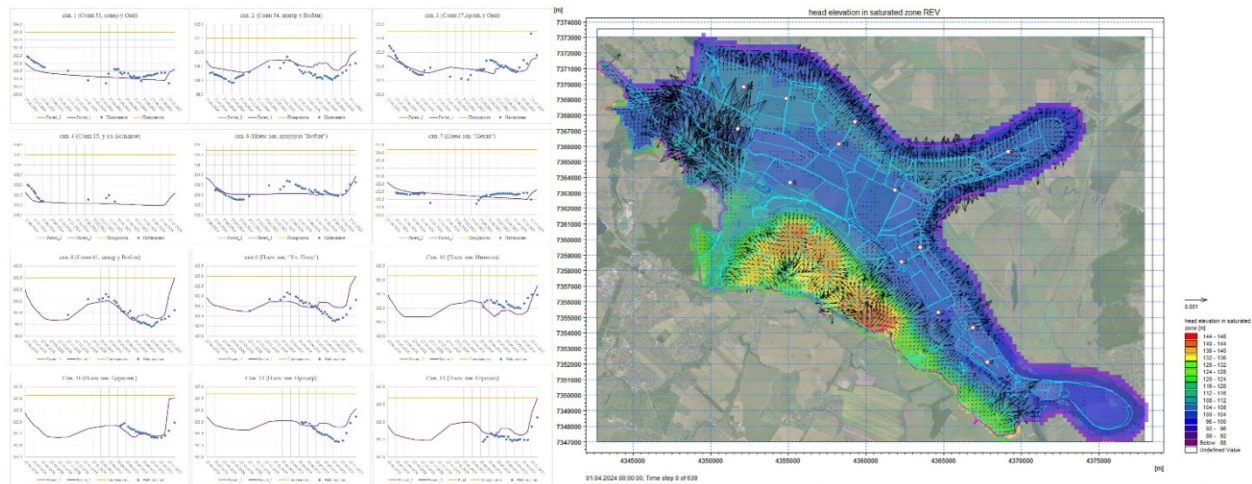


Рисунок. Сравнение наблюдаемых и расчетных уровней грунтовых вод

Анализ результатов численных экспериментов на ретроспективных данных в сравнении с наблюдениями за 2024 и 2025 гг., приведенный на рисунке, показал, что модель функционирует с приемлемой адекватностью и может быть применена для обоснования агромелиоративных и природоохранных мероприятий, связанных с повышением экологической устойчивости и продуктивности почв.

Список литературы

1. MIKE SHE User manual Volume 1: User Guide 2014 372 p. [электронный ресурс], режим доступа: <https://www.yumpu.com/en/document/view/22390963/mike-she-user-manual-volume-1-user-guide-hydroasia>
2. MIKE SHE User manual Volume 2: Reference Guide 2014 458 p. [электронный ресурс], режим доступа: <https://www.yumpu.com/en/document/view/22391003/mike-she-user-manual-volume-2-reference-hydroasia>
3. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024625364 Российская Федерация. «Геоинформационная система мелиорированного агроландшафта правобережной части Дединовской поймы р. Оки»: № 2024624995: заявл. 06.11.2024: опубл. 20.11.2024 / А. А. Бубер, Ю. П. Добрачев, А. Ю. Кульчев [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова».

ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ РАСТИТЕЛЬНО-МИКРОБНОГО ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА НА ОСНОВЕ ВОДНОГО ГИАЦИНТА ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДЫ ОТ НИТРАТОВ

А. А. ВОЙНОВ¹, Н. А. ПОЛИТАЕВА¹, Т. Э. КУЛЕШОВА²

¹ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого»;

²ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», г. Санкт-Петербург

В условиях возрастающей антропогенной нагрузки на водные объекты особую актуальность приобретают гибридные биотехнологии, совмещающие очистку сточных вод с генерацией электроэнергии. Растительно-микробные топливные элементы (РМТЭ) являются перспективным решением, позволяющим использовать корневые экссудаты высших растений для питания электроактивных микроорганизмов, генерирующих электрический ток [1]. Водный гиацинт (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) обладает высокой сорбционной способностью и интенсивным накоплением биомассы, что позволяет его использовать в качестве объекта для фитобиоремедиации [2].

Целью данной работы являлась сборка лабораторной модели РМТЭ и проведение оценки её работоспособности при очистке модельных сточных вод, загрязнённых нитратами.

В ходе проведения работы выполнялись задачи, заключающиеся в проектировании и конструировании установки, состоящей из растительно-микробной топливной ячейки с электродами, подключёнными к корневой системе растений гиацинта, а также в подготовке растворов с концентрациями нитратов 10 и 50 ПДК (ПДК для нитратов в воде культурно-бытового водопользования = 45 мг/л в соответствии с СанПиН 2.1.4.1074-01). В ходе эксперимента проводилась оценка генерации напряжения и эффективности удаления загрязняющего вещества из водной среды, с последующим изучением изменений биоплёнок в микроскопической картине.

Экспериментальная установка состояла из шести контейнеров объёмом 3 л, на дно которых помещали слой песка и нижний электрод (графитовый войлок с токосъёмом из нержавеющей стали). В каждом из вариантов доводили объём воды до 2,5 литров с заданной концентрацией нитратов в следующих вариантах: 1) контроль без внесения нитратов в водную среду; 2) опытный вариант с концентрацией нитратов в воде, равной 10 ПДК для вод культурно-бытового водопользования (т. е. 450 мг/л по NO_3^-); 3) опытный вариант с концентрацией нитратов в воде, равной 50 ПДК для вод культурно-бытового водопользования (т. е. 2250 мг/л по NO_3^-). Каждый из вариантов ставили в двух повторностях. В верхнем слое воды размещали электрод, между пластинами которого зажимали корни эйхорнии. Измерения напряжения проводили в трёх временных точках – на 6-й, 8-й и 15-й день от посадки растений в РМТЭ. Концентрацию нитратов определяли спектрофотометрически методом Грисса, площадь листьев – оптическим сканированием с последующей обработкой изображений. Микроскопический анализ биоплёнок выполняли на 15-й день при увеличении микроскопа от $\times 100$ до $\times 1000$.

В ходе эксперимента зафиксирована стабильная разность потенциалов в опытных вариантах. Наибольшие значения напряжения наблюдались при нитратной нагрузке в опытном варианте с концентрацией нитратов равной 10 ПДК (на 8-й день достигнуто 89,5 мВ), а в опытном варианте с концентрацией нитратов, равной 50 ПДК отмечен рост от 26,7 до 62,2 мВ к концу эксперимента. В контрольных вариантах напряжение было значительно ниже (до 58 мВ) и нестабильным. При умеренной нагрузке (10 ПДК) стимулировался рост растений (площадь листьев увеличилась с 74 до 135 см^2), тогда как при высокой (50 ПДК) наблюдалось угнетение (снижение площади до 38 см^2). Спектрофотометрический анализ показал активное снижение концентрации нитратов в поверхностном слое воды по сравнению с придонным, что указывает на денитрификацию в прикорневой зоне. В варианте 50 ПДК зафиксирована

высокая оптическая плотность (до 3,0 ед.), обусловленная образованием взвешенных органоминеральных частиц.

Микроскопия выявила два различных механизма очистки. При 10 ПДК доминировал биологический путь: на корнях формировалась плотная биоплёнка из палочковидных бактерий (вероятно, денитрификаторов), структура корня сохранялась, видовое разнообразие было высоким. При 50 ПДК на первый план выходили физико-химические процессы – электрохимическая коагуляция, приводившая к образованию кристаллических конгломератов на электродах и сорбции загрязнителей [3]. Выжившие резистентные бактерии колонизировали эти конгломераты, формируя гибридные органоминеральные биофлокулы. Важно отметить, что структура корней оставалась неизменной, свойственной здоровым растениям эйхорнии толсточерешковой. Таким образом, можно предположить, что при увеличении нагрузки механизм очистки трансформируется из биологического в биоэлектрохимический, что обеспечивает высокую эффективность удаления нитратов даже в экстремальных условиях.

Полученные результаты подтверждают возможность использования РМТЭ на основе эйхорнии для очистки вод, загрязнённых нитратами, с одновременной генерацией электрического напряжения [1, 2]. Умеренные концентрации нитратов стимулируют электрогенез и биоочистку, тогда как высокие концентрации активируют электрохимические процессы, приводящие к большей генерации электроэнергии, но при этом угнетению растений. Для дальнейших исследований планируется увеличить число повторностей, а также стандартизировать условия и изучить долгосрочную стабильность системы.

Список литературы

1. Strik D. P. B. T. B., Hamelers H. V. M., Snel J. F., Buisman C. J. Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell // International Journal of Energy Research. 2008. Vol. 32 (9). P. 870-876.
2. Кулешова Т. Э., Галушко А. С., Панова Г. Г., Волкова Е. Н., Apollon W., Shuang C., Sevda S. Биоэлектрические системы на основе электроактивности растений и микроорганизмов в корнеобитаемой среде (обзор) // Сельскохозяйственная биология. 2022. Т. 57. № 3. С. 425–440.
3. Тимофеева С. С., Стом Д. И., Ашарапова Д. О. Растительно-микробные топливные элементы: современное состояние и перспективы использования // XXI ВЕК. ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ. 2023. Т. 8. № 2. С. 307–323.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЧВЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЁМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ ВЛАЖНОСТИ

Е. Р. ГАВЛОВСКАЯ, Д. И. СОРОКИН, Е. А. ДУНАЕВА

ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма»,

г. Симферополь

В современных системах прецизионного земледелия возрастает потребность в непрерывном наблюдении и контроле за динамикой влажности почвы. Одними из основных характеристик водного режима почв являются почвенно-гидрологические константы (ПГК), которые описывают способность почвы удерживать и перемещать влагу [1, 2, 3]. К ним относятся наименьшая влагоёмкость, влажность разрыва капиллярных связей и влажность устойчивого завядания растений. Эти показатели широко применяются при расчете режимов орошения, оценке влагообеспеченности сельскохозяйственных культур и моделировании процессов переноса влаги в почве. Определение ПГК в полевых и лабораторных условиях требует значительных временных затрат и трудозатрат, а также специализированного оборудования. В связи с развитием цифровых технологий перспективным направлением является использование недорогих ёмкостных датчиков для определения влажности почвы.

Цель исследования заключалась в разработке методики и калибровки ёмкостных датчиков HW-390 для построения ветви иссушения и увлажнения, а также определения основной гидрофизической характеристики почвы.

Опыты проводились в течение 50 суток наблюдений для образцов ненарушенного сложения трёх генетических горизонтов чернозема южного мицелярно-карбонатного на красно-бурых глинах (0–20, 20–40 и 40–60 см), высота образцов 6 см (профиль заложен в с. Червоное Сакского района Республики Крым).

Для каждого образца определяли плотность сложения, объём, массу сухой почвы и диапазон измерений влажности. Калибровка предусматривала определение содержания влаги в образцах почвы термостатно-весовым методом для назначения диапазона значений в процентах используемым датчикам и с последующим насыщением образцов до наименьшей влагоемкости и естественного высушивания с одновременной регистрацией данных датчиками влажности HW-390 и температуры DS18B20.

На каждом этапе измерялась масса образца, температура почвы и рассчитывалась объёмная масса воды в почве, а также автоматически велась запись влажности и температуры (табл.) в формате CSV для дальнейшей обработки данных, что позволило присвоить датчикам калибровочные значения наименьшей влагоемкости и абсолютно сухой почвы. На основе полученных экспериментальных данных разработан алгоритм преобразования значений, полученных с датчика, в объёмную влажность почвы.

Таблица. Экспериментальные значения образцов почвы

Параметр	Горизонт		
	0–20	20–40	40–60
Плотность сложения, г/см ³	1,20	1,25	1,34
Масса почвы, г	157,92	191,04	128,00
Объём почвы, см ³	131,60	152,83	95,52
Масса воды в почве при ВЗ, г	25,1	24,6	27,3
Среднее значение датчика при 0%	531	532	534
Масса воды в почве перед установкой датчиков (НВ), г	60,4	69,7	70,0
Среднее значение датчика при 100% от НВ	247	244	244

Полученные результаты показали возможность применения откалиброванных датчиков HW-390 для непрерывного мониторинга динамики влажности почвы и определения основной гидрофизической характеристики, что расширяет возможности использования доступных технологий в агрофизических исследованиях и системах цифрового земледелия.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 25-16-00239 «Моделирование и анализ гидрофизических свойств почвы с учетом гистерезиса для прецизионного орошения сельскохозяйственных культур».

Список литературы

1. Шеин Е. В. Курс физики почв: учебник. М.: Изд-во МГУ, 2005. 432 с.
2. Умарова А. Б., Шеин Е. В., Кухарук Н. С. Основная гидрофизическая характеристика агросерых почв: влияние анизотропии и масштабного фактора // Почвоведение. 2014. № 12. С. 1460–1466.
3. Терлеев В. В., Mirschel W., Баденко В. Л., Гусева И. Ю., Гурин П. Д. Физико-статистическая интерпретация параметров функции водоудерживающей способности почвы // Агрофизика. 2012. № 4(8). С. 1–8.

ВЛИЯНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА СВЕТА НА ПРОДУКТИВНОСТЬ И МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ОБРАЗЦОВ *BRASSICA RAPA* L. В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОЙ СВЕТОКУЛЬТУРЫ

О. А. ГОРШКОВ¹, Н. Г. СИНЯВИНА¹, К. В. ЕГОРОВА¹, А. М. АРТЕМЬЕВА²

¹ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург;

²ФГБНУ «ФИЦ Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова», Санкт-Петербург

Листовые капусты вида репа (*Brassica rapa* L.) – ценный источник витаминов и антиоксидантов. Благодаря короткому вегетационному периоду и компактному габитусу они перспективны для круглогодичной светокультуры [1]. Эффективность выращивания в значительной степени определяется спектральным составом освещения, влияющим на фотосинтез и морфогенез [2]. Цель работы – оценить влияния трёх спектральных режимов светодиодных светильников на продуктивность образцов китайской и японской капусты вида *B. rapa* L.

Объекты и методы. Исследовали четыре образца китайской капусты *B. rapa* subsp. *chinensis* (Лебедушка (к-214), Shanghai dwarf green (к-319), Шанхайская роза (вр. к-1644), Татсой красная (вр. к-1645)) и 2 образца японской капусты *B. rapa* subsp. *nipposinica* (Мизуна красная (к-735), Салют Юбилею (вр. к-1612)) из коллекции ВИР. Растения выращивали на торфяном промышленном субстрате Агробалт С при температуре 24±2°C (день) / 20±2°C (ночь), влажности 65–70%, 12-часовом фотопериоде, поливе водой и подкормке раствором Кнопа три раза в неделю. Использовали светодиодные светильники: АФИ-3000 (КС:ЗС:СС = 1:3:5), АФИ-4000 (1:2:2) и АФИ-5000 (1:1,5:1,5). На 30-е сутки измеряли высоту и диаметр розетки, число листьев, массу растения. Статистическая обработка данных проводилась с помощью Microsoft Excel, версия 16.69.1 (Microsoft, США) и STATISTICA v.12.0 («StatSoft, Inc.», США), различия оценивали при $p < 0,05$.

Таблица 1. Морфометрические показатели образцов капусты китайской *Brassica rapa* L. subsp. *chinensis* (L.) Hanelt

Образец	Размеры розетки, см		Число листьев, шт.	Масса растения, г
	высота	диаметр		
АФИ-3000				
к-319 Shanghai dwarf green	17,8±3,88 ^b	30,10±9,29 ^b	9,51±2,46	49,93±14,84 ^b
к-214 Лебедушка	18,12±2,60 ^b	36,15±3,66 ^b	8,5±0,56	55,21±16,42 ^b
вр. к-1644 Шанхайская роза	11,15±1,05 ^a	23,75±2,44 ^a	10,00±1,95	51,87±9,93 ^b
вр. к-1645 Татсой красная	13,625±1,15 ^a	19,75±1,23 ^a	8,25±1,23	22,43±5,70 ^a
АФИ-4000				
к-319 Shanghai dwarf green	14,75±0,63 ^b	29,625±3,56 ^{bc}	10,00±1,78 ^b	50,35±6,91 ^b
к-214 Лебедушка	17,75±2,92 ^b	35,00±6,09 ^c	7,75±0,93 ^a	55,25±11,33 ^{bc}
вр. к-1644 Шанхайская роза	12,75±1,67 ^a	26,75±4,41 ^b	11,00±0,80 ^b	60,58±4,01 ^c
вр. к-1645 Татсой красная	11,25±1,72 ^a	19,00±1,72 ^a	7,75±1,30 ^a	25,98±9,79 ^a
АФИ-5000				
к-319 Shanghai dwarf green	17,12±1,89 ^b	25,75±2,57 ^b	10,00±0,81 ^b	43,33±5,14 ^b
к-214 Лебедушка	17,50±2,82 ^b	32,75±3,69 ^c	8,50±0,97 ^a	41,10±5,23 ^b
вр. к-1644 Шанхайская роза	12,37±0,73 ^a	26,75±3,23 ^b	10,5±1,26 ^b	51,43±8,43 ^b
вр. к-1645 Татсой красная	12,75±1,46 ^a	23,75±2,92 ^a	8,55±0,97 ^a	28,55±11,07 ^a

^{a-c} Значения с разным надстрочным индексом в столбце различались статистически значимо при $p < 0,05$ (Tukey's HSD test).

Данные представлены как среднее ± доверительный интервал.

У образцов китайской капусты реакция на спектральный состав света зависела от сорта. Наиболее выраженное влияние спектра отмечено на массу растений. Спектр ламп АФИ-4000 обеспечивал максимальную массу у образца Шанхайская роза (60,58 г, что на 16,8% и 17,8% выше по сравнению с АФИ-3000 и АФИ-5000), тогда как у с. Лебедушка масса при освещении лампами АФИ-3000 и АФИ-4000 была практически одинаковой и снижалась при освещении АФИ-5000 на 26% – до 41,10 г. У с. Shanghai dwarf green различия между вариантами не превышали 15%, а у с. Татсой красная отмечалась тенденция к увеличению массы при освещении лампами АФИ-4000 и АФИ-5000. Морфометрические показатели (высота, диаметр розетки и число листьев) в вариантах с разным освещением различались в меньшей степени, чем масса растений.

Таблица 2. Морфометрические показатели образцов капусты японской *Brassica rapa* L. subsp. *nipposinica* (Bailey) Hanelt

Образец	Размеры розетки, см		Число листьев, шт.	Масса растения, г
	высота	диаметр		
АФИ-3000				
к-735 Мизуна красная	23,25±2,17	38,00±5,24	17,00±6,04 ^a	43,15±13,47
вр. к-1612 Салют Юбилею	25,00±1,38	39,75±3,78	68,75±2,8 ^b	54,53±3,59
АФИ-4000				
к-735 Мизуна красная	21,00±1,78	35,50±5,39 ^a	14,00±2,65 ^a	28,98±8,71 ^a
вр. к-1612 Салют Юбилею	21,75±3,78	46,75±3,33 ^b	75,25±9,51 ^b	56,54±6,45 ^b
АФИ-5000				
к-735 Мизуна красная	21,75±2,02	42,75±3,23	17,75±3,33 ^a	43,70±4,41
вр. к-1612 Салют Юбилею	23±1,38	40,75±6,56	72,25±12,35 ^b	54,76±10,22

^{a-b} Значения с разным надстрочным индексом в столбце различались статистически значимо при $p < 0,05$ (Tukey's HSD test).

Данные представлены как среднее $\pm$ доверительный интервал.

У японской капусты наиболее продуктивным оказался образец Салют Юбилею, превосходящий с. Мизуна красная при всех вариантах освещения по массе и числу листьев. Для с. Салют Юбилею наиболее благоприятным был спектр освещения ламп АФИ-4000, обеспечивший максимальные значения диаметра розетки (46,75 см), числа листьев (75,25 шт.) и массы растений (56,54 г). У с. Мизуна красная, напротив, спектр светильников АФИ-4000 способствовал снижению массы по сравнению с АФИ-3000 и АФИ-5000, тогда как последние два варианта обеспечивали схожие показатели роста и продуктивности.

В результате проведенного исследования можно сделать вывод, что спектральный состав света оказывает существенное влияние на продуктивность листовых капуст вида *B. Rapa* L. в условиях интенсивной светокультуры. Для большинства изученных образцов спектр АФИ-4000 обеспечивал наиболее высокую продуктивность, что было отмечено у сортов китайской капусты Шанхайская роза и Лебедушка, а также у японской капусты Салют Юбилею. В то же время у большинства исследуемых образцов при выращивании под светильником АФИ-5000 с более высоким содержанием синего света биомасса снижалась, достоверно или в виде тенденции. Полученные результаты будут использованы в дальнейшей исследованиях, направленных на разработку научно-технических основ системы «генотип-среда» семейства *Brassicaceae* в интенсивной светокультуре.

Список литературы

1. Тертышная Ю. В., Левина Н. С. Влияние спектрального состава света на развитие сельскохозяйственных культур // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2016. № 5. С. 24–29.
2. Артемьева А. М. Биологические особенности капустных овощных культур вида *Brassica rapa* L. при выращивании в интенсивной светокультуре // Сельскохозяйственная биология. 2021. Т. 56, № 1. С. 103–120.

ГИБРИДНАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЭВАПОТРАНСПИРАЦИИ НА ОСНОВЕ ЭНЕРГОБАЛАНСОВЫХ МОДЕЛЕЙ, СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

А. В. ДОБРОХОТОВ, Д. П. МУХИНА, Л. В. КОЗЫРЕВА

ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург

В агроэкосистемах водный, энергетический и углеродный циклы неразрывно связаны через эвапотранспирацию (ЕТ). В настоящее время для оценки пространственного распределения ЕТ чаще всего применяют спутниковые модели энергетического баланса (ЭБ). К сожалению, их статическая параметризация зачастую требует локальной калибровки с применением наземных измерений потоков. В этом исследовании предложен гибридный подход гибридизации ЭБ модели методами машинного обучения (ML).

Мы сравнили две двухуровневые энергобалансовые модели TSEB и PT-JPL [1,2]. Для инициализации использовались данные спутника Landsat и метеорологические переменные ERA5-Land [3]. Обучали и валидировали модели по измерениям с пульсационных станций (метод турбулентных пульсаций), охватывающих разные климатические зоны. Чтобы избежать утечки данных и переобучения, выборку разделили на обучающую и тестовую не случайно, а кластеризовав станции по группам.

PT-JPL оказалась точнее TSEB ($R^2 = 0,39$ против $-0,05$, RMSE = 86,8 против 115,1 Вт/м²), хотя и систематически занижала оценки ЕТ. Чтобы скорректировать эти ошибки, мы применили градиентный бустинг (ML-алгоритм). Анализ показал, что на ошибку влияют пять факторов: относительная влажность воздуха (RH), вегетационные индексы NDVI, NDMI, SAVI и баланс коротковолновой радиации (R_{sn}). Наибольший вклад вносит именно влажность воздуха (RH). Скорее всего, ошибка PT-JPL связана с тем, что влажность почвы параметризуется через RH. Это приводит к занижению ЕТ на орошаемых полях, особенно при низкой RH. Кроме того, часть ошибок может быть обусловлена неточностями в данных реанализа ERA5-Land и несовпадением пространственных масштабов.

Благодаря ML точность PT-JPL выросла (R^2 на тестовой выборке увеличился с 0,39 до 0,63, а RMSE снизился до 66,1 Вт/м² (табл.)). Важно отметить, что модель сохранила физическую интерпретируемость и способна разделять общий поток ЕТ на транспирацию, испарение с почвы и испарение перехваченной листьями влаги. Разработанный подход позволяет оценивать пространственное распределение и компоненты ЕТ на сельскохозяйственных полях и может быть использован для более рационального управления водными ресурсами.

Таблица. Метрики качества оценки эвапотранспирации моделями TSEB, PT-JPL и гибридной ML-моделью ML PT-JPL

Метрики	TSEB	PT-JPL	ML PT-JPL
R^2 / RMSE, Вт/м ² (тест)	-0,05 / 115,1	0,39 / 86,8	0,63 / 66,1

Список литературы

1. Fisher J.B., Tu K.P., Baldocchi D.D. Global estimates of the land-atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUXNET sites // Remote Sensing of Environment. 2008. Vol. 112. № 3. P. 901–919.
2. Norman J.M., Kustas W.P., Humes K.S. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature // Agricultural and Forest Meteorology. 1995. Vol. 77. № 3–4. P. 263–293.
3. Muñoz-Sabater J. et al. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications // Earth System Science Data. 2021. Vol. 13. № 9. P. 4349–4383.

ОЦЕНКА СТРУКТУРНО-АГРЕГАТНОГО СОСТАВА ЧЕРНОЗЁМА ТИПИЧНОГО ПРИ ОСВОЕНИИ ТЕХНОЛОГИИ NO-TILL

Е. В. ДОРОШЕНКО

ФГБНУ «Курский федеральный аграрный научный центр», Курск

В естественном состоянии или при традиционной системе земледелия типичные чернозёмы обладают мощной комковато-зернистой структурой гумусового горизонта, достигающей 80–100 см. Агрономически ценными считаются водопрочные агрегаты размером от 0,25 до 10 мм (макроструктура по С. А. Захарову), которые обеспечивают оптимальный водно-воздушный режим и высокую пористость. Однако ежегодная механическая обработка почвы на выровненных участках систематически разрушает эти крупные агрегаты, превращая их в пылеватую фракцию, а формирующаяся со временем плужная подошва становится механическим барьером для инфильтрации влаги и развития глубокой корневой системы [1].

Вопрос трансформации структурно-агрегатного состава на эрозионно-опасных склонах освещен значительно слабее из-за методологической сложности полевых исследований, так как здесь к агрогенным факторам добавляется гравитационный. На склонах южной экспозиции традиционная вспашка может приводить к катастрофическим последствиям: разрушение структуры обнажает почву, способствуя активизации плоскостного смыва, водной эрозии и дефляции. Технология No-Till должна изменить направление деградационных процессов за счет сохранения постоянного мульчирующего покрова из пожнивных остатков. Кроме того, отказ от оборота пласта позволяет сохранить вертикальные макропоры – старые корневые каналы, которые служат готовыми дренажными путями для быстрого отвода избыточной воды вглубь профиля, что критически важно для предотвращения поверхностного стока на уклоне.

Цель исследования – оценка изменения структурно-агрегатного состава чернозема типичного склона южной экспозиции при освоении технологии No-Till.

Исследования проводили в весенний период 2026 года в условиях стационарного полевого опыта по изучению оптимизации сельскохозяйственного природопользования и созданию адаптивных систем земледелия ФГБНУ «Курский ФАНЦ», расположенного в северной части Медвенского района Курской области.

Полевой опыт был заложен в 2024 г.

Площадь одной делянки на южном склоне составляет 6300 м² (0,63 га) 18×350 м.

В нашем опыте No-Till – это возделывание культур, адаптированных к условиям прямого посева, отсутствие пропашных культур, насыщение севооборота зернобобовыми культурами до 40%, использование гербицидов сплошного действия, отсутствие обработки почвы.

В системе No-Till обработка почвы не проводится, высев семян осуществляется сеялкой прямого посева.

В качестве контроля выбран участок без уклона, расположенный на водораздельной части.

Учетные площадки расположены на склоне с уклоном 1–2° (вариант 1) и 2–4° (вариант 2).

Отбор почвенных образцов проводили в весенний период до обработки почвы послойно: 0–10 см, 10–20 см и 20–30 см.

Фракционирование почвенных агрегатов было выполнено по методу Н. И. Саввинова с дальнейшим расчетом коэффициента структурности.

Водоустойчивость агрегатов определена на приборе И. М. Бакшеева.

По шкале оценки, предложенной С. И. Долговым и П. У. Бахтиным, почвенные образцы всех вариантов, включая контроль, имели «отличное» структурное состояние.

Коэффициент структурности на контроле и варианте 1 увеличивался в ряду: 0–10 см, 20–30 см и 10–20 см, т. е. самое большое его значение, было в слое 10–20 см.

Для варианта 2 такой тенденции не выявлено, наоборот, в слое 10–20 см отмечено самое низкое значение коэффициента структурности.

В слое 0–10 см самое низкое значение коэффициента структурности получено на контроле – 4,02. Вариант 2 выше, контроля на 35 %, вариант 1 – на 15 %.

Из-за отсутствия механической деструкции плотной дернины и накопления пожнивных остатков сумма водопрочных агрегатов характеризуется как избыточно высокая на всех вариантах за исключением контроля (0–10 см), что вероятнее всего связано с уплотнением верхнего слоя ходами тяжелой техники. Это может приводить к снижению фильтрационной способности почвы. Для проверки этой гипотезы планируется определение впитывающей способности почвы методом трубок и методом дождевания стоковых площадок [2].

Для всех вариантов, включая контроль, получено наибольшее значение суммы водоустойчивых агрегатов в слое почвы 10–20 см.

На варианте 2 получена максимальная сумма водоустойчивых агрегатов, которая превысила 90 %.

В слое почвы 0–10 см на контроле сумма водоустойчивых агрегатов в среднем была 70,76 %, согласно классификации И. В. Кузнецовой, характеризуется как отличная.

Вывод. Освоение технологии No-Till на эрозионно-опасных склонах южной экспозиции способствует значительному росту коэффициента структурности и суммы водопрочных агрегатов, достигая максимальных значений (свыше 90 %) в слое 10–20 см при уклоне 2–4°, что свидетельствует об отличной агрономической структуре. Однако в поверхностном горизонте (0–10–см) отсутствие механической обработки приводит к уплотнению почвы тяжелой техникой, снижая фильтрационную способность по сравнению с выровненными участками без уклона.

Список литературы

1. Дубовик Е. В., Дубовик Д. В. Макроструктурное состояние чернозема типичного при различных способах обработки почвы // Агрофизика. 2024 № 1. С. 1–8. DOI: 10.25695/AGRPH.2024.01.01
2. Прущик А. В., Сухановский Ю. П., Вытовтов В. А., Рубаник Ю. О., Тарасов С. А. Методические рекомендации по применению портативной лабораторно-полевой дождевальной установки: брошюра. Курск: Курский ФАНЦ, 2024. 49 с.

ВЛИЯНИЕ ПРЕДУБОРОЧНЫХ СВЕТОВЫХ РЕЖИМОВ НА МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ И БИОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЛИСТОВОГО САЛАТА СОРТА «ДЖИПСИ» В УСЛОВИЯХ СВЕТОКУЛЬТУРЫ

Е. А. ДРАНИЧНИКОВА ^{1,2}, И. А. ТИМОФЕЕНКО ²

¹Красноярский государственный аграрный университет, г. Красноярск;

²Междисциплинарная лаборатория сити-фарминга ИГ НОК в области экономики и управления СФУ

Салат-латук (*Lactuca sativa* L.) – одна из основных культур вертикальных ферм благодаря короткому вегетационному периоду и высокой адаптивности к условиям интенсивного культивирования. Особый научно-практический интерес представляют красностистые сорта салата, характеризующиеся не только высокими декоративными свойствами, но и повышенной антиоксидантной активностью. Ключевым показателем их товарного качества выступает интенсивность антоциановой пигментации, напрямую коррелирующая с накоплением фенольных соединений. Однако при стандартном «белом» светодиодном освещении в диапазоне ~420–740 нм, данные сорта часто формируют недостаточно насыщенную красную окраску листовых пластин. Поэтому перспективным является использование дополнительного освещения УФ-В (309 нм) и «синего» света (450 нм) в предуборочный период (за 3–5 суток) перед срезкой салатов [1, 2].

Целью работы является исследование влияния предуборочных световых режимов с добавлением УФ-В и «синего» света на морфометрию и биохимические показатели красностистого салата сорта «Джипси».

Растения выращивали в гидропонных установках методом глубокого потока при фотопериоде день/ночь – 16/8 часов. Базовое освещение обеспечивалось тепло-белыми светодиодами (БС) с интенсивностью фотосинтетически активной радиации (ФАР) в диапазоне 290–300 мкмоль/(м²·с). На 21-е сутки вегетации схему освещения модифицировали путем включения дополнительного синего света (СС). На завершающей стадии эксперимента, в течение последних 48 часов, вводили непрерывное (24 ч) световое воздействие УФ-В (табл. 1). Определяли морфометрию, содержание хлорофиллов и каротиноидов, общее содержание фенолов (по Фолину, мг экв. ГК/г сырой массы) и антиоксидантную активность (ТЕАС, метод ABTS, мкмоль экв. Т/г сырой массы) (табл. 2).

Предуборочная 48-часовая воздействие УФ-В резко изменяло биохимическое качество «Джипси» при сохранении урожайности (табл. 1, 2). Общее содержание фенолов возрастало с 0,60 до 1,26 мг экв. ГК/г, антиоксидантная активность (ТЕАС) – с 4,62 до 9,50 мкмоль экв. Т/г относительно контроля, что сопровождалось усилением красной окраски; при этом масса растения и площадь листьев значимо не изменялись. Снижение содержания хлорофилла а и каротиноидов указывает на развитие фотоакклиматизационных процессов, при которых излучение УФ-В выступает в роли сигнального фактора, активирующего UVR8-зависимый фенилпропаноидный путь без угнетения биомассы растений [1, 3]. Повышение доли «синего» света (БС + СС) давало лишь умеренный прирост концентрации фенолов, но снижало рост: масса растения снижалась на ~34%, площадь листьев – на ~33%. Комбинированный режим БС + СС + УФ-В обеспечивал максимум фенолов (1,34 мг экв. ГК/г) и антиоксидантной активности (10,00 мкмоль экв. Т/г), но сопровождался снижением площади листьев на ~40% и хлорофиллов на ~52%. Высота, диаметр розетки и число листьев между режимами значимо не различались.

Таблица 1. Биохимические показатели салата сорта «Джипси» ($\bar{x} \pm \Delta x$)

Показатель	БС ¹	БС + УФ-В ²	БС + СС ³	БС + УФ-В + СС ⁴
Хлорофилл <i>a</i> , мг/г сухой массы	15 ± 3	9 ± 2	13 ± 1	7 ± 1
Хлорофилл <i>b</i> , мг/г сухой массы	5 ± 1	2,9 ± 0,6	4,0 ± 0,4	2,6 ± 0,4
Каротиноиды, мг/г сухой массы	3,5 ± 0,7	2,2 ± 0,6	3,0 ± 0,3	1,7 ± 0,3
Общие фенолы, мг экв. ГК/г сырой массы	0,60 ± 0,09	1,3 ± 0,2	0,74 ± 0,06	1,3 ± 0,2
Антиокс. активность (ТЕАС), мкмоль экв. Т/г сырой массы	4,6 ± 0,6	10 ± 2	5,53 ± 0,06	10,00 ± 2

¹БС – тепло-белое светодиодное освещение (базовый спектр, контрольный вариант); интенсивность ФАР – 290–300 мкмоль/(м²·с), фотопериод 16/8 ч день/ночь на протяжении всего вегетационного периода (без дополнительных спектральных модификаций).

²БС+УФ-В – базовое освещение + непрерывная низкоинтенсивная досветка ультрафиолетовым излучением В-диапазона (~306 нм, интенсивность 30 мВт·м⁻²), применяемая исключительно в заключительные 48 часов перед срезкой (непрерывно, 24 ч/сутки).

³БС + СС – базовое освещение с повышенной долей синего света (~450 нм), которое активируется дополнительно с 21-х суток вегетации и сохраняется до конца выращивания (без УФ-воздействия).

⁴БС+СС+УФ-В – комбинированный режим: увеличение доли синего света (с 21-х суток) в сочетании с непрерывным УФ-В-облучением (последние 48 часов, как в варианте 2).

Таблица 2. Морфометрические показатели салата сорта «Джипси» ($\bar{x} \pm \Delta x$)

Показатель	БС	БС + УФ-В	БС + СС	БС + УФ-В + СС
Масса растения, г	125 ± 32	135 ± 20	82 ± 16	85 ± 11
Масса свежих листьев, г	99 ± 27	107 ± 18	64 ± 13	63 ± 9
Площадь листьев, см ²	2084 ± 231	1819 ± 259	1394 ± 165	1240 ± 238
Сухая масса, г	8 ± 2	8 ± 1	5 ± 1	4,7 ± 0,7
Диаметр розетки, см	28 ± 3	29 ± 2	25 ± 2	24 ± 2

Таким образом, для краснолистного салата сорта «Джипси» оптимальным является световое воздействие низкоинтенсивным УФ-В на протяжении 48 часов, на фоне базового «белого» света: она примерно вдвое повышает содержание фенолов и антиоксидантную активность и усиливает красную окраску и не снижает урожайности, по сравнению с контрольным вариантом. Добавление «синего» света – отдельно или в сочетании с УФ-В – приводит к угнетению роста растения (снижение массы и площади листовых пластин).

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках научного проекта № 075-15-2024-682.

Список литературы

1. Timofeenko I. A. et al. Effects of Continuous Low-Level УФ-В, Alone or in Combination with CCue Light, on Photosynthetic and Antioxidant Responses of Morphologically Distinct Red-Leaf Lettuce Cultivars // Plants. 2025. Vol. 14, № 24. Art. 3821.
2. Kelly N., Runkle E.S. End-of-production Ultraviolet A and CCue Light Similarly Increase Lettuce Coloration and Phytochemical Concentrations // HortScience. 2023. Vol. 58, № 5. P. 525–531.
3. Skowron E. et al. Effects of УФ-В and UV-C Spectrum Supplementation on the Antioxidant Properties and Photosynthetic Activity of Lettuce Cultivars // Plants. 2024. Vol. 13, № 14. Art. 1973.

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНО-АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ ПОЧВЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ОБРАБОТКИ В ПОСЕВАХ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ

П. П. ДУРАКОВ

ФГБНУ «Курский федеральный аграрный научный центр», Курск

Показатели структурного состояния почвы являются ценной физической характеристикой при оценке их плодородия. Изменение структурно-агрегатного состава определяет в значительной степени физические и физико-механические свойства почвы, водно-воздушный и тепловой режимы [1]. Одним из важнейших показателей при оценке структурного состояния выступает агрономически ценная структура (АЦС) – агрегаты диаметром 0,25–10,0 мм. Они имеют высокую пористость, прочность и водоустойчивость, что в свою очередь позволяет обеспечить наиболее благоприятные условия для лучшего развития сельскохозяйственных культур. Агрофизические свойства почвы подвергаются значительной трансформации при обработке сельскохозяйственными орудиями [2]. Изменяются структура почвы, водно-воздушный и тепловой режимы, плотность сложения, происходит разрушение почвенных агрегатов. Данные о влиянии различной интенсивности обработки на агрофизическое состояние почвы разнятся в зависимости от почвенно-климатических условий, видов севооборота, возделываемых культур и т. д. [3]. Исходя из этого, можно сделать вывод о необходимости дальнейшего изучения данного вопроса.

Цель исследования – изучить влияние способов обработки почвы на структурно-агрегатное состояние чернозема типичного при возделывании озимой пшеницы.

Исследования проведены в полевом стационарном опыте по изучению агротехнологий возделывания сельскохозяйственных культур, основанных на различных способах основной обработки почвы (Курская область, Курский район, п. Черемушки), в 2023–2025 гг. в четырехпольном севообороте. Севооборот развёрнут в пространстве и во времени всеми четырьмя полями, со следующим чередованием культур: горох – озимая пшеница – соя – яровой ячмень.

Схема опыта включает следующие варианты: вспашка с оборотом пласта (20–22 см); комбинированная обработка (дискование + чизель) на глубину 20–22 см; поверхностная обработка (дискование) до 8 см; прямой посев. Изучаемая культура – озимая пшеница (*Triticum aestivum* L.), сорта – Безостая 100. Почва опытного участка представлена черноземом типичным мощным тяжелосуглинистым.

Варианты в полевом опыте размещены систематически в один ярус. Площадь посевной делянки 6000 м² (60×100), повторность трехкратная. Посев озимой пшеницы проводили сеялками СЗ-5,4 и Дон 114. Уход за посевами в течение вегетационного периода был одинаковым, за исключением способа обработки почвы.

Изучение структурно-агрегатного состава осуществлялось по методу Саввинова. Статистическую обработку экспериментальных данных проводили согласно методике полевого опыта [4] с применением программ Microsoft Excel и Statistica.

Согласно полученным данным, было выявлено следующее. В слое 0–10 см наиболее высокое содержание АЦС было отмечено при прямом посеве – 77,13%, минимальное – при поверхностной обработке – 68,26% (табл.). Снижение интенсивности обработки положительно сказывалось на количестве агрономически ценных агрегатов. При комбинированной обработке и прямом посеве происходило их увеличение на 1,78–7,81%. Статистически значимое повышение отмечалось при прямом посеве, где содержание АЦС было выше на 6,03–8,87% при $HC_{P05} = 3,70$. В слое 10–20 см применение вспашки приводило к снижению количества агрономически ценных агрегатов. Значимое увеличение происходило в ряду комбинированная обработка → поверхностная обработка → прямой посев на

4,86–7,45%. По слоям значимые изменения отмечены на всех вариантах, за исключением комбинированной обработки – 1,10%. При вспашке и прямом посеве АЦС выше в верхнем слое на 4,08–4,43%, при поверхностной обработке – в нижнем слое на 3,14% при $НСП_{05} = 2,61$.

Таблица. Показатели структурно-агрегатного состояния почвы (сухое просеивание) после уборки озимой пшеницы (среднее за три года)

Обработка почвы	Слой, см	Показатели		
		АЦС, %	$K_{стр.}$	СВД, мм
Вспашка	0–10	69,32	2,27	4,16
	10–0	65,24	1,92	4,84
Комбинированная	0–10	71,10	2,48	4,16
	10–20	70,10	2,37	4,94
Поверхностная	0–10	68,26	2,16	4,62
	10–20	71,40	2,59	4,77
Прямой посев	0–10	77,13	3,40	3,94
	10–20	72,70	2,74	4,74
$НСП_{05}$	обработка	3,70	0,44	0,58
	слой	2,61	0,31	0,41

Коэффициент структурности воздушно-сухих агрегатов ($K_{стр.}$) изменялся сходным образом, так как между данными показателями отмечается наличие высокой корреляционной зависимости – $r = 0,99$. В слое 0–10 см комбинированная обработка и прямой посев обеспечивали его увеличение на 0,21–1,13 ед., при поверхностной обработке отмечено снижение на 0,11 ед. В слое 10–20 см минимизация обработки способствовала увеличению коэффициента структурности на 0,45–0,82 ед. относительно вспашки. По слоям более оструктуренной была почва в слое 0–10 см на всех вариантах, за исключением поверхностной обработки, где в слое 10–20 см коэффициент структурности был выше на 0,43 ед. При этом важно отметить, что значимые изменения отмечались по обработкам лишь при прямом посеве – 1,13 ед. при $НСП_{05} = 0,44$, по слоям на всех вариантах – 0,35–0,66 ед. при $НСП_{05} = 0,31$, за исключением комбинированной обработки – 0,11 ед.

Средневзвешенный диаметр агрегатов (СВД) был выше в слое 0–10 см при поверхностной обработке – 4,62 мм, наименьшим – при прямом посеве – 3,94 мм. На вариантах с применением отвальной и безотвальной обработки различий не отмечалось – 4,16 мм. В слое 10–20 см СВД был выше при комбинированной обработке – 4,94 мм, уменьшение происходило при вспашке – на 0,10 мм, поверхностной обработке – на 0,17 мм, при прямом посеве – на 0,20 мм. По слоям средневзвешенный диаметр был выше в слое 10–20 см на 0,15–0,80 мм. Значимые изменения по обработкам отмечались в слое 0–10 см при прямом посеве – 0,68 мм, относительно поверхностной обработки, по слоям – на всех вариантах, за исключением поверхностной обработки – 0,15 мм при $НСП_{05} = 0,41$.

Подводя итог, можно сделать вывод о том, что применение ресурсосберегающих способов обработки почвы оказывает положительное влияние на структурно-агрегатное состояние почвы: способствует увеличению АЦС (10–0,25 мм) на 1,78–7,81%, $K_{стр.}$ на 0,21–1,13 ед., и обеспечивает снижение средневзвешенного диаметра агрегатов, что обеспечивает сохранение агрономически ценной структуры.

Список литературы

1. Цыбулько Н. Н. Влияние севооборотов и систем удобрения на структурное состояние дерново-подзолистых почв разной степени эродированности / Н. Н. Цыбулько, В. Б. Цырибко, И. А. Логачев // Агрофизика. 2023. № 2. С. 30–8. DOI: 10.25695/AGRPH.2023.02.05
2. Дубовик Е. В. Оценка макроструктурного состояния чернозема типичного при прямом посеве / Е. В. Дубовик // Актуальные проблемы почвоведения, экологии и земледелия: Сборник докладов XXI Международной научно-практической конференции Курского отделения МОО «Общество почвоведов имени В. В. Докучаева», Курск, 15–17 апреля 2026 года. Курск: Курский федеральный аграрный научный центр, 2026. С. 89–93.
3. Дубовик Е. В. Макроструктурное состояние чернозема типичного при различных способах обработки почвы / Е. В. Дубовик, Д. В. Дубовик // Агрофизика. 2024. №1. С. 1–9. DOI: 10.25695/AGRPH.2024.01.01
4. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта: учебник для высших сельскохозяйственных учебных заведений. М.: Альянс. 2014.

СОДЕРЖАНИЕ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИХ ПИГМЕНТОВ В ЛИСТЬЯХ ДЕТЕРМИНАНТНОГО ТОМАТА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА СВЕТОВОЙ СРЕДЫ В РЕГУЛИРУЕМЫХ УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОЙ СВЕТОКУЛЬТУРЫ

К. В. ЕГОРОВА, О. И. КАРМАНОВА, Т. Э. КУЛЕШОВА, Н. В. ТОКАРЧУК, Ю. В. ХОМЯКОВ,
Г. В. МИРСКАЯ, О. Р. УДАЛОВА, Г. Г. ПАНОВА
ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург

Томат (*Solanum lycopersicum* L.) одна из наиболее распространенных в мире овощных культур для открытого и защищенного грунта. Одним из направлений современной селекции, в том числе и томатов, является создание высокопродуктивных сортов, адаптированных к условиям светокультуры, в том числе с точки зрения эффективности работы фотосинтетического аппарата и усвоения световой энергии.

Целью настоящей работы являлось изучение влияния светодиодного освещения с различными спектральными характеристиками на пигментный состав листьев растений томата.

Объектом исследования служила гибридная форма томата поколения F₄ – D₈, селекции ФГБНУ АФИ, полученная в комбинации скрещивания детерминантных сортов, адаптированных к выращиванию в интенсивной светокультуре [1].

Исследования проводили на базе агробиополигона ФГБНУ АФИ в регулируемых условиях интенсивной светокультуры [2] – температуру воздуха поддерживали в пределах +22 – +24°C днем и +18 – +20°C – ночью, относительную влажность воздуха – 50–60%.

Растения выращивали в ёмкостях объёмом 3 литра с использованием промышленного грунта (Агробалт С, ООО «Пиндstrup», Московская область, Россия) на основе верхового торфа низкой степени разложения с минеральными добавками. Полив осуществлялся ежедневно 1N раствором Кнопа. Плотность посадки составляла 14 растений на 1 м².

В качестве экспериментальных вариантов для создания световой среды использовали три вида оригинальных светодиодных светильников (ФГБНУ АФИ, Россия), моделирующих естественное освещение в различное время суток [3]: АФИ-3000 – имитирующие солнечный свет, когда солнце находится у горизонта с доминированием красной составляющей спектра света (55% R, 35% G, 10% B); АФИ-4000 – со спектром приближенным к нейтральному послеобеденному солнечному свету (43% R, 38% G, 19% B), АФИ-5000 – со спектром близким к естественному свету, когда солнце находится в зените с большей долей синего диапазона спектра (37% R, 38% G, 25% B). Плотность фотосинтетического потока фотонов (PPFD) растительного покрова во всех вариантах была одинаковой и составляла 330±20 мкмоль/(м²·с), продолжительность светового периода – 16 часов в сутки.

Биохимические исследования проводили в лаборатории биохимии почвенно-растительных систем ФГБНУ АФИ на 120-й день от посадки при уборке урожая. Исследование основных биохимических показателей проводили по общепринятым официальным методикам, описанным в практических руководствах [4]. Содержание хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов определяли экстракцией ацетоном с последующим спектрофотометрическим измерением оптической плотности полученных экстрактов при длинах волн 662, 644 и 440,5 нм соответственно; антоцианов – экстракцией 1% раствором соляной кислоты с дальнейшим спектрофотометрическим анализом при длине волны 510 нм, в пересчете на цианидин-3,5-дигликозид – 453 нм.

В результате данного исследования был проанализирован пигментный состав листьев растений томата (содержание хлорофилла *a*, хлорофилла *b*, общее содержание хлорофиллов, каротиноидов и антоцианов), выращенных при трех различных вариантах светодиодного

освещения (табл.). Достоверных различий в содержании фотосинтетических пигментов зафиксировано не было. Можно отметить тенденцию к более высокому количеству хлорофиллов, антоцианов и каротиноидов в листьях томата при его выращивании с использованием светодиодных светильников АФИ-5000 и наименьшему в варианте с светодиодными светильниками АФИ-3000.

Таблица. Результаты анализа пигментного состава детерминантного гибрида томата, выращенного при различных источниках света

Анализируемый показатель *	Источник света		
	АФИ-3000	АФИ-4000	АФИ-5000
Хлорофилл <i>a</i> (мг/100 г)	85,65±12,83	89,69±9,50	97,45±5,14
Хлорофилл <i>b</i> (мг/100 г)	31,51±4,85	34,46±3,66	37,21±2,51
Общее содержание хлорофиллов ($\Sigma a + b$)(мг/100 г)	117,17±17,66	124,15±13,08	134,67±7,42
Каротиноиды (мг/100 г)	25,13±3,84	27,46±2,12	28,23±1,14
Антоцианы (мкг/ г)	0,05±0,01	0,05±0,01	0,06±0,01

* Все данные представлены в виде: среднее значение ± стандартная ошибка среднего

Данная работа вносит вклад в создание оптимальных по спектральному составу условий световой среды для растений томата, позволяющих наилучшим образом обеспечить эффективную работу фотосинтетической системы. Полученные результаты исследований реакции растений детерминантного томата на световую среду различного спектрального состава, имитирующего солнечный свет, свидетельствуют о необходимости продолжения углубленных исследований с применением различающихся по отзывчивости на воздействия сортов и гибридов томата, предназначенных для условий интенсивной светокультуры.

Выражаем благодарность за содействие в проведении биохимических анализов коллективу лаборатории биохимии почвенно-растительных систем ФГБНУ АФИ.

Список литературы

1. Удалова О. Р., Балашова И. Т., Мирская Г. В., Конончук П. Ю., Аникина Л. М., Панова Г. Г. Адаптационная способность, продуктивность и качество карликовых форм томата в системах выращивания различного типа // Агрофизика. 2025. № 3. С. 38–48.
2. 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 РАСХН. 2015, № 4. С. 17–21.
3. Кулешова Т. Э., Желначева П. В., Эзерина Е. М. и др. Влияние спектрального состава световой среды на фотосинтетические, электро- и морфофизиологические показатели редиса в условиях светокультуры // Физиология растений. 2024. Т. 71. № 2. С. 243–256.
4. Ермаков А. И., Арасимович Н. П., Ярош В. В. Методы биохимического исследования растений / под ред. А. И. Ермакова. Л.: Агропромиздат. 1987. 430 с.

ФИТОТЕСТИРОВАНИЕ СУСПЕНЗИЙ МАЛОСЛОЙНОГО ГРАФЕНА КАК ПЕРСПЕКТИВНОГО АДАПТОГЕНА

А. С. ЖУРАВЛЕВА¹, А. А. ВОЗНЯКОВСКИЙ², Д. П. МУХИНА¹, Т. Э. КУЛЕШОВА^{1, 2},
А. П. ВОЗНЯКОВСКИЙ³, Г. Г. ПАНОВА¹

¹ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург;

²ФГБУН «Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН», Санкт-Петербург;

³ФГБУ «Ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт синтетического каучука им. академика С. В. Лебедева», Санкт-Петербург

В литературе практически отсутствует информация о влиянии малослойного графена, синтезированного из растительных биополимеров (глюкозы, крахмала и целлюлозы) [1] на растения. Между тем, имеются данные об его перспективности в качестве полезной модифицирующей добавки в почву сельскохозяйственного назначения ввиду его стимулирующего воздействия на бактериальные культуры [2]. Таким образом, целью работы являлось фитотестирование суспензий малослойного графена на семенах и проростках ярового ячменя в условиях недостатка влаги для выявления его возможного адаптогенного воздействия на растения.

Предметом исследования служили суспензии малослойного графена (МГ, не более 5 слоев), синтезированного из рисовой шелухи в Физико-техническом институте имени А. Ф. Иоффе РАН [1], объектом – семена ярового ячменя сорта Ленинградский (среднеустойчивый сорт, районированный для Северо-Западного региона, коллекция ФГБНУ ФИЦ ВИР). Суспензии тестируемого вещества в концентрациях 0,0001–0,1 мг/л готовили на дистиллированной воде методом последовательных серийных разведений с использованием ультразвуковой ванны. Более высокие его концентрации – 1–100 мг/л были исключены на основе результатов предыдущего эксперимента, проведенного в благоприятных условиях. Причиной являлось достоверное ингибирующее воздействие в указанных концентрациях на энергию прорастания семян и в виде тенденции – на их всхожесть, а также исходя из экономической целесообразности. Семена проращивали в стерильных чашках Петри с бумажными фильтрами с добавлением суспензий малослойного графена на всем протяжении опыта, контролем служила дистиллированная вода. Определение энергии прорастания, всхожести семян, морфо- и массметрических характеристик проростков проводили в соответствии с ГОСТ [3].

Результаты исследования показали, что дефицит влаги в контрольном варианте достоверно влияет на ряд показателей проростков ячменя (табл., рис.), приводя к уменьшению длины корня и ростка (на 16 и 52%), сырой массы корней (на 55%) и ростков (на 43%) и возрастанию содержания сухого вещества в этих органах (на 79 и 45%). Добавление в чашки Петри суспензий графена в определенных концентрациях в виде тенденции оказывают на проростки адаптогенное воздействие, по совокупности показателей (всхожесть, длина корня, сырая масса корней, сырая и сухая масса ростков) наиболее выраженное при концентрации графена 0,01 мг/л.

Таблица. Влияние обработки семян суспензиями малослойного графена на энергию прорастания, всхожесть семян ярового ячменя сорта Ленинградский и биометрические показатели проростков в условиях недостатка влаги

Вариант обработки семян	Энергия прорастания, % / % от контр.	Всхожесть, % / % от контроля	Длина корня, мм / % от контр. опт	Длина ростка, мм / % от контр. опт
Оптимум				
Контроль опт – H ₂ O	88 / 100	95 / 100	74,1±5,6 / 100	122,0±7,6 / 100
Дефицит влаги				
Контроль – H ₂ O	88 / 100	89 / 94	62,1±4,3* / 84*	58,7±5,0* / 48*
МГ IV 0,0001 мг/л	92 / 105	95 / 100	62,8±4,1* / 85*	66,8±3,7* / 55*
МГ IV 0,001 мг/л	91 / 103	92 / 97	60,5±3,6* / 82*	66,7±3,8* / 55*
МГ IV 0,01 мг/л	95 / 108	92 / 97	64,9±3,2 / 88*	64,5±2,3* / 53*
МГ IV 0,1 мг/л	90 / 102	92 / 97	63,1±3,4* / 85*	58,3±3,3* / 48*

Примечание: * – значение достоверно отличается от контроля на 5 %-ном уровне значимости.

При этом, в этом варианте такие показатели, как длина корня и сухая масса ростков наиболее приближены к таковым у контрольных растений, не подвергавшихся стрессу (88 и 92%, соответственно), а сухое вещество в корнях растений ниже, чем у контрольных растений с недостатком влаги на 26%, что говорит о лучшей обеспеченности растений водой в условиях ее недостатка (рис.).

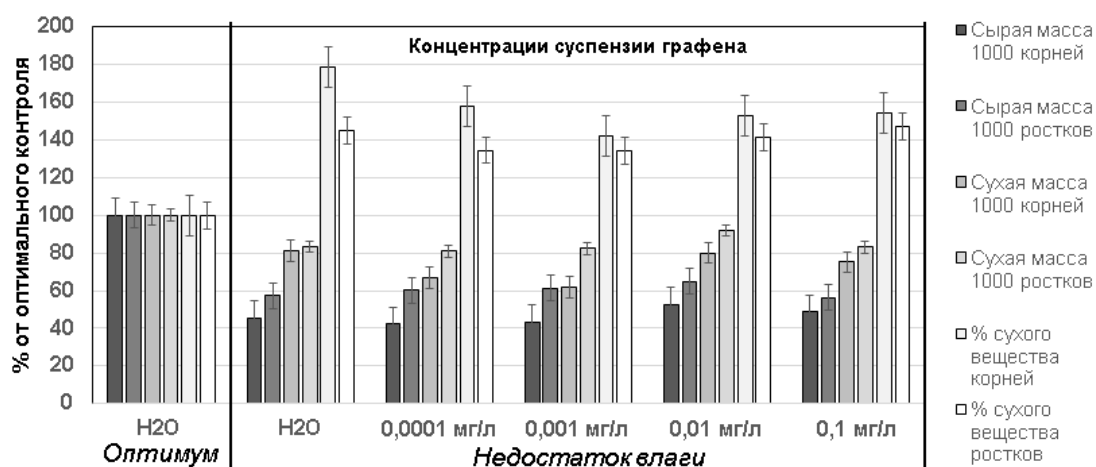


Рисунок. Влияние обработки семян суспензиями графена на массу проростков ярового ячменя сорта Ленинградский и содержание в них сухого вещества в условиях недостатка влаги

Таким образом, малослойный графен можно считать перспективным веществом, проявляющим адаптогенные свойства в отношении растений, находящихся в условиях стресса. Требуются дальнейшие исследования в этом направлении для подбора его оптимальных форм и концентраций, а также способов применения при обработке растений или внесении почвенно-растительную систему.

Список литературы

1. Voznyakovskii, A., Vozniakovskii, A., & Kidalov, S. (2022). New way of synthesis of few-layer graphene nanosheets by the self propagating high-temperature synthesis method from biopolymers. *Nanomaterials*, 12(4), 657.
2. Возняковский А. А., Канарский А. В., Возняковский А. П., Гематдинова В. М., Канарская З. А., Семенов Э. И., & Кидалов, С. В. (2024). Влияние малослойного графена на физиологическую активность спор ризосферной культуры *B. Subtilis* sp. *Журнал технической физики*, 94(9), 1483–1488.
3. ГОСТ 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. 1986-07-01.

РЕГЛАМЕНТ РАЗРАБОТКИ ПРОТОКОЛА И ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ СЕМЯН СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР И ПОСЕВОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

И. М. КАЙГОРОВОДА¹, Е. Г. КОЗАРЬ¹, В. Г. ГРЯЗНОВ²

¹ФГБНУ «Федеральный научный центр овощеводства», ВНИИССОК;

²АО «Концерн ГРАНИТ», Москва

Подготовка семян электромагнитными полями представляет собой наиболее перспективный метод для сельскохозяйственной практики [1]. Экологически безопасная технология предпосевной обработки семян и посевов с помощью импульсного электромагнитного излучения (ЭМИ) аппарата «ТОР», позволяет за счет индукции эустресса повысить энергию прорастания, стрессоустойчивость и продуктивность сельскохозяйственных культур [2, 3]. Оценку эффективности необходимо проводить в четыре основных этапа исследований, на которых подбираются параметры обработки (экспозиция, частота) в зависимости от вида культуры, сорта, состояния партии семян и конкретных задач исследования.

Для предварительной оценки отзывчивости культуры на воздействие электромагнитными излучениями проводят *лабораторные исследования*. Время экспозиции – от одной минуты до 30 минут (чаще используют от 3 до 15 с шагом 2 минуты). Семена проращивают в соответствующих условиях в зависимости от вида культуры и на определенные сутки определяют энергию прорастания (%) и лабораторную всхожесть (%), согласно ГОСТ 12038-84. Для ЭМИ-обработки выбирают изолированное помещение с минимальным наличием (лучше с полным отсутствием) отражающих элементов (железные шкафы, столы, батареи и пр.). Каждый опытный вариант обрабатывают отдельно, размещая объект от излучателя на расстоянии не менее трёх метров (3–5 м). Контрольный вариант в период проведения должен быть изолирован в другом помещении и защищен от ЭМИ аппарата «ТОР» с помощью, заземленных фольги или металлического шкафа. Обработку проводят в утренние часы (5:00–11:00) и в этот же день обработанные и контрольные семена высевают для оценки посевных качеств. В дальнейшую работу включают варианты с наибольшим положительным эффектом повышения энергии прорастания или лабораторной всхожести.

На следующем этапе (*вегетационные испытания*) основная задача – подобрать оптимальный способ обработки: до посева (воздушно-сухие семена) или после посева (контейнеры с предварительно высеянными за 24 часа в грунт необработанными семенами). Оценку эффективности воздействия ЭМИ-обработки проводят в динамике по мере появления всходов и развития проростков. Отмечают следующие показатели: оранжерейная всхожесть (%); морфометрические параметры сеянцев – длина побега (мм), длина корешка (мм), масса проростка с корешком и без корешка (г), фаза и балл развития проростка; биохимические параметры – содержание сухого вещества, белка, пигментов, сахаров, гормонов, полифенолов, антиоксидантов и др. Основным критерием характера и направленности действия ЭМИ аппарата «ТОР» на изучаемые параметры растений служит показатель биологической эффективности – эффект в процентах по сравнению с контрольной группой (отрицательные значения указывают на ингибирование роста, положительные – на стимуляцию).

После предварительных лабораторных и вегетационных опытов, выбрав оптимальные варианты экспозиции и способ обработки, проводят *рекогносцировочные полевые испытания*. Соблюдая агротехнологические сроки, проводят ЭМИ-обработку семян перед посевом или в поле на следующий день после посева. Воздушно-сухие семена перед посевом обрабатывают в бумажной/тканевой упаковке или насыпью в утренние часы, используя

специализированное помещения (хранилище, склад, подвал), но лучше проводить на открытых площадках, при этом важно минимизировать вероятность ЭМИ-обработки других растительных объектов (семена, культурные растения). Аппарат можно устанавливать на штатив, расстояние до объекта излучения может варьировать от 5 до 30 метров, что не влияет на биологическую эффективность ЭМИ-обработки. Обработанные семена можно высевать в поле или в защищенном грунте (пленочные и стеклянные теплицы) непосредственно в день обработки или в течение недели, согласно технологическим требованиям культуры. Площадь учетных делянок 1–5 м², в зависимости от культуры, повторность пятикратная, расположение рандомизированное, число учетных растений в повторности не менее десяти. При обработке семян в поле необходимо обрабатывать на следующий день после посева также в утренние часы. Для проведения исследования необходимо выбрать участки поля с ровным рельефом. Опытные и контрольные варианты должны располагаться на удаленных отдельных участках или разных полях, но с одинаковым агрофоном. Допускается размещать опыт в рамках одного поля (теплицы) разделив его на два равноценных участка с обработкой одного (опыт) и без обработки (контроль). При выборе участка для ЭМИ-обработки следует учитывать, что дальность действия, генерируемого аппаратом «ТОР» биологически эффективного ЭМИ достигает 900 метров. В случае нахождения на территории поля высоковольтных линий электропередач (ЛЭП) и различного типа ретрансляторов для предотвращения искажения результатов рекомендуется выбирать участок для обработки на удалении 100 метров от данных объектов. При обработке в поле с использованием штатива учеты проводят, отбирая пробы на удалении 30, 60, 90 и 120 м от «нулевой» точки положения аппарата «ТОР» при обработке. Площадь учетной делянки – 2–5 м², повторность – пятикратная, число учетных растений – 25–100 штук. Проводят следующие учеты: фенологические наблюдения; фитопатологическая оценка; морфометрический анализ растений; учет элементов продуктивности, урожайности и товарности; основные биохимические показатели вегетирующих растений и товарной продукции; оценка посевных качеств полученного семенного потомства. По основным морфометрическим параметрам и продуктивности растений рассчитывают биологическую эффективность действия ЭМИ-обработки.

На основании анализа всей совокупности полученных данных составляют протокол применения выделившихся вариантов ЭМИ-обработки семян для каждой культуры с учетом сортовой специфики для проведения дальнейших крупномасштабных *производственных полевых испытаний* и определения эффективности предлагаемой технологии с использованием аппарата «ТОР», производительность которого при обработке семенного материала в зернохранилище достигает 11 000 тонн в сутки, производительность в полевых условиях – 800 га. При производственных испытаниях общая площадь в контроле и опыте должна составлять не менее одного гектара, технология возделывания – общепринятая для каждого вида культуры и региона выращивания. При необходимости в период вегетации методом маршрутного обследования проводят фитопатологический мониторинг для своевременного проведения защитных мероприятий. Обработку семян проводят согласно разработанному протоколу, учитывают общую и товарную урожайность и качество полученной продукции и определяют фактическую хозяйственную и экономическую эффективность ЭМИ-обработки.

Технология полностью соответствует трендам мирового земледелия, в том числе и органического, имеет высокую коммерческую ценность для сельхозпроизводителей.

Список литературы

1. Papadopoulos G., Georgiou E., Oikonomou A., Fountas S., Bilalis D. Bridging Magnetic Field Agriculture and UAV-Based Precision Monitoring: A Systematic Review and Framework for Field-Scale Validation // <https://www.preprints.org/manuscript/202606.1486>, дата обращения 09.07.2026. DOI: 10.20944/preprints202606.1486.v1
2. Khashirova S. Yu., Shabaev A. S., Turkanov I. F., et al. Electromagnetic priming modulates gas exchange during pea seed germination under salt stress // AgriEngineering. 2026. Т. 8. № 4. С. 120. DOI: 10.3390/agriengineering8040120
3. Turkanov I. F., Bondarchuk E. V., Gryaznov V. G., et al. Effects of remote barley seed treatment with weak non-thermal pulsed electromagnetic fields on plant development and yields // Seeds. 2025. № 4. С. 35. DOI: 10.3390/seeds4030035

О РЕАКЦИИ ДЕТЕРМИНАНТНОГО ТОМАТА НА ИМИТИРУЮЩИЙ СОЛНЕЧНЫЙ СВЕТ СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ СВЕТОВОЙ СРЕДЫ В УСЛОВИЯХ РЕГУЛИРУЕМОЙ АГРОЭКОСИСТЕМЫ

О. И. КАРМАНОВА, К. В. ЕГОРОВА, Г. В. МИРСКАЯ, О. Р. УДАЛОВА, Г. Г. ПАНОВА,
Т. Э. КУЛЕШОВА

ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург

В связи с ростом численности населения, сокращения площадей под сельскохозяйственную деятельность, расширения экологически небезопасных зон, взаимосвязанным с этим устойчивым проявлением микронутриентной недостаточности, ведущей к различного рода опасным заболеваниям и нарушениям иммунного статуса, представляется актуальным разработать и/или применять способы для увеличения урожайности сельскохозяйственных культур и питательной ценности растительной продукции, а также снижения сроков вегетации растений. Это наиболее эффективно в условиях регулируемой агроэкосистемы.

Одной из наиболее распространенных и потребляемых овощных культур в мире является томат, при этом его выращивание всё чаще осуществляется в условиях частичной или полной светокультуры. В связи с этим цель настоящей работы заключается в изучении влияния светодиодного освещения с различными спектральными характеристиками фотосинтетически активной радиации на продуктивность и качество растений томата, а также разработка рекомендаций по оптимизации свойств световой среды.

Объектом исследования служила гибридная форма томата поколения F₄ – D₈, селекции ФГБНУ АФИ, полученная в комбинации скрещивания детерминантных сортов, адаптированных к выращиванию в интенсивной светокультуре [1].

Исследования проводили на базе агробиополигона ФГБНУ АФИ в регулируемых условиях интенсивной светокультуры [2] – температуру воздуха поддерживали в пределах +22...+24°C днем и +18...+20°C – ночью, относительную влажность воздуха – 50–60%.

Растения выращивали в ёмкостях объёмом три литра с использованием промышленного грунта (Агробалт С, ООО «Пиндstrup», Московская область, Россия) на основе верхового торфа низкой степени разложения с минеральными добавками. Полив осуществлялся ежедневно 1N раствором Кнопа. Плотность посадки составляла 14 растений на 1 м².

Для освещения использовались три типа оригинальных светодиодных светильников (ФГБНУ АФИ, Россия), моделирующих естественное освещение в различное время суток [3], а именно: светильники с цветовой температурой 3000 К (АФИ-3000), 4000 К (АФИ-4000) и 5000 К (АФИ-5000) имитирующие солнечный свет, соответственно когда солнце находится у горизонта с доминированием красной составляющей спектра света (55% R, 35% G, 10% B); со спектром приближенным к утреннему и послеобеденному солнечному свету (43% R, 38% G, 19% B); и в зените с большей долей синего диапазона спектра (37% R, 38% G, 25% B). Плотность фотосинтетического потока фотонов (PPFD) растительного покрова во всех вариантах была одинаковой и составляла 330±20 мкмоль/(м²·с), продолжительность светового периода – 16 часов в сутки.

Уборку проводили на 120-й день от посадки, при этом измерялись морфометрические показатели растений (высота и масса растения, количество плодов, средняя масса и размер плода, урожайность с 1 м²).

В таблице 1 приведены результаты оценки морфометрических показателей растений томата, выращенных при освещении источниками света с разным спектральным составом. Высота растений в фазу плодоношения не превышала 55 см, масса плода варьировала в

пределах 18–25 г. Видно, что по морфометрическим характеристикам (высота, масса растения и его органов) растения томата, выращенные под светодиодными светильниками с различным тестируемым спектром света, не отличаются друг от друга. Только по количеству плодов растения томата под светильниками АФИ-3000 имеют достоверно более высокие значения по сравнению с таковыми под светильниками АФИ-4000 и АФИ-5000. Однако в отношении показателя масса одного плода отмечалась в виде слабой тенденции обратная картина.

Таблица 1. Средние значения ряда морфометрических показателей растений томата при выращивании под светодиодными светильниками с различным спектральным составом на агробиополигоне ФГБНУ АФИ

Светодиодный источник света	Растение					
	высота растения, см	масса листьев, г	кол-во листьев, шт.	кол-во плодов, шт.	масса плода, г	диаметр плода, см
АФИ-3000	53,0±7,5	201,3±69,3	44,0±9,0	46,7±7,4	19,1±1,1	3,5±0,4
АФИ-4000	47,0±3,6	177,1±68,3	45,0±10,0	29,7±5,2*	20,1±2,0	3,5±0,3
АФИ-5000	53,3±4,9	196,5±48,0	39,0±11,0	29±6,4*	20,6±5,4	3,4±0,3

Примечание: * – значение достоверно отличается от АФИ-3000 на 5%-ном уровне значимости.

В итоге такой интегральный показатель как урожайность растений с 1 м² или потенциальная урожайность с 1 м² не имел достоверных отличий между вариантами опыта (табл. 2). Выявлена тенденция к несколько более низким ее значениям в вариантах опыта с светильниками АФИ-4000 и АФИ-5000.

Таблица 2. Средние значения урожайности томата при выращивании под светодиодными светильниками с различным спектральным составом на агробиополигоне ФГБНУ АФИ

Светодиодный источник света	Урожайность, кг/м ²	Потенциальная урожайность, кг/м ²
АФИ-3000 К	12,9±5,4	17,2±5,9
АФИ-4000 К	8,6±3,3	15,3±5,3
АФИ-5000 К	8,2±3,9	16,2±6,3

Примечание: потенциальная урожайность рассчитана как масса всех плодов, достигших биологической и технической спелости.

Таким образом, полученные результаты исследований реакции растений детерминантного томата на световую среду различного спектрального состава, имитирующего солнечный свет, свидетельствуют о высокой пластичности использованного гибрида и о необходимости продолжения углубленных исследований с применением различающихся по отзывчивости на воздействия сортов и гибридов томата, адаптированных к условиям интенсивной светокультуры.

Список литературы

1. Удалова О. Р., Балашова И. Т., Мирская Г. В., Конончук П. Ю., Аникина Л. М., Панова Г. Г. Адаптационная способность, продуктивность и качество карликовых форм томата в системах выращивания различного типа // Агрофизика. 2025. № 3. С. 38–48.
2. 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 РАСХН. 2015, № 4. С. 17–21.
3. Кулешова Т. Э., Желначева П. В., Эзерина Е. М. и др. Влияние спектрального состава световой среды на фотосинтетические, электро- и морфофизиологические показатели редиса в условиях светокультуры // Физиология растений. 2024. Т. 71. № 2. С. 243–256.

БАЗА ДАННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ И ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЧВ КРЫМА

М. В. КОЛОДЯЖНЫЙ, Н. Г. БОЙКО, Е. А. ДУНАЕВА

ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма»,
Республика Крым, Симферополь

При выполнении почвенных изысканий важна систематизация имеющихся данных на отдельных участках, также не менее важна территориальная привязка различных показателей. В настоящее время для территории Республики Крым отсутствует единая база данных почвенных показателей, что подчеркивает актуальность данной темы.

Цель исследования – систематизировать данные о физических и гидрофизических свойствах почв на территории Республики Крым.

Посредством табличного процессора Microsoft Excel реализована база данных (далее – БД) физических и гидрофизических характеристик и параметров почвы (гранулометрический состав, объемная плотность, почвенно-гидрологические константы, основная гидрофизическая характеристика и т. д.) на основе полевых/лабораторных обследований, дополненные справочными данными [1] и материалами открытых баз данных почвенных характеристик (SoilHydroGrids, European Soil Databases (ESDB), USDAC_3D Soil Hydraulic Database of Europe, Unsaturated Soil Hydraulic Database (UNSODA) и SoilKsatDB) [2].

База данных дополняется описанием почвенного профиля согласно [3] и последующим присвоением названия почвам по трём различным классификациям. Для географической привязки кратко характеризуется местность (муниципальный район – сельское поселение – хозяйство – севооборот – поле) и указываются географические координаты. В настоящее время БД включает в себя 20 наименований почв по 7 муниципальным районам Республики Крым (Красногвардейский, Сакский, Первомайский, Джанкойский, Нижнегорский, Краснопереконский и Симферопольский).

Для некоторых показателей (к примеру, влажность устойчивого завядания растений, гранулометрический состав, основная гидрофизическая характеристика и т. д.) созданы отдельные Microsoft Word-документы с расчётами с соответствующей ссылкой на них непосредственно из БД. Общее число таких файлов в настоящее время составляет 50 и дополняется по мере проведения опытов.

Пример реализации базы данных почвенных характеристик на территории Республики Крым представлен на рисунке.

№ п/п	Местонахождение	Координаты		Название почвы 1977 г.	Название почвы 2004 г.	название почвы по WRB- 2015	Гранулометрический состав	Описание	
		x	y					Влажность устойчивого завядания растений (метод вегетационных миниатюр, лабораторный метод), %	Влажность устойчивого завядания растений (с справочник Половицкий И.Я., Гусев П.Г.)%
1.	Красногвардейский район, с. Клепшино, земли ФГБУН "НИИСХ Крыма" поле 6/7 46 га, в 2022 г. посев льна	453131	340740	Чернозем южный мицелярно-карбонатный на желто-бурых глинах	Агрозем черногумусовый аккумулятивно-карбонатный сегрегационный	Haplic Chernozem (Siltic, Aric)			ВЗ на желто-бурых глинах (справочник).xlsx
2.	Красногвардейский район, с. Клепшино, земли ФГБУН "НИИСХ Крыма" поле 5/5 26 га (21.06.2022г.)	453057	341332	Чернозем южный мицелярно-карбонатный на лессовидных отложениях	Агрозем черногумусовый аккумулятивно-карбонатный сегрегационный	Haplic Chernozem (Siltic, Aric)	ГС чернозем на лессовидных суглинках (лаб.).docx	ВЗ чернозем южный м.-к. на лессовидных отложениях 55(лаб.).xlsx	ВЗ на лессовидных отложениях (справочник).xlsx

Рисунок. Фрагмент базы данных почвенных характеристик на территории Республики Крым

Таким образом, на данный момент разрабатываемая база данных точно охватывает значительную часть равнинного Крыма, что позволяет отследить изменчивость различных физических и гидрофизических характеристик почв в зависимости от местоположения или иных внешних условий. Планируется дальнейшее расширение и актуализация данных, что позволит использовать актуальную и территориально привязанную информацию при выполнении научных исследований.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 25-16-00239 «Моделирование и анализ гидрофизических свойств почвы с учетом гистерезиса для прецизионного орошения сельскохозяйственных культур».

Список литературы

1. Половицкий И. Я. Почвы Крыма и повышение их плодородия / И. Я. Половицкий, П. Г. Гусев. Симферополь: Таврия, 1987. 152 с.
2. Гавловская Е. Р. Обзор существующих цифровых баз данных почвенных показателей / Е. Р. Гавловская, М. В. Колодяжный, Е. А. Дунаева // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: Материалы XII Международной научной конференции, Красноярск, 09–12 сентября 2025 года. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2025. С. 250–254. EDN PYADRT.
3. ГОСТ 27593-88 Почвы. Термины и определения

ВЫРАЩИВАНИЕ РАСТЕНИЙ НА ИМИТАТОРАХ ЛУННОГО РЕГОЛИТА: ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

И. А. КОЛПАКОВ, Д. В. СЕРБИН

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург

Освоение Луны и создание долговременных обитаемых баз требует разработки самоподдерживающихся систем жизнеобеспечения, важной частью которых является выращивание растений. В этой связи лунный реголит и его имитаторы рассматриваются как потенциальная минеральная основа и почва для получения растительной продукции в условиях внеземной среды. Исследования в этой области позволяют оценить возможность использования местных ресурсов для частичного обеспечения будущих лунных экспедиций.

Эксперименты последних лет показали, что растения способны прорасти на лунном грунте и его имитаторах, однако их развитие сопровождается выраженным стрессом. Основными ограничивающими факторами являются отсутствие органического вещества и доступного азота, низкая влагоудерживающая способность, неблагоприятные физические свойства субстрата, а также низкая биодоступность ряда элементов питания. В результате у растений наблюдаются замедление роста, снижение биомассы и признаки оксидативного и ионного стресса [1, 2].

В связи с этим особое значение приобретают подходы, направленные на модификацию реголитоподобных субстратов. Наиболее перспективными считаются внесение органических добавок, использование питательных растворов, а также применение микроорганизмов, способных повышать доступность фосфора и других элементов минерального питания. Отдельный интерес представляют растительно-микробные системы, в которых симбиотические бактерии и грибы способствуют адаптации растений к экстремальным свойствам субстрата [1, 3].

Подобные исследования имеют не только фундаментальное, но и прикладное значение. Они позволяют выявить пределы устойчивости растений, подобрать наиболее перспективные культуры для космического земледелия и разработать принципы создания искусственных плодородных субстратов на основе внеземного минерального сырья. Таким образом, изучение роста растений на имитаторах лунного реголита является важным направлением на стыке агрофизики, физиологии растений, микробиологии и космических технологий.

Список литературы

1. Duri L.G., Caporale A.G., Roupheal Y., Vingiani S., Palladino M., De Pascale S., Adamo P. The potential for Lunar and Martian regolith simulants to sustain plant growth: A multidisciplinary overview // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. 2022. Vol. 8. Article 747821.
2. Barcenilla B.B., Kundel I., Hall E., Hilty N., Ulianich P., Cook J., Turley J., Yerram M., Min J.-H., Castillo-González C., Shippen D.E. Telomere dynamics and oxidative stress in *Arabidopsis* grown in lunar regolith simulant // *Frontiers in Plant Science*. 2024. Vol. 15. Article 1351613.
3. Xia Y., Yuan Y., Li C., Sun Z. Phosphorus-solubilizing bacteria improve the growth of *Nicotiana benthamiana* on lunar regolith simulant by dissociating insoluble inorganic phosphorus // *Communications Biology*. 2023. Vol. 6. Article 1039.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИДРОГЕЛЯ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ ЗЕЛЁНОГО И ФИОЛЕТОВОГО БАЗИЛИКА В УСЛОВИЯХ ГИДРОПОНИКИ

В. Э. КУЗНЕЦОВ, Р. В. КОСЕНОК, С. А. ТИМЕЦ, А. М. ГИЛЁВ

Дальневосточный федеральный университет, Институт Мирового океана, кафедра почвоведения, г. Владивосток

Подбор субстрата один из важнейших факторов в гидропонном выращивании, так как он выполняет функцию опоры для растения и корневой системы. Благодаря этому регулируется воздушно-водный режим и распределяется питательный раствор [1].

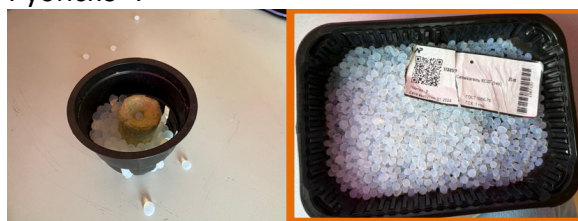
В гидропонном растениеводстве применяется широкий спектр субстратов, например: минеральная вата, кокосовый субстрат, перлит и керамзит. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки. Минеральная вата обладает высокой пористостью и аэрацией, но при этом может легко переувлажняться, требуя контроль влажности. Органические субстраты отличаются высокой влагоемкостью, но постепенно могут разлагаться и способствовать развитию патогенных микроорганизмов [2].

Одним из новых и инновационных субстратов является гидрогель. Благодаря способности поглощать и удерживать жидкость в количестве, значительно превышающем собственную массу, гидрогель постепенно отдает влагу корневой системе, поддерживая более стабильный водный режим [3]. Несмотря на широкое применение гидрогелей в почвенном растениеводстве, сведения об их использовании совместно с другими субстратами в гидропонике малы. Цель исследования – оценить влияние гидрогеля на развитие зеленого и фиолетового базилика (*Ocimum basilicum*) при выращивании в гидропонике.

Объектом исследования служили семена зеленого (*Ocimum basilicum* var. *basilicum*) и фиолетового базилика (*Ocimum basilicum* var. *purpurascens* Benth). Для проведения исследований использовалось два инертных субстрата: минеральная вата и силикагель КСКГ технический (фото субстратов). семена растений проращивались в течение двух недель в минеральной вате, а после укоренения растения были перенесены в гидропонную установку, где выращивание осуществляли методом питательной пленки (NFT) с использованием комплексных минеральных удобрений от ООО «Рубиско».



Минеральная вата



Силикагель КСКГ технический

Рисунок 1. Субстраты

Опыт по субстратам разделен на четыре варианта: Вариант 1 – фиолетовый базилик на минеральной вате; Вариант 2 – фиолетовый базилик на минеральной вате с гидрогелем; Вариант 3 – зеленый базилик на минеральной вате; Вариант 4 – зеленый базилик на минеральной вате с гидрогелем. В каждом варианте опыта использовалась пятикратная повторность, то есть по пять растений, которые позволят в дальнейшем сделать статистическую обработку данных. Во всех вариантах поддерживали одинаковые условия выращивания.

Выращивание растений в гидропонике происходило в течение 60 дней, после завершения которого были произведены замеры биомассы. Для каждого образца

определяли общую массу растения, массу надземной части и корневой системы, после чего рассчитывали долю каждой из них к общей биомассе. Результаты представлены на рисунке 2.

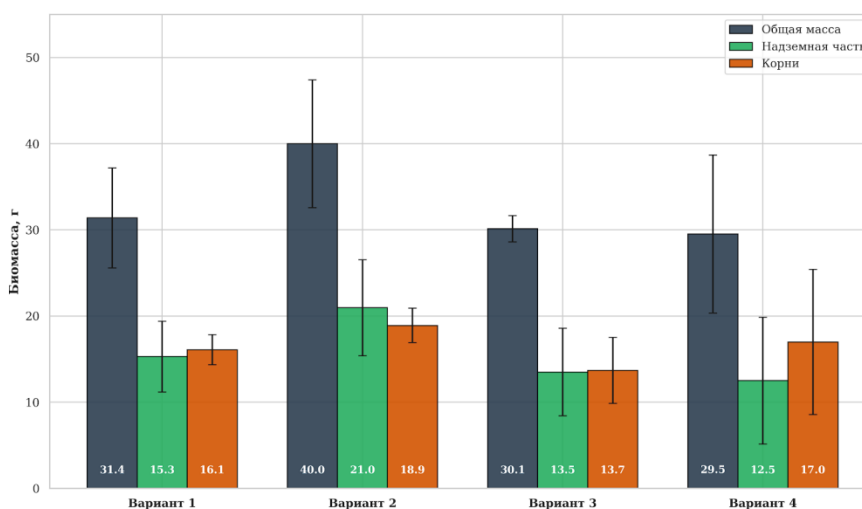


Рисунок 2. Результаты замеров биомассы растений

Средняя масса надземной части у фиолетового базилика составила – 15,29 грамм в минеральной вате и 20,96 грамм в минеральной вате с гидрогелем. Средняя масса корней – 16,09 грамм в минеральной вате и 18,91 грамм в минеральной вате с гидрогелем.

Средняя масса надземной части у зеленого базилика составила – 13,49 г., в минеральной вате и 12,5 г., в минеральной вате с гидрогелем. Средняя масса корней у зеленого базилика – 13,7 грамм в минеральной вате и 16,97 грамм в минеральной вате с добавлением гидрогеля.

Исходя из полученных данных по надземным и корневым частям растений были получены соотношения их долей к общей массе растений.

В варианте 1 доля массы корней составила 51,27%, доля надземной части 48,73%. В варианте 2 доля массы корней составила 47,43%, доля надземной части 52,57%. В варианте 3 доля массы корней составила 50,39%, доля надземной части 49,61%. В варианте 4 доля массы корней составила 57,66%, доля надземной части 42,34%.

По результатам исследования наиболее эффективным сочетанием для фиолетового базилика оказалась минеральная вата с добавлением гидрогеля, обеспечив накопление надземной биомассы. Для зеленого базилика гидрогель преимущественно стимулировал развитие корневой системы. Вероятно, это связано с сортовыми особенностями распределения биомассы и различной реакцией растений на изменение водного режима. На результаты опыта могла повлиять неравномерность распределения гидрогеля в субстрате. В дальнейшем нужно оценить влияние различных доз гидрогеля и стандартизировать его внесение.

Работа выполнена при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования № FZNS-2026–0020.

Список литературы

1. Карпухин М. Ю., Хомутов Д. А. Особенности технологии изучения гибридов томата отечественной селекции в промышленных тепличных комбинатах на малообъемной гидропонике // АОН. 2023. № 4.
2. Селиванова М. В. Влияние субстрата на усвоение питательных элементов растениями огурца и урожайность культуры // Плодородие. 2025. № 3(144).
3. Салимянова Э. Ю., Сафиуллина Л. М. Влияние полимерного гидрогеля на проращивание перца овощного // Вестник Башкирского государственного педагогического университета им. М. Акмуллы. 2023. №S1 (66).

МОЩНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БИОЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ В НИХ МИЗУНЫ ПОД РАЗЛИЧНЫМ СПЕКТРОМ ОСВЕЩЕНИЯ

Т. Э. КУЛЕШОВА, К. В. ЕГОРОВА, О. И. КАРМАНОВА

ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург

В растительной биоэлектрохимической системе (БЭС), также называемой растительно-микробный топливный элемент (РМТЭ), в качестве энергоресурса используются экзоэлектрогенные реакции в корнеобитаемой среде растений с участием микроорганизмов для преобразования химической энергии органических соединений в электрическую энергию. БЭС является перспективной технологией биоэнергетики, совместимой с производством растительной продукции [1], при этом различные виды растений и условия их выращивания играют ключевую роль в эффективности работы биоэнергетического устройства [2]. Наиболее распространенными культурами, используемыми в РМТЭ, выступают водные и травянистые растения [3], в то время как биоэлектрогенные свойства овощных сельскохозяйственно значимых культур остаются малоизученными.

Цель работы заключалась в исследовании электрических характеристик БЭС при культивировании листовой овощной культуры в различных условиях световой среды.

Фитотест-объектом была выбрана японская капуста мизуна красная (*Brassica rapa* Mizuna Group), неприхотливая в выращивании и характеризующаяся насыщенным острым вкусом, богатым витаминным и антиоксидантным составом. Агробиологические испытания проводили в регулируемых условиях агробиополигона ФГБНУ АФИ (г. Санкт-Петербург) [4]. В качестве источников света использовали оригинальные светодиодные светильники (ФГБНУ АФИ, Россия), имитирующие солнечное освещение в различное время суток при одинаковой продолжительности светового периода 14 часов в сутки и плотности фотосинтетического потока фотонов (PPFD) 320 ± 20 $\mu\text{моль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$: АФИ-3000, моделирующий спектр света на восходе солнца с соотношением R:G:B – 5:3:1, АФИ-4000 с дневным нейтральным освещением с R:G:B – 2:2:1 и АФИ-5000, формирующий спектр излучения близкий к положению солнца в зените с R:G:B – 1.5:1.5:1.

БЭС представляли собой емкости для выращивания с расположенными в них электродами на основе графитового войлока и нержавеющей стали [1]. Поляризационные кривые и мощностные характеристики регистрировали с помощью одноканального потенциостата-гальваностата P-20X («Electrochemical Instruments», Россия) по двухэлектродной схеме подключения.

Максимально полученные значения электрического тока и удельной мощности БЭС при выращивании в ней растений мизуны составили 3 мкА и 27 мкВт/м² для варианта освещения АФИ-4000, для АФИ-3000 эти показатели были ниже на 43%, для АФИ-5000 ток был меньше на 66%, мощность на 19% (рис.).

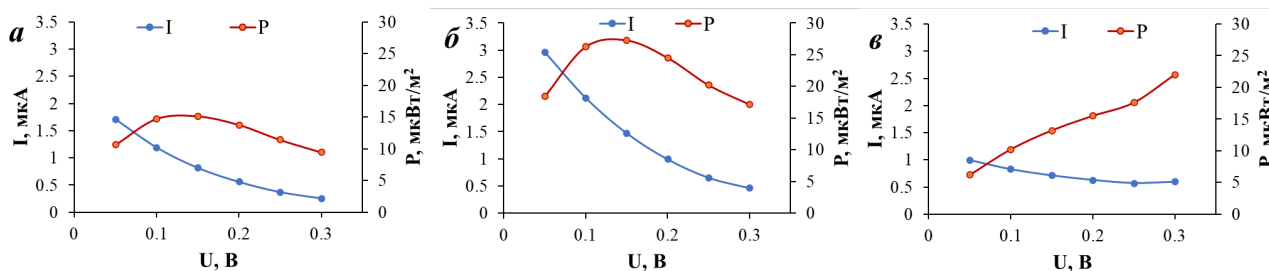


Рисунок. Поляризационные кривые и мощностные характеристики БЭС при культивировании мизуны с использованием в качестве источника света:

а – АФИ-3000, б – АФИ-4000, в – АФИ-5000

На стадии технической спелости высота растений достоверно не отличалась между вариантами и составила 21 ± 3 см при освещении АФИ-3000, 21 ± 3 см для АФИ-4000 и 20 ± 2 см для АФИ-5000. Диаметр розетки был в виде тенденции меньше всех у мизуны, освещаемой АФИ-4000 – 33 ± 4 см и не отличался для вариантов АФИ-3000 и АФИ-5000 с значениями 36 ± 3 см и 37 ± 3 см, соответственно.

Полученная урожайность составила для варианта АФИ-3000 – $3,2 \text{ кг/м}^2$ за вегетацию и $33,8 \text{ кг/м}^2$ в год с яруса, для варианта АФИ-4000 – $4,6 \text{ кг/м}^2$ за вегетацию и $47,8 \text{ кг/м}^2$ в год, для варианта АФИ-5000 – $4,4 \text{ кг/м}^2$ за вегетацию и $46,1 \text{ кг/м}^2$ в год.

Таким образом, наиболее производительным оказался вариант БЭС с культивируемым в ней растением мизуны с использованием в качестве источника света светильников АФИ-4000, для данного варианта полученная наибольшие электрические характеристики и урожайность. Можно сделать вывод, что для эффективной работы БЭС важен комплекс технических и биологических параметров, из которых решающую роль играют правильный выбор растительной культуры наряду с конструкцией устройства, пригодной и для выращивания растений, и для получения электроэнергии на протяжении их жизнедеятельности.

Список литературы

1. Кулешова Т. Э., Желначева П. В., Русаков Д. В., Гасиева З. А., Галушко А. С., Панова Г. Г. Влияние спектрального состава света на биоэлектrogenез в корнеобитаемой среде растений салата с различной фотосинтетической активностью // Агрофизика. 2023. № 4. С. 8–17.
2. Кулешова Т. Э., Эзерина Е. М., Вертебный В. Е., Хомяков Ю. В., Синявина Н. Г., Панова Г. Г. Биоэлектrogenез в корнеобитаемой среде листовых, плодовых и корнеплодных овощных культур // Сельскохозяйственная биология. 2024. Т. 59. № 5. С. 893–909.
3. Freire J. B. et al. Microbial Communities Powering Plant-Microbial Fuel Cells: Diversity, Functions and Biotechnological Perspectives // Microbial Biotechnology. 2026. V. 19. №. 2. P. e70310.
4. 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 РАСХН. 2015. № 4. С. 17–21.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА И УРОЖАЙНОСТИ КОНСКОГО БОБА (*Vicia faba* L.) В УСЛОВИЯХ ТАДЖИКИСТАНА

О. М. ЛАШКАРБЕКОВА

Институт ботаники, физиологии и генетики растений Национальной академии наук
Таджикистана, Душанбе

Зернобобовые культуры играют важную роль в мировом сельском хозяйстве, являясь ценным источником растительного белка в рационе человека и кормопроизводстве. Особое значение среди них имеет конский боб (*Vicia faba* L.), отличающийся высоким содержанием белка, аминокислот, витаминов и минеральных веществ. В условиях глобального изменения климата и возрастающих вызовов продовольственной безопасности возрастает необходимость изучения и внедрения устойчивых и высокопродуктивных сортов зернобобовых культур.

В странах Центральной Азии, включая Таджикистан, конский боб рассматривается как перспективная культура благодаря его способности адаптироваться к различным агроэкологическим условиям и улучшать плодородие почвы за счёт биологической фиксации атмосферного азота.

Исследования проводились в условиях Центрального и Южного Таджикистана, включая города Душанбе и Шахритус. Для оценки качества зерна проводили биохимический анализ семян с определением содержания белка, масличность и клетчатки. Также изучались физические характеристики семян, включая среднегеометрический диаметр и массу 1000 семян.

Результаты биохимического анализа семян, выращенных в условиях Душанбе, показали значительную изменчивость исследуемых показателей. Наибольшее содержание белка отмечено у образцов с белыми семенами из Ишкашима (37,2%) и у крупносеменных белых (38,0%). Минимальный уровень белка (30,8%) выявлен у образцов из Ташкента. Наиболее высокая масличность была характерна для ташкентских образцов и светло-коричневых семян. Максимальное содержание клетчатки выявлено у белосеменных форм, тогда как минимальные показатели наблюдались у черноссеменных образцов.

В условиях Шахритуса максимальное содержание белка (38,6%) отмечено у черноссеменных образцов *Vicia faba* L., а минимальное (30,7%) у крупносеменных белых форм. Наиболее высокая масличность зафиксирована у ташкентских образцов с крупными белыми семенами, тогда как минимальная у светло-коричневых образцов из Пенджикента. Изучение физических характеристик семян выявило значительные различия между образцами. В условиях Шахритуса наибольшая масса 1000 семян отмечена у образцов из Ташкента (1007 г) и у крупносеменных белых форм (1027 г). В условиях Душанбе аналогичная тенденция сохранялась: масса 1000 семян у ташкентских образцов составила 819 г, а у крупносеменных белых цвет 875 г.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой адаптивности исследуемых образцов *Vicia faba* L. к природно-климатическим условиям Центрального и Южного Таджикистана. Проведённые исследования показали значительное влияние генотипических особенностей и условий выращивания на показатели качества и продуктивности *Vicia faba* L. Выделены перспективные образцы, характеризующиеся высоким содержанием белка, хорошими физическими характеристиками семян и высокой адаптивностью.

Полученные результаты могут быть использованы в селекционных программах по созданию высокоурожайных и устойчивых сортов конского боба для условий Таджикистана.

ИЗУЧЕНИЕ ВСХОЖЕСТИ СЕМЯН *PHYSALIS PUBESCENS* L. В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ГОДА РЕПРОДУКЦИИ И СЕЗОНА ПРОРАЩИВАНИЯ

М. М. МАРЧЕВА, К. И. ДАЦЮК, М. Р. ЕНГАЛЫЧЕВ

ФГБНУ «Федеральный научный центр овощеводства», Московская область, п. ВНИИССОК

Физалис земляничный (*Physalis pubescens* L.) – перспективная овощная культура семейства Solanaceae, ягоды которой богаты полифенолами, каротиноидами, аскорбиновой кислотой и минеральными веществами. Для эффективного семеноводства данной культуры необходимы точные данные о продолжительности сохранения жизнеспособности семян и оптимальных сроках оценки их посевных качеств. Изучение всхожести семян в зависимости от срока хранения и сезона проращивания позволяет обеспечить долгосрочное сохранение генетического материала ценных сортов и установить пригодность семян для посева в различные периоды года.

Цель исследований – изучить всхожесть семян физалиса земляничного разных лет репродукции в зависимости от сезона проращивания.

Объект исследований – семена физалиса земляничного сорт Оранжевый жемчуг, урожай 2021–2024 годы.

Методы исследований. Исследования проведены в 2025 году на базе лаборатории физиологических основ семеноведения овощных культур ФГБНУ ФНЦО. Проращивание семян физалиса проводилось каждый сезон (март, июнь, сентябрь, декабрь) в лабораторных условиях при переменной температуре (30°C день, 20°C ночь) в чашках Петри в термостате ТСО-1/80 согласно ГОСТ 12038-84 в четырехкратной повторности. Энергию прорастания учитывали на шестые сутки, всхожесть на 12 сутки.

Результаты исследований. Анализ посевных качеств семян физалиса земляничного позволил выявить четкую зависимость от года репродукции и сезона проращивания (табл.).

Таблица. Посевные качества семян физалиса земляничного, 2025 год

Показатель	Год репродукции	Март	Июнь	Сентябрь	Декабрь
Энергия прорастания, %	2024	92	96	43	80
	2023	94	99	44	82
	2022	42	64	1	4
	2021	15	8	8	26
Всхожесть, %	2024	97	97	98	88
	2023	99	100	98	82
	2022	91	97	86	4
	2021	90	100	85	40

Наивысшие показатели отмечены у свежих семян (2024 г.) при весеннем и летнем посевах: энергия прорастания составила 92–96%, всхожесть – 97%. С увеличением срока хранения до 2–3 лет (2022 и 2023 годы репродукции) энергия прорастания снижалась, особенно в осенний и зимний периоды (до 1–4% в декабре у семян 2022 г.), тогда как всхожесть оставалась высокой. Семена 2021 года репродукции характеризовались низкой энергией прорастания во все сезоны (от 8 до 26%), однако всхожесть в марте и июне сохранялась на высоком уровне – 90–100%.

Наиболее стабильные и высокие показатели всхожести отмечены в весенний и летний период, а у свежих семян (2023 и 2024 год) – и при осеннем определении посевных качеств. Осеннее и зимнее проращивание приводит к значительному снижению энергии прорастания, что необходимо учитывать при проведении лабораторного контроля посевного материала.

Список литературы

1. Мамедов М. И., Енгальчев М. Р., Джос Е. А. Морфобиологические особенности и биохимический состав ягод физалиса пушистого (*Physalis pubescens* L.) в умеренном климате // Овощи России. 2017. № 2. С. 76-80.
2. ГОСТ 12038-84 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести».

АУДИТ И МОНИТОРИНГ МЕЛИОРИРОВАННЫХ ПОЙМЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ ДЛЯ УСТОЙЧИВОГО СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

С. А. МЕНЬШИКОВА

ФГБНУ «ФИЦ гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова», Москва

Формируясь в условиях периодического затопления, пойменные (аллювиальные) почвы в естественном состоянии характеризуются высоким плодородием, биологическим разнообразием и динамичностью почвообразования. Ключевые отличительные особенности – это чередование наносов (аллювия) наряду с наличием различных типов и подтипов почв в пределах одной поймы, обуславливаемые различием периодов затопления прирусловой, центральной и притеррасной частей. Высокое естественное плодородие формируется за счет накопления органических и минеральных веществ, создаются благоприятные условия для роста и развития растений и дальнейшего депонирования органического углерода. Атмосферный тип водного питания, присущий Нечерноземной зоне, дополняется намывным (в период половодья), грунтовым, а также склоновым, характерным для пойм со значительным перепадом высот. Уровень грунтовых вод и степень увлажнения сезонно меняются в широком диапазоне.

Сельскохозяйственная деятельность противопоставляет природные и антропогенные процессы. Комплексные мелиорации как эффективный инструмент регулирования свойств и режимов почв призваны уравновесить влияние природных и агрогенных факторов. Мелиорированные пойменные почвы особо ценные, так как при мелиорации происходит коренное улучшение водно-воздушного режима.

Выбор методов и способов осушения зависит от комплекса характеристик и особенностей пойменных территорий. В процессе освоения пойменные земли нуждаются, в первую очередь, в осушительной мелиорации, обустройстве дренажных систем и каналов с возможностью двустороннего регулирования водного режима (или устройстве оросительных систем), обваловании в комплексе с культуртехнической, химической и агромелиорацией [1, 2]. Улучшение водного режима с целью сельскохозяйственного использования должно сопровождаться мероприятиями, ограничивающими диффузный сток и компенсирующими вынос питательных элементов с сельскохозяйственных земель.

Вместе с тем практически отсутствуют сведения о площадях мелиорированных земель, занятых в сельскохозяйственном производстве, расположенных в пойменных участках, нет точных данных об их состоянии. Необходим аудит, который подразумевает определенные этапы, включая сбор данных, полевые исследования, анализ документации и использование современных цифровых технологий. Процесс аудита регламентируется законодательством, в частности Федеральным законом «О мелиорации земель» и связанными нормативными актами. Для учета спектра условий целесообразно использовать системы типизации [1].

Разнообразие пойм, различия в их рельефе, типах и свойствах почв, которое можно увидеть на примере двух крупных пойменных участков Московской области: Яхромская пойма, расположенная на севере Московской области, Дмитровский район и Дединовская пойма, юго-восток Московской области, Луховицкий район, определяют виды мелиораций и сельскохозяйственное использование под пашню, сенокосы или пастбища. В таблице приведена краткая сравнительная характеристика мелиорированных пойменных участков Яхромской и Дединовской поймы (правобережная часть). Оба участка давно освоены и активно используются для производства сельскохозяйственной продукции. Являясь двумя разными природными объектами, они имеют как общие черты, так и существенные различия в геоморфологии, периодах освоения и агрогенной трансформации, современном использовании и экосистемных особенностях.

Таблица. Сравнительная характеристика мелиорированных участков Яхромской и Дединовской пойм (в т. ч. по Г. В. Добровольскому [3])

Преобладающие характеристики территории	Яхромская пойма, Дмитровский район МО	Дединовская пойма (правобережная часть), Луховицкий район МО
Площадь мелиорированных участков, их состояние	10 тыс. га, мелиоративная система реконструирована, состояние хорошее	8 тыс. га, состояние удовлетворительное, высокая степень износа элементов гидромелиоративной системы
Рельеф	Пониженно-равнинный, слабонаклонный	Сегментно-гравистый, плоско-гравистый, обвалованный
Продольный и поперечный уклон поверхности	0,0001–0,0003 0,001–0,01	0,001–0,004, локальные повышения в прирусловой части до 0,02
Тип водного питания	Комбинированный (атмосферный, аллювиальный, грунтовый)	Комбинированный (атмосферный, аллювиальный, грунтовый, грунтово-напорный, делювиальный)
Преобладающие почвы	Торфяно-болотные, среднегидроморфные антропогенно-трансформированные	Пойменные дерновые, луговые и лугово-болотные, слабо, средне и сильногидроморфные антропогенно-трансформированные
Мелиорации и использование	Осушение и комплексные мелиорации; Распашка, выращивание овощных культур, в том числе на орошении	Осушение и комплексные мелиорации, обвалование и гидротехническое регулирование р. Оки; Сенокосы и пастбища, распашка, выращивание кормовых, зерновых, орошение овощных культур
Экосистемные особенности и экологические ограничения	Снижение диффузного, очистка дренажного стока и др. природоохранные мероприятия, восполнение биогенных элементов, депонирование углерода	Барьерно-экологическая роль по задержанию и миграции в водоприемники (р. Воблю, Оку) элементов-загрязнителей, очистка дренажного и снижение диффузного стока, депонирование углерода, восполнение биогенных элементов

В настоящее время, кроме высокой степени износа элементов гидромелиоративных систем (до 90%), сопровождающейся снижением производительности, выявлена проблема ускорения минерализации и выноса органического вещества (снижение до 1–2%) и биогенных элементов пойменных почв. Подробный анализ состояния этих территорий, включающий аудит и комплексный мониторинг, синтезирующие срезы данных за различные временные периоды, интегрированные в геоинформационные системы, позволяют разрабатывать научно обоснованные мероприятия по эффективному и устойчивому функционированию сельскохозяйственных предприятий, расположенных на пойменных землях, а также моделировать и прогнозировать изменения состояния компонентов природной среды.

Список литературы

1. Пыленок П. И. Мелиорация пойменных земель // В сборнике: Fundamental and applied approaches to solving scientific problems. Сборник научных статей по материалам XVI Международной научно-практической конференции. Уфа, 2024. С. 154–159.
2. Пчёлкин В. В. Обоснование мелиоративного режима осушаемых пойменных земель (на примере Московской области). Автореферат дис. ... доктора технических наук / Московский государственный университет Природообустройства. М., 2003. 50 с.
3. Добровольский Г. В., Балабко П. Н., Стасюк Н. В., Быкова Е. П. Аллювиальные почвы речных пойм и дельт и их зональные отличия // Аридные экосистемы, 2011. Т. 17. № 3(48). С. 5–13.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГООБМЕНА В ПОЧВАХ ПРИИЛЬМЕНСКОЙ НИЗМЕННОСТИ

П. М. НЕРОБЕЛОВ^{1,2}, В. И. ГОРНЫЙ¹, О. В. БАЛУН¹

¹ СПб ФИЦ РАН – Научно-исследовательский центр экологической безопасности
Российской академии наук, Санкт-Петербург;

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

На снимках, полученных спутником Landsat-8 10 марта 2021 г. в Приильменской низменности (Новгородская область) выявлены признаки опережающего снеготаяния: локальный бесснежный участок в пределах обширного пахотного поля, покрытого снегом. Температура поверхности этого участка была значительно выше, чем окружающего снежного покрова (рис. 1).

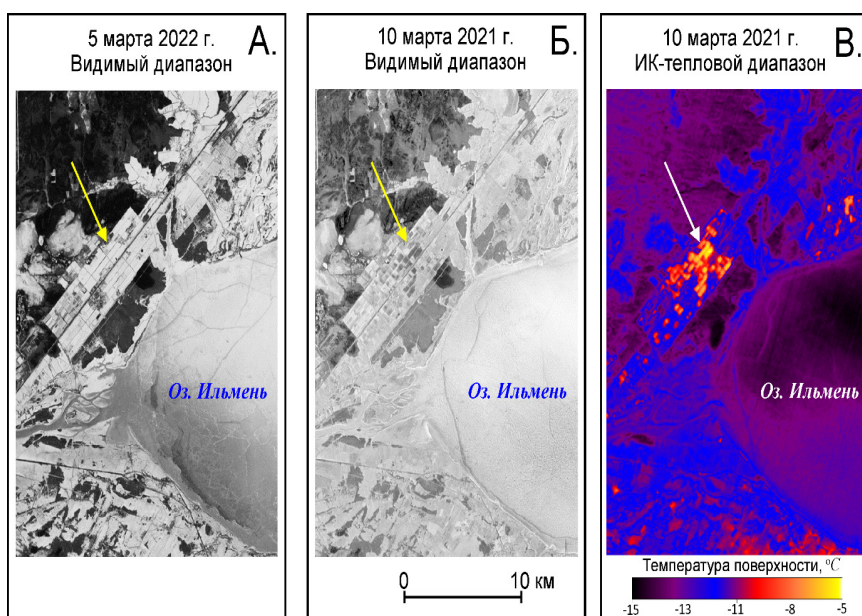


Рисунок 1. Весенние снимки, полученные спутником Landsat 8 [1].

А. и Б. – Видимый диапазон спектра. В. – Инфракрасный-тепловой диапазон. Стрелкой показан участок опережающего снеготаяния

Высказана гипотеза об эндогенном подогреве почвы на этом участке, т. к. эффекты опережающего снеготаяния индицируют высокий конвективный вынос эндогенного тепла [2].

В условиях Приильменской низменности возможны следующие механизмы, вызывающие эффект опережающего снеготаяния: вертикальный подъем слаботермальных вод; экзотермические реакции в почве; солнечный нагрев почв с низким альбедо.

В июне 2023 г на «теплом» и «холодном» участках были установлены зонды для мониторинга годового хода температуры почвы на трех глубинах: 0,1 м, 0,5 м и 1,0 м. Контактные измерения температуры выполнялись портативными электронными термометрами с функцией памяти Elitech RC-5 с чувствительностью 0,1°C. Температура почв с 2023 по 2024 г. каждый час, а с 2024 по 2025 г. каждые 15 мин в течение года записывалась в электронную память. Мониторинг показал, что температура почвы на «теплом» участке в течении всего года выше, чем на «холодном». Это позволило предположить, что на «теплом» участке имеет место эндогенный подогрев почвы. Также на «теплом» участке в конце февраля – начале марта 2024 г. было отмечено резкое снижение температуры (выделено на рис. 2). Такое снижение может быть связано с фильтрацией талой воды по стенке зонда или с прекращением экзотермического процесса в почве. Этот феномен требует дополнительного изучения.

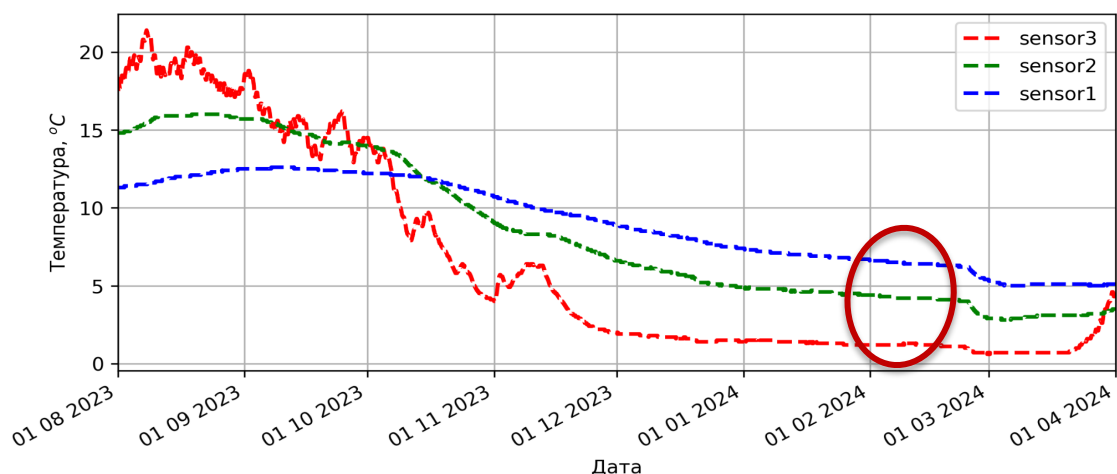


Рисунок 2. Зависимость температуры в почве на теплом участке от времени:
sensor1 – 1 м, sensor2 – 0,5 м, sensor3 – 0,1 м

Целью настоящего исследования является определение природы повышения температуры на «теплом» участке, а также определение значения плотности теплового потока из недр Земли на теплом и холодном участках.

Для решения данной задачи была создана модель теплообмена на основе работы [3], которая учитывает фазовый переход в почве. Отметим, что в данной работе пренебрегли переносом влаги в почве. В модели теплого участка предусмотрен внутренний источник тепла мощностью до 5 Вт/м^3 , имитирующий экзотермические реакции в почве. Сравнение результатов моделирования с измеренными данными показало, что данный вид тепловыделения не оказывает заметного влияния на температуру почвы.

Значительно большее влияние оказывает тепловой поток на нижней границе. Моделирование показало, что на теплом участке плотность глубинного теплового потока больше, чем на холодном участке при тех же свойствах почвы и физических условиях. Это может приводить к тому, что температура на теплом участке в течении всего года выше, чем на холодном.

Список литературы

1. V. Gornyy, O. Balun, A. Kiselev, S. Kritsuk, I. Latypov, and A. Tronin. Signs of a Significant Endogenous Component in the Thermal Regime of Soils on Agricultural Lands of the Novgorod Region // Agriculture Digitalization and Organic Production. Proceedings of the Third International Conference on Agriculture Digitalization and Organic Production, St. Petersburg, Russia, June 05–07 2023. P. 339–348.
2. White, D.E., Rapid heat-flow surveying of geothermal areas, utilizing individual snowfalls as calorimeters. // J. Geophys. Res. 1969. V. 74. P. 5191–5201.
3. Алипова К. А., Богословский Н. Н. Задача Стефана для уравнения теплопроводности // Всероссийская молодежная научная конференция. Все грани математики и механики. 2016. С. 92–99.

ВЛИЯНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРЕПАРАТОВ НА УРОЖАЙНОСТЬ СОРТОВ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ НА ПРИМЕРЕ КАШТАНОВЫХ ПОЧВ ВОЛГО-ДОНСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ

Е. И. ПОДКОВЫРОВ, И. В. КИРИЧКОВА

ФГБОУ ВО Волгоградский государственный аграрный университет, Волгоград

Озимая пшеница является основной зерновой культурой в Волгоградской области. В условиях засушливого климата Нижнего Поволжья получение стабильных урожаев требует применения современных технологий возделывания, включая использование биологических препаратов. Они позволяют снизить использование химических средств защиты растений, повышают устойчивость агроэкосистем и улучшают качество получаемой продукции [1]. Целью исследования стало обоснование применения биопрепаратов как элемента технологии возделывания сортов озимой пшеницы на каштановых почвах.

Исследования проводились на базе ТОО «Липовское» Ольховского района Волгоградской области. Почвенный покров представлен каштановыми почвами с содержанием гумуса 2,5–3,4%. Объектами исследований выступили три сорта озимой пшеницы отечественной селекции: Аскет, Станичная и Камышанка 9. В схеме полевого опыта изучали листовые подкормки в фазу выхода в трубку: контроль (вода), Биостим Универсал и Гумат Калия Суфлер. Площадь учетных делянок составляла 25 м², повторность 4-кратная, размещение рендомизированное.

Применение биопрепаратов оказало положительное влияние на ростовые процессы и элементы структуры урожая. Отмечено увеличение высоты растений на 7–8 см, длины колоса — на 0,7–0,9 см, количества зёрен в колосе — на 19–24% по сравнению с контролем. Анализ урожайности показал существенное превосходство вариантов с применением биопрепаратов (табл.).

Таблица. Урожайность сортов озимой пшеницы в зависимости от варианта обработки, т/га

Сорт	B1 (контроль)	B2 (Биостим)	B3 (Гумат)	Прибавка к контролю, %
Аскет	3,52	4,21	4,08	16–20
Станичная	3,35	4,02	3,88	16–20
Камышанка-9	3,24	3,86	3,72	15–19

Максимальная урожайность отмечена у сорта Аскет при использовании Биостима Универсал (4,21 т/га). Биохимический анализ зерна показал улучшение его качества: содержание белка находилось в пределах 12,1–12,4%, клейковины — 27,28–27,63% [2].

Таким образом, для условий каштановых почв Волго-Донского междуречья наиболее эффективным оказалось применение Биостима Универсал. Препараты способствуют улучшению минерального питания, формированию запасных питательных веществ в зерне и могут быть рекомендованы для внедрения в производство зерна III класса в засушливых условиях региона [3].

Список литературы

1. Балашов В. В., Агафонов А. К. Влияние регуляторов роста и фунгицидов на урожайность и качество зерна озимой пшеницы в подзоне почв Волгоградской области // Плодородие. 2013. № 1 (70). С. 28–29.
2. Вильдфлуш И. Р., Цыганов А. Р. Влияние новых форм удобрений и регуляторов роста на фотосинтетическую деятельность посевов, урожайность и качество зерна // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. 2019. Т. 57. № 3. С. 297–307.
3. Вакуленко В. В., Шаповал О. А. Новые регуляторы роста в сельскохозяйственном производстве // Научное обеспечение и совершенствование методологии агрохимического обслуживания земледелия России: сб. статей. М., 2000. С. 71–89.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ПОКАЗАТЕЛИ ПОЧВ ОСТРОВА РУССКИЙ

Т. И. ПОНОМАРЕВА

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

Эрозия почв – это процесс разрушения верхних, наиболее плодородных слоёв почвы и подстилающих пород талыми и дождевыми водами или ветром. На территориях с обильными осадками и пересеченным рельефом активно проявляются эрозионные процессы, формируя нарушения почвенного покрова и способствуя смыву материала вниз по склону [1].

Около 4% территории Приморского края – земли, деградированные в результате водной и ветровой эрозии. Их площадь заметно растет: например, в 2011 г. по сравнению с 2009 г. произошло увеличение площади земель, нарушенных водной эрозией более чем в два раза. При этом наибольшую опасность для почв острова Русский представляет водная эрозия. Климат на острове Русском муссонный, который говорит об обилии осадков в летний сезон, что значительно влияет на развитие водной эрозии на территории острова [1].

Сочетание обильного увлажнения, характера осадков и преобладания холмисто-горного рельефа создает условия для развития водной эрозии, которая ведет к последствиям. Например, идет размыв берегов и русла рек, образуется концентрированный поток на крутых склонах, приводя к формированию глубоких намывов [1]. Изучение эрозионных процессов и их последствий необходимо для понимания изменений физико-химических свойств и ключевых показателей почвенного покрова, а также для разработки мер по предотвращению его деградации в дальнейшем, что актуально для островных территорий.

Объектами исследования стали почвенные образцы, отобранные на острове Русском, методом прикопки. Координаты отбора проб 1, 2 и 3 точки: 43.022240 с. ш. и 131.886717 в. д., 43.022165 с. ш. и 131.886716 в. д., 43.022089 с. ш. и 131.886695 в. д. соответственно. Точки расположены на высоте 28, 26 и 24 метра над уровнем моря соответственно (рис.). Каждая на расстоянии трёх метров друг от друга. По классификации 2004 года почвы относятся к бурозёмам типичным [2].

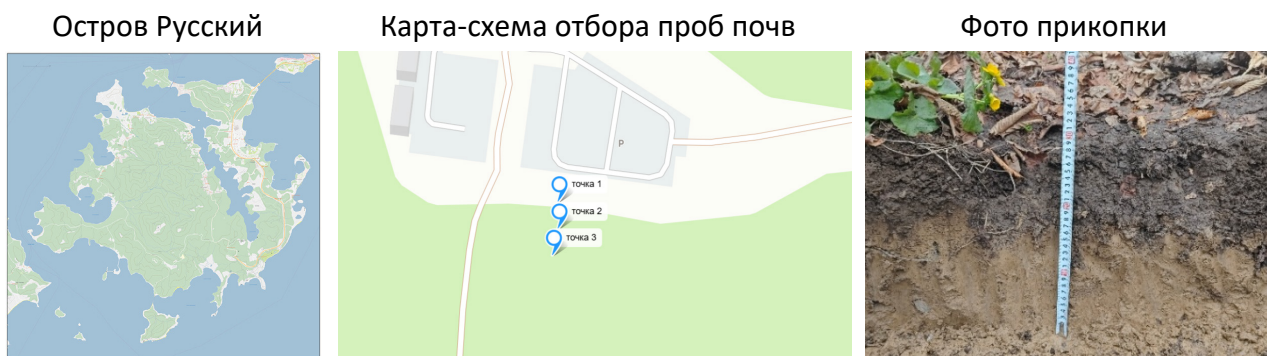


Рисунок. Карта русского острова, карта схема района отбора проб почвы и фото прикопки

В ходе исследования в почвенных образцах были изучены показатели кислотно-щелочных свойств потенциометрическим методом в водной и солевой вытяжках [3], содержание органического углерода с пересчетом на содержание гумуса методом мокрого озоления по Тюрину [3] и величину гидролитической кислотности по методу Каппена [3].

Таблица. Результаты анализов

Исследуемый образец	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	Сорг, %	Содержание гумуса, %	Гидролитическая кислотность, мг-экв/100 г
Точка №1	4,2	3,6	2,71	4,6	9,2
Точка №2	6,8	6,2	8,33	14,3	1,0
Точка №3	4,8	4,1	1,45	2,5	6,8

В ходе исследования кислотно-щелочных свойств результаты показателей актуальной кислотности (водная вытяжка) представлены кислой в точках № 1 и № 3, а также в солевой вытяжке кислая, однако в точке № 2 реакция среды представлена нейтральной в водной вытяжке и в солевой среда близка к нейтральной.

По содержанию органического углерода были получены следующие результаты: в точках № 1 и № 3 содержание относится к низкогумусовому, когда точка два относится к высокогумусовой. Результаты содержания органического углерода может говорить о том, что в нижней точке склона происходит переувлажнение, оглеение или заболачивание, которое препятствует накоплению органического вещества, несмотря на его положение внизу склона

Из пересчета на гумус результаты следующие, содержание в точках относится к высокогумусовому, а точка № 2 относится к перегнойным, поэтому предполагается, что происходит привнос вещества сверху, после чего оно застаивается в точке № 2.

По гидролитической кислотности точки 1 и 3 относится к очень сильно кислой, в то время как в точке №2 она является нейтральной. На основании таких данных можно предположить, что это пример почвенной катены (пространственной неоднородности почв на склоне). В данном случае эрозия на таком склоне будет развиваться не равномерно сверху вниз, а локально, а точка №2 будет играть роль естественного щита

Результаты показали изменения в средней точке № 2 где содержание гумуса больше в несколько раз, реакция среды близка к нейтральной и гидролитическая также близка к нейтральной, возможно происходит привнос с вышележащей точки и застаивается, образуя большее содержание органики и благоприятные условия на формирования реакции среды.

Работа выполнена при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования № FZNS-2026–0020.

Список литературы

1. Старожилов В. Т. Ландшафтные условия развития эрозионно-денудационных процессов юга Дальнего Востока / В. Т. Старожилов, А. М. Дербенцева, В. И. Ознобихин [и др.]. Владивосток: Изд-во ДВФУ, 2008. 100 с.
2. Классификация и диагностика почв России / Л. Л. Шишов, В. Д. Тонконогов, И. И. Лебедева, М. И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
3. Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу. 2-е изд. М.: Издательство Московского университета, 1970. 487 с.

ОПТИМИЗАЦИЯ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ АГРОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

А. В. РОЖКО

ФИЦ «Почвенный институт им. В. В. Докучаева», Москва

Центральным принципом современного научного исследования является способность не только наблюдать и описывать, но и эффективно классифицировать изучаемые явления. В условиях постоянного роста объемов данных и усложнения их структуры фундаментальной задачей становится переход от интуитивных схем к объективной группировке объектов на основе их общих характеристик. Особенно остро этот вопрос стоит в сельскохозяйственной отрасли, где потенциал плодородия и продуктивности определяется не отдельными показателями, а оптимальностью их соотношений в едином, целостном проявлении.

Применение статистических методов, в частности кластерного анализа, позволяет выявлять скрытые закономерности в сложноорганизованных массивах информации. В отличие от классических подходов, кластеризация реализует парадигму обучения без учителя (unsupervised learning), когда внутренняя структура данных строится самой математической моделью на основе мер сходства или различия. Однако неконтролируемая природа этого процесса делает его одной из наиболее сложных задач машинного обучения.

Ключевым этапом, определяющим итоговое разделение объектов, является выбор метрики расстояния. Метрика количественно определяет степень «похожести» объектов и должна выбираться индивидуально, исходя из целей исследования и физической природы признаков. Для одномерного случая, рассматриваемого в данной работе, наиболее универсальным и логичным подходом является использование евклидова расстояния.

В одномерном пространстве выбор евклидовой метрики обусловлен следующими факторами:

- **Геометрическая эквивалентность:** для одного признака евклидово расстояние равно модулю разности, что является кратчайшим путем между точками на прямой.

- **Конвергенция метрик:** такие показатели, как манхэттенское расстояние и расстояние Чебышёва, в одномерном случае неизбежно сводятся к значению модуля разности.

- **Стабильность результатов:** использование данной метрики позволяет избежать искажений относительных величин, характерных для нормированных мер (например, Канберрского расстояния), которые излишне чувствительны к значениям, близким к нулю.

Помимо выбора метрики, на структуру итогового разбиения критически влияет метод связи. В исследовании рассматриваются различные подходы, включая метод Уорда (Ward.D2), направленный на создание компактных сферических кластеров за счет минимизации увеличения дисперсии, а также методы одиночной, полной и средней связи.

Для минимизации субъективности исследователя в работе реализована методика многокритериального поиска оптимальной модели. Процесс включает три последовательных этапа:

1. **Определение количества кластеров (k):** используется подход «голосования» на основе пакета NbClust, вычисляющего до 30 различных индексов качества. Оптимальным признается значение k, соответствующее моде рекомендаций.

2. **Оценка валидности:** выбор конкретного алгоритма (Ward.D2, Average, K-means и др.) осуществляется на основе максимизации средней ширины силуэта (ASW). Коэффициент силуэта объединяет характеристики сплоченности и разделенности групп.

3. **Верификация:** финальное решение проверяется на соответствие физической природе данных. В одномерном случае (например, при анализе урожайности) обязательным является соблюдение принципа непересекающихся интервалов — кластеры должны представлять собой четкие, последовательные отрезки на числовой оси.

Реализованный алгоритм позволяет перейти от теоретических предположений к объективному анализу, обеспечивая выбор наиболее устойчивой математической модели и исключая влияние человеческого фактора на процесс классификации.

Проведённый анализ показал, что наиболее обоснованным количеством кластеров для исследуемого ряда урожайности трав является $k = 3$. Данное решение было получено на основании процедуры голосования индексов пакета NbClust. Распределение рекомендаций различных методов представлено в таблице.

Таблица. Результаты определения оптимального числа кластеров

Ward.D	Ward.D2	Single
2	0	12
Complete	Average	McQuitty
4	3	4
Median	Centroid	K-means
3	0	0

Несмотря на наличие отдельных экстремальных рекомендаций (например, 12 кластеров для метода одиночной связи), большинство устойчивых методов кластеризации указывают на диапазон от 3 до 4 групп. Дополнительная оценка качества разбиения по коэффициенту силуэта показала преимущество решения с тремя кластерами.

На следующем этапе была выполнена проверка различных алгоритмов кластеризации на соответствие физической природе исследуемых данных. Для одномерного признака урожайности важным условием является формирование непрерывных непересекающихся интервалов значений без искусственного дробления выборки.

Анализ результатов, представленных на рисунке, показал существенные различия между методами связи. Наиболее обоснованное разбиение получено методом median. В данном случае выделяются три устойчивых кластера, соответствующие низкому, среднему и высокому уровням урожайности. При этом границы между группами являются чёткими, а сами кластеры характеризуются высокой внутренней однородностью и отсутствием пересечений по оси значений признака.

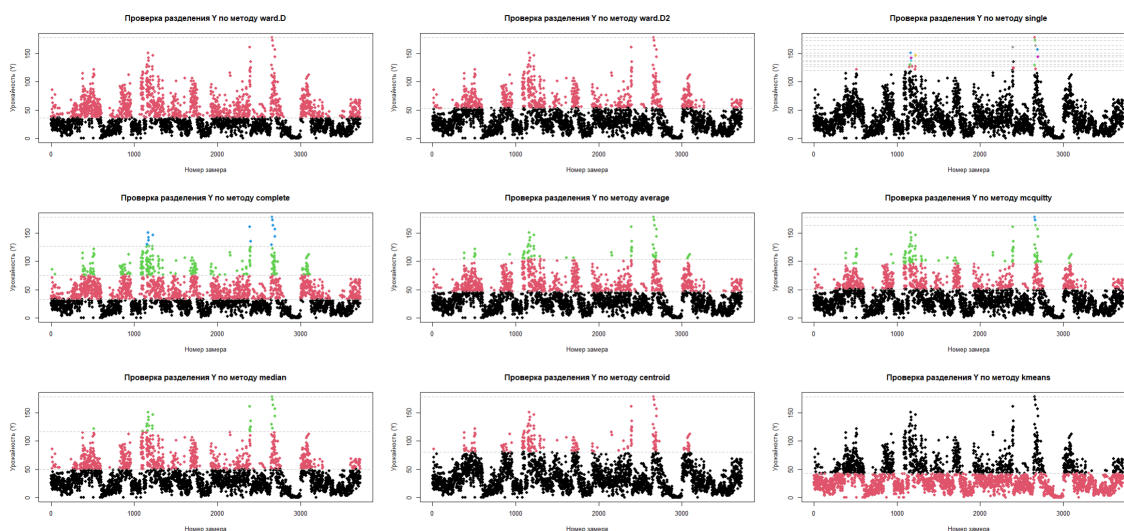


Рисунок. Сравнение результатов кластеризации урожайности различными методами

Таким образом, по совокупности критериев оптимальным решением является использование трёх кластеров, полученных методом median. Данный подход обеспечивает устойчивое разделение уровней урожайности и может быть рекомендован для дальнейшего анализа.

ВПИТЫВАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ПОЧВ В ЛЕСОПОЛОСАХ СКЛОНОВ ПОЛЯРНЫХ ЭКСПОЗИЦИЙ

Ю. О. РУБАНИК

ФГБНУ «Курский федеральный аграрный научный центр», Курск

Водная эрозия почв остается одной из наиболее серьезных экологических проблем, приводящей к деградации сельскохозяйственных земель и снижению их продуктивности [1]. В условиях глобального изменения климата, сопровождающегося увеличением частоты и интенсивности ливневых осадков, риски эрозионных процессов существенно возрастают [2]. Эффективным средством борьбы с водной эрозией на пахотных склонах являются стокорегулирующие лесные полосы, которые переводят поверхностный сток во внутрипочвенный и способствуют улучшению водного режима прилегающих территорий [3]. Ключевой гидрологической характеристикой, определяющей противоэрозионную эффективность лесных полос, является впитывающая способность почвы, однако ее оценка может существенно зависеть от применяемого метода исследования.

Цель работы – провести сравнительную оценку впитывающей способности почв в лесных полосах, расположенных на склонах северной и южной экспозиций, с использованием методов дождевания стоковых площадок и напорного впитывания.

Методы. Исследования проводили на водосборе стационарного многолетнего опытного участка ФГБНУ «Курский ФАНЦ», расположенного между населенными пунктами Николаевка и Черниченские дворы Медвенского района Курской области.

На склонах водосборов через 216 метров размещены узкие двухрядные стокорегулирующие лесные полосы с канавами в междурядье и валом по нижней опушке. Посадка лесных полос осуществлена весной 1985 г. серийными лесопосадочными машинами. Лесные полосы (ЛП) – однопородные, представлены тополем евро-американским гибрид «Робуста».

Почвенный покров представлен черноземом типичным и выщелоченным среднесиловым тяжелосуглинистым.

Впитывающую способность определяли в верхнем ряду лесных полос и в канавах на склонах южной и северной экспозиций. Метод дождевания стоковых площадок предполагал отбор почвенных монолитов шириной 0,25 м и глубиной – 0,20 м, и физическое моделирование дождя с использованием портативной дождевальной установки (патент РФ № 184625). Метод малых заливаемых площадей (напорное впитывание) реализован с помощью металлических цилиндров (внешний диаметр 0,62 м, внутренний – 0,28 м) и сосуда Мариотта, поддерживающего постоянный уровень воды. В обоих случаях перед опытами определяли исходную влажность и плотность почвы.

Результаты. Анализ физических свойств почвы показал, что плотность сложения во всех вариантах была близкой и составила в среднем $1,03 \text{ г/см}^3$. Влажность почвы в лесных полосах разных экспозиций находилась на одном уровне (в среднем 19,03%), тогда как в канавах она была значительно выше: на 20,08% на южном склоне и на 25,68% на северном склоне.

Таблица. Параметры почвы перед проведением дождевания

	Влажность, %	Плотность, г/см^3
Южная экспозиция ЛП	$18,82 \pm 0,83$	$0,93 \pm 0,10$
Южная экспозиция канава	$23,55 \pm 0,21$	$1,03 \pm 0,01$
Северная экспозиция ЛП	$19,24 \pm 0,62$	$1,05 \pm 0,02$
Северная экспозиция канава	$25,89 \pm 0,34$	$1,03 \pm 0,03$

При моделировании дождя (интенсивность 1,15 мм/мин) время начала стока на южном склоне (4 мин в ЛП, 3 мин в канаве) было вдвое больше, чем на северном (2 мин и 1,4 мин соответственно). Установившаяся интенсивность впитывания на южном склоне составила 0,88–0,93 мм/мин, что на 5–7 % выше, чем на северном (0,82–0,84 мм/мин).

При исследовании методом малых заливаемых площадей получена иная картина. Максимальная интенсивность впитывания зафиксирована в канаве на северном склоне: за первый час она снизилась с 53,9 до 25,74 мм/мин, что на 78 % превышает соответствующий показатель для канавы южного склона (с 21,29 до 5,73 мм/мин). В самих лесных полосах различия между экспозициями были незначительными. Равновесная интенсивность впитывания (после 30 мин) составила в среднем 2,8 мм/мин.

Выводы

1. Результаты оценки впитывающей способности почв в лесных полосах зависят от применяемого метода: метод дождевания выявил преимущество южного склона по установившейся интенсивности впитывания, тогда как метод напорного впитывания показал значительно более высокие показатели для канавы северной экспозиции, особенно в начальный период.

2. Полученные различия, вероятно, обусловлены разными гидрологическими условиями, моделируемыми каждым из методов, а также особенностями структурно-агрегатного состава и увлажнения почв на склонах разных экспозиций.

3. Для объективной характеристики противоэрозионной эффективности лесных полос целесообразно сочетать методы, моделирующие разные условия поступления влаги в почву – дождевание как имитацию ливневых осадков, так и напорное впитывание для оценки водопроницаемости при постоянном напоре воды.

Список литературы

1. Прущик А. В. Стокорегулирующая роль березовых лесных полос / А. В. Прущик, Ю. О. Рубаник, Е. В. Дорошенко // Достижения науки и техники АПК. 2024. Т. 38, № 8. С. 4–8. DOI: 10.53859/02352451_2024_38_8_4
2. Тасанова Ж. Распространение эрозионных процессов и эрозионное районирование на территории Западно-Казахстанской области / Ж. Тасанова, У. Нургуль, А. Асетева // Ғылым және Білім. 2022. Т. 2. №4(69). С. 12–19. DOI: 10.52578/2305-9397-2022-4-2-12-19
3. Вадюнина А. Ф. Методы исследования физических свойств почв / А. Ф. Вадюнина, З. А. Корчагина. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.

ОПЫТ ФОРМИРОВАНИЯ БАЗЫ ДАННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ, ОТРАЖАЮЩИХ ЭКОЛОГИЧЕСКУЮ БЕЗОПАСНОСТЬ ВЕДЕНИЯ ОРОШЕНИЯ ОГРАНИЧЕННО ПРИГОДНЫМИ ВОДАМИ

Н. Н. РУБЦОВ, Е. Р. ГАВЛОВСКАЯ, Е. А. ДУНАЕВА

ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма»,
г. Симферополь

Введение

Применение ограничено пригодных вод при орошении в случае их длительного использования может привести к негативным последствиям: засолению, осолонцеванию и загрязнению тяжёлыми металлами почв, токсическому эффекту на возделываемые культуры, и разрушительному воздействию на металлические и бетонные конструкции оросительных систем [1–3]. Определение степени влияния данной категории вод на почвенные условия, выращиваемые растения и оросительные системы требует оценки их состава и свойств по ряду показателей, количество которых зависит от характеристик самих исследуемых вод и почв.

В связи с этим *целью работы* является формирование базы данных показателей количественной и качественной оценки орошаемых почв и оросительных вод, отражающих экологическую безопасность ведения орошения ограничено пригодными водами.

Материалы и методы

Формирование вышеназванной базы данных включало следующие этапы:

1. Разработка её структуры.
2. Поиск сведений о показателях количественной и качественной оценки орошаемых почв и оросительных вод в литературных источниках.
3. Пополнение базы данных указанными сведениями согласно разработанной структуре.

В качестве литературных источников использовались ГОСТы, методические рекомендации, нормативные документы и научные публикации.

Результаты

Структура базы данных показателей, отражающих экологическую безопасность ведения орошения ограничено пригодными водами представлена в таблице. В неё вошли 11 пунктов: номер показателя по порядку, его наименование, ID, обозначение, наименование и обозначение единицы измерения, область применения, методика определения, формула, классификация и источник в виде библиографической ссылки.

Всего выделено 74 показателя как количественной, так и качественной оценки орошаемых почв и оросительных вод, отражающих экологическую обстановку при орошении ограничено пригодными водами различного качества в типовых для степной зоны Крымского региона почвенно-климатических условиях.

База данных представлена в виде таблицы Microsoft Excel на двух листов, по одному для показателей оценки почв и вод, и двух соответствующих папок с 76 файлами формата .docx.

Таблица. Структура базы данных показателей, отражающих экологическую безопасность ведения орошения ограниченно пригодными водами

№	Наименование поля	Тип	Описание
1	Номер по порядку	числовой	Номер по порядку
2	Наименование показателя	текстовый	Наименование показателя, отражающего экологическую безопасность ведения орошения ограниченно пригодными водами
3	ID	числовой	Идентификатор показателя
4	Обозначение показателя	текстовый	Обозначение показателя по международной системе
5	Наименование единицы измерения	текстовый	Наименование единицы измерения по международной системе
6	Обозначение единицы измерения	текстовый	Обозначение единицы измерения по международной системе
7	Область применения	текстовый	Ссылка на файл с кратким описанием как применяется показатель при оценке качества почв/вод
8	Методика определения	текстовый	Краткое описание методики определения показателя
9	Формула	текстовый	Ссылка на файл с формулой по определению показателя
10	Классификация	текстовый	Ссылка на файл с классификацией по оценке качества почв/вод
11	Источник	текстовый	Библиографическая ссылка на источник

Выводы. База данных относится к области сельского хозяйства, мелиорации и управления водными ресурсами. Может применяться при разработке методических рекомендаций и поддержке принятия решений по организации системы орошения с использованием ограниченно пригодных вод в условиях существенного дефицита водных ресурсов.

Список литературы

1. Безднина С. Я. Научные основы оценки качества воды для орошения: монография. Рязань: РГАТУ, Мещерский научно-технический центр, 2013. 171 с.
2. Панкова Е.И., Хитров Н.Б., Воробьева Л.А. [и др.]. Методическое руководство по оценке засоления почв. Москва: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2025. 139 с.
3. Руководство по контролю и регулированию почвенного плодородия орошаемых земель. Новочеркасск: ФГБНУ «РосНИИПМ», 2015. 141 с.

СОДЕРЖАНИЕ КАТЕХИНОВ В ЛИСТЬЯХ РАЗНЫХ ЭКОТИПОВ ДУБА ЧЕРЕШЧАТОГО (*QUERCUS ROBUR*) КАК ПОКАЗАТЕЛЬ СТРЕССА

Н. Е. СПИРИДОНОВ, А. Ю. ГЕТМАНЕНКО

ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет», Волгоград

Дуб черешчатый (*Q. robur*) в Волгоградской области произрастает на южной границе своего ареала. Вследствие резко континентального климата древесные растения регулярно подвергаются сильному оксидативному стрессу. Традиционные методы оценки засухоустойчивости деревьев по внешним признакам упускают из виду ранние стадии угнетения, в связи с этим актуальна необходимость поиска биохимических маркеров стресса, способных показать состояние дерева еще до появления выраженных последствий оксидативного стресса.

Актуальность исследования. Изучение внутривидового разнообразия различных экотипов дуба позволяет выявить, какие из них обладают наибольшим потенциалом засухоустойчивости [1]. Понимание биохимических механизмов адаптации разных экотипов позволит подобрать семенной материал для лесовосстановления и защитного лесоразведения в засушливых регионах России, а также проложить перспективы для изучения молекулярно-генетических механизмов засухоустойчивости древесных растений аридного климата.

Литературный обзор. Катехины (флаван-3-олы) являются достаточно обширной группой растительных органических соединений: число известных флаван-3-олов превышает 1000. В растениях катехины встречаются в изомерных формах, соответствующих (+)-катехину и (-)-эпикатехину. Катехины выступают в роли первых биохимических маркеров обезвоживания растительных клеток. Известно, что катехины проявляют мощную антиоксидантную активность благодаря наличию в структуре большого количества фенольных гидроксильных групп [2].

Материалы и методы. Объектами анализа послужили листья трех экотипов *Q. robur*, собранные и заготовленные 18 мая 2026 г. в г. Волгоград Волгоградской обл.: Краснойармейский р-н, окр. Чапурниковской балки, на высоте 74–84 м над ур. м. (географические координаты: 48°30'13" 44°29'27"). Сушку сырья проводили в сушильном шкафу по стандартной методике государственной фармакопеи ОФС.1.5.3.0007. Количественное определение катехинов определяли спектрофотометрически.

Экспериментальная часть. Для спектрофотометрического анализа использовалась следующая методика получения экстракта: точную навеску растительного сырья ($0,1 \pm 0,001$ г) растирали до гомогенного состояния в присутствии 96% этанола (1:50), гомогенат центрифугировали при 1800 g в течение 10 минут. В пластиковую кювету вносили 0,4 мл супернатанта и 1,6 мл ванилинового реактива (10 мл 2,5% спиртового раствора ванилина, 90 мл концентрированной соляной кислоты, далее ВР). Оптическую плотность измеряли на спектрофотометре ПЭ-5400В через 5 минут после добавления ВР при длине волны 502 нм в 2 аналитических повторностях. В качестве раствора сравнения использовали смесь супернатанта с дистиллированной водой в том же соотношении (1:4) для каждой пробы [3].

В качестве эталонного раствора для построения градуировочного графика использовали стандартный раствор ($\pm$)-катехина (рацемата), приготовленного следующим образом: 0,002 г (точная навеска) катехина растворяли в 100 мл 96% этанола [2]. Для построения градуировочного графика готовили серию 2-кратных разведений до получения 4 точек на конечном графике и спектрофотометрировали по вышеописанной методике; в качестве раствора сравнения использовали 96% этанол. Результаты спектрофотометрии образцов с добавлением ВР вынесены в таблицу.

Таблица. Содержание катехина в экотипах дуба

Экотип дуба черешчатого	Содержание фенолов в пересчете на катехин в сухой массе сырья, мг/г
Нагорный	14,3±2,9
Склоновый	21,2±4,4
Тальвежный	13,3±1,8

Статистическая обработка результатов проводилась в программе Microsoft Excel по критерию Краскелла-Уоллиса; значение $H=8,39$ больше стандартного критического значения хи-квадрата Пирсона $\chi^2=5,99$, что говорит о статистически значимых различиях в содержании катехина для разных экотипов *Q. robur*.

Обсуждение результатов. Анализ содержания катехинов в листьях исследуемых экотипов *Q. robur* выявил выраженную зависимость их накопления от условий произрастания. В условиях аридного климата Нижнего Поволжья уровень фенольных соединений, в частности катехинов, выступает в роли биохимического индикатора физиологического стресса растений. Накопление катехинов можно интерпретировать как неспецифическую защитную реакцию. Зафиксированный максимум катехина у склонового экотипа указывает на состояние окислительного стресса, вызванного сочетанием стремительного возрастания температур в мае 2026 г. и закономерно высокой динамики потери почвенной влаги на склонах. Содержание катехинов у нагорного экотипа может свидетельствовать о преобладании морфо-анатомических механизмов адаптации. Сравнительно низкие значения у тальвежного экотипа говорят об отсутствии водного дефицита в условиях оптимального увлажнения низменной части балки, где у растений нет метаболической необходимости в избыточном синтезе катехина.

Выводы. Проведенное исследование показывает, что определение количественного содержания катехинов служит экспресс-методом для определения окислительного стресса растения и позволяет судить о адаптации конкретного экотипа древесного растения к засухе. В связи с этим, количественное определение катехинов в древесных растениях является перспективным направлением в исследовании адаптации растений к засушливому климату.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-24-20170, включающего региональное софинансирование от Комитета образования и науки Волгоградской области <https://rscf.ru/project/25-24-20170>.

Выражаем отдельную благодарность Анне Федоровне Рябухе за предоставленные материалы и оборудование.

Список литературы

1. Рябуха А. Ф. Романова И. М. Лушников Е. С. Генетический и физиолого-биохимический анализ экотипов *Quercus robur* L Чапурниковской балки // Агролесомелиорация – основа адаптивно-ландшафтного земледелия: Материалы научно-практической конференции с международным участием, посвященной 125-летию со дня рождения советского ученого, специалиста по лесоведению и лесоводству, доктора сельскохозяйственных наук, профессора, члена-корреспондента ВАСХНИЛ Анатолия Васильевича Альбенского (19 октября 1899 – 4 июля 1984), Волгоград, 21–23 октября 2024 года. Волгоград: ФНЦ агроэкологии РАН, 2024. С. 76-79. EDN RLRPZH.
2. Кукушкина Т. А., Костикова В. А., Храмова Е. П. Содержание катехинов в листьях и корнях *Comarum salesovianum* и *Comarum palustre* (Rosaceae) // Химия растительного сырья. 2024. №2. С. 196–206. DOI: 10.14258/jcprm.20240212561
3. Иванова Е.В., Лукша Е.А., Калинкина Г.И. и др. Определение катехинов и лейкоантоцианов в надземной и подземной частях *Aconogonon divaricatum* // Вестник ВолГМУ. 2016. №4 (60). С. 118-120. EDN XGRGBV.

СОРТОВАЯ РЕАКЦИЯ ШПИНАТА НА БИОФОРТИФИКАЦИЮ РАСТВОРОМ ХЕЛАТА ЖЕЛЕЗА

М. В. СПИРИДОНОВА, Е. Н. ВОЛКОВА

ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург

В условиях возрастающего дефицита железа в продуктах питания, биобогащение сельскохозяйственных культур растворами железа является приоритетным и активно развивающимся направлением [1]. Шпинат (*Spinacea oleracea* L.) – распространенный зеленый листовой овощ, обладающей скороспелостью и комплексом полезных диетических свойств, нередко успешно выращивается в условиях светокультуры. Биофортификация растений раствором Fe-ДТПА (диэтилентриаминпентауксусная кислота) является малоизученным, но перспективным агрономическим приемом, направленным на улучшение качества продукции. Его эффективность уже была показана нами на других культурах – редисе и картофеле [2, 3]. Необходимость применения Fe-ДТПА обусловлена высокой сортовой реакцией шпината на данный микроэлемент и его склонностью к аккумуляции железа, что положительно влияет на качество урожая и его биомассу. В настоящее время в агрономической практике обработки соединениями железа в хелатной форме в основном применяются для ликвидации дефицита этого элемента, проявляющегося в виде хлороза листьев, и не рассматривались для целей биофортификации, что и обусловило научную новизну данного исследования. Выявление наиболее отзывчивых на фолиарные обработки хелатом железа сортов шпината являлось основной целью эксперимента.

Объектами исследования послужил шпинат 9 разных сортов, выращиваемых в условиях интенсивной светокультуры: Стоик, Виктория, Вирофле, Меркат F1, Крепыш, Жирнолистный, Викинг, Матадор, Исполинский. Сорта относятся к раннеспелой или среднеспелой группам. Растения выращивали на субстрате «Агробалт-С» (ООО «Пиндstrup») на основе верхового торфа низкой степени разложения методом малообъемной агрегатопоники. Облучение происходило с помощью ламп ДНаЗ-400 (газоразрядные зеркализированные натриевые лампы) 14 час/сут. Растения поливали 1н раствором Кнопа без добавления микроэлементов три раза в неделю, в остальные дни субстрат увлажнялся водой. Проводили три внекорневые обработки растений раствором Fe-ДТПА 0,05% каждые 5–7 дней, контроль – дистиллированная вода. Уборку растений проводили при появлении первых цветоносов.

Программа исследования включала следующие измерения: биометрический анализ (высота растений, сырая и сухая масса надземной части, число листьев), биохимические показатели, оптические спектры листовых пластинок (метод неинвазивного контроля растений).

Сорта шпината продемонстрировали значительную вариабельность значений по основным изучаемым характеристикам и отзывчивости на некорневую обработку хелатом железа.

По биометрическим показателям существенные отличия были отмечены по количеству листьев – 10,3 шт. и высоте – 15,7 см у сорта Стоик, что на 5% и 9% выше контроля. 6 из 9 изучаемых сортов увеличили биомассу от 7 до 70% к контролю. Максимальная биомасса сформировалась у сорта Виктория (на 70% выше контроля). Сорт Исполинский был убран раньше всех из-за ускоренного перехода к генеративной фазе (стеблеванию), что указывает на необходимость оптимизации для него фотопериода в условиях светокультуры.

Все сорта шпината, кроме сорта Исполинский, оказались отзывчивыми на биофортификацию хелатом железа, содержание этого элемента достоверно увеличилось на 4,8–82,2%. У сортов Вирофле и Жирнолистный уровень содержания железа достиг максимальных в опыте значений – 145,5 и 124,6 мг/кг соответственно.

Под влиянием некорневых обработок хелатом железа отмечали улучшение биохимического состава у некоторых сортов шпината: значительное снижение содержания нитратов (сорта Виктория, Вирофле и др.), увеличение содержания каротиноидов (Жирнолистный, Викинг и др.), витамина С (Стоик, Жирнолистный и др.).

Таким образом, при биофортификации хелатом железа необходимо учитывать сортовую реакцию растений шпината на этот прием. Выделились наиболее отзывчивые сорта на некорневую обработку, которые можно включать в технологии выращивания шпината для получения персонализированных продуктов питания.

Список литературы

1. Волкова Е. Н., Спиридонова М. В. Улучшение питания путем биообогащения растений // БиoТех-2025. Тезисы докладов II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 2025. С. 42.
2. Волкова Е. Н., Спиридонова М. В., Шилова О. А., Хамова Т. В., Синявина Н. Г., Панова Г. Г. Фолиарное биообогащение железом редиса с использованием органической и неорганической форм в условиях светокультуры // Journal of Agriculture and Environment. 2023. № 12. С. 7–20.
3. Спиридонова М. В., Эзерина Е. М., Волкова Е. Н. Изучение влияния некорневых обработок соединениями железа на урожайность и качество клубней картофеля сорта Чароит // Тенденции развития агрофизики: от актуальных проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего : Материалы V Международной научной конференции, Санкт-Петербург, 17–19 сентября 2025 года. СПб.: ФГБНУ АФИ е, 2025. С. 170–173.

НАКОПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ НА ТОРФЯНЫХ И ВЫРАБОТАННЫХ ПОЧВАХ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПОД КОРМОВЫМИ КУЛЬТУРАМИ

Н. А. УЛАНОВ

ФГБОУ ВО Вятский государственный агротехнологический университет, Киров

Проблеме загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами (ТМ) в настоящее время уделяется пристальное внимание и посвящено огромное количество публикаций в ключевых агрохимических изданиях. Однако подавляющее большинство исследований проводилось на дерново-подзолистых, серых лесных, черноземах и других зональных почвах [1]. Органическим же почвам, в частности торфяным и выработанным, уделялось меньше внимания. Между тем установлено, что на высокогумусированных почвах, в частности на черноземах, негативное действие ионов ТМ значительно снижается вследствие связывания их в органоминеральные комплексы, что приводит к образованию малотоксичных и нетоксичных хелатов [2]. Торфяные почвы принципиально отличаются по генезису от самых высокогумусированных черноземов, поскольку на 80–90% состоят из органического вещества.

После окончания промышленной добычи торфа, осуществляемой послойно-фрезерным способом, на поверхность выходит придонная часть торфяной залежи мощностью около полуметра, которую из-за низкой обеспеченности элементами минерального питания и почти полным отсутствием почвенной микробиоты сравнивают с почвообразующей породой. Многочисленные исследования [3], неоднократно подтвержденные и нашими опытами, показывают, что эффективное использование вновь осваиваемых выработанных торфяников под кормовые культуры возможно лишь при систематическом применении удобрительных средств. Цель исследования – изучить величину накопления ТМ в профиле старопашотных торфяных и выработанных почв, а также экологические последствия длительного применения минеральных удобрений при различном режиме их длительного использования под кормовыми культурами.

Исследования проводились на территории выработанного торфомассива «Гадовское», расположенного в центральной части Кировской области. В качестве объектов исследования были выбраны два опыта, расположенные на многолетних стационарах.

Опыт 1 – звенья кормового севооборота, расположенного на торфяной почве – год заложения опыта 1975. Для экологической оценки состояния профиля были выбраны наиболее контрастные звенья севооборота: многолетние травы бессменного пользования, пропашные культуры бессменного пользования, пар чистый бессменно, а также для сравнения, расположенные рядом, пастбищный травостой (в культуре 90 лет) и целинный участок под лиственно-хвойным лесом. Под многолетние травы укосного и пастбищного использования, а также под пропашные (картофель, морковь, свекла) культуры ежегодно в течение 50 лет вносились минеральные удобрения, рассчитанные на получение 6–8 тысяч кормовых единиц с 1 гектара. В зависимости от культуры, применялись следующие дозы: $N_{90-120}P_{80-90}K_{120-160}$ кг/га действующего вещества (д. в.). Гербициды, микроэлементы и прочие агрохимикаты не использовались.

Опыт 2 – участок с многолетней злаковой травосмесью, расположенный на выработанном торфянике, где изучалась эффективность применения различных удобрительных комбинаций – год заложения опыта 1971. Схемой опыта здесь предусмотрено 15 вариантов различных удобрительных комбинаций. Для сравнения были выбраны 5 наиболее контрастных вариантов: 1 – без удобрений; 2 – $P_{60}K_{120}$; 3 – $N_{120}P_{60}$; 4 – $N_{120}K_{120}$; 5 – $N_{120}P_{90}K_{120}$.

В соответствии со схемами опытов, уже на протяжении более чем 50 лет регулярно вносятся аммиачная селитра, хлористый калий и суперфосфат двойной. Фосфорное

удобрение – полностью весной, остальные дробно: весной и после первого укоса. Общая ситуация сравнивалась с абсолютным контролем, когда почва отбиралась с неиспользуемого участка (целина). Отбор почвенных образцов производился после 2-го укоса в сентябре 2025 года в горизонтах 0–20 и 20–40 см.

Использование остаточной торфяной и выработанной залежей торфомассива в качестве почв под различные кормовые культуры в условиях высокого агрофона, существенным образом изменили структуру и запасы ТМ в профиле. В результате исследований было установлено, что определяемые элементы можно расположить в следующий ряд по убыванию содержания их валовых форм в почвенном профиле: Fe, Mn, Zn, Ni, Cr, Co, As, Cu, Pb, Mo, Cd, Hg. Из всех представленных элементов доминирующее положение в профиле на всех вариантах с большим отрывом занимает общее железо (от 9000 мг/кг на целинном участке до 25000 мг/кг и более на пастбище), следующим по количеству идет марганец (от 88 мг/кг на целинном участке до 910 мг/кг на пастбище), постоянный геохимический спутник железа, а замыкает тройку лидеров цинк (от 4,5 мг/кг на целинном участке до 80 мг/кг на пастбище).

Исходная (целинная) почва выработанного торфяника характеризуется низким содержанием большинства определяемых соединений ТМ. Повышенное содержание железа и марганца в меньшей степени связано с системой кормопроизводства и в большей степени обусловлено геохимическими особенностями генезиса торфяной залежи.

Отмечено также, что максимальное количество ТМ аккумулируется в верхнем слое, что еще раз подтверждает их низкую миграционную активность вниз по профилю.

Более чем 50-летний период интенсивного применения минеральных удобрений на опыте 1 привел к увеличению содержания валовых форм Fe, Mn, Zn, Cu, Pb, Cd в звеньях кормового севооборота, по сравнению с целинным участком. Их максимальные концентрации по большинству элементов отмечены в звене многолетних трав бессменного пользования, а также на пастбище. На опыте 2 отмечено увеличение содержания валовых форм Fe, Zn, Cr, Cu, Pb, Co, As. Несмотря на это, ни по одному из элементов не зафиксировано опасного превышения ПДК.

По соотношению валовых и подвижных форм основных ТМ ситуация выглядит следующим образом. Основной доминирующий элемент железо на 99% представлен валовой формой, тогда как марганец и цинк отличаются гораздо большей подвижностью. На опыте 1 доля подвижного цинка, в зависимости от варианта, варьирует от 6 до 14% (в среднем по горизонтам: 0–20 см – 7,6%; 20–40 см – 9,8%), подвижного марганца – от 2 до 16% (в среднем по горизонтам: 0–20 см – 6,2%; 20–40 см – 7,6%). На опыте 2 доля подвижного цинка, в зависимости от варианта, варьирует от 3 до 15% (в среднем по горизонтам: 0–20 см – 9,5%; 20–40 см – 6,0%), подвижного марганца – от 2 до 47% (в среднем по горизонтам: 0–20 см – 30,8%; 20–40 см – 25,5%). Существенной разницы между горизонтами профиля не отмечено. Содержание подвижных форм остальных элементов составляет менее 0,1–1,0 мг/кг почвы.

Список литературы

1. Конарбаева Г. А., Якименко В. Н. Эколого-агрохимическая оценка содержания тяжелых металлов в почве и растениях агроценоза // Проблемы агрохимии и экологии. № 1. 2017. С. 16–21.
2. Михайлов А. В., Пиирайнен В. Ю., Боброва Е. М., Смирнов А. И. Анализ перспектив использования торфяных почвоулучшителей для рекультивации нарушенных земель // Горная промышленность. № 2. 2025. С. 124–130.
3. Анисимова Т. Ю. Эффективность приемов биоконверсии питательных веществ удобрений в зеленые корма на торфянике // Агрохимия. № 2. 2023. С. 10–14.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ И ОВСА В МЕЛИОРИРОВАННЫХ АГРОЛАНДШАФТАХ ВЕРХНЕВОЛЖЬЯ

Н. А. ХАРХАРДИНОВ

Всероссийский научно-исследовательский институт мелиорированных земель – филиал Почвенного института им. В.В. Докучаева, Тверская обл., п. Эммаусс

Продовольственная безопасность России в значительной степени зависит от эффективного использования агроресурсов в зоне Нечерноземья, где более 60% сельскохозяйственных угодий представлены дерново-подзолистыми почвами с низким природным плодородием, повышенной кислотностью и склонностью к переувлажнению. В этих условиях важную роль играют мелиоративные мероприятия, в том числе осушение агроландшафтов, а также правильный подбор адаптированных сортов. Продуктивность зерновых культур в холмистом рельефе тесно связана с микроклиматическими особенностями склонов разной экспозиции, определяющими температурный режим и условия увлажнения. В связи с этим целью исследования стала оценка влияния мелиорированных агроландшафтов Тверской области на урожайность зерна и соломы яровой пшеницы сорта «Злата» и овса сорта «Яков» [1].

Исследования проводили в 2022–2024 гг. на опытном стационаре «Губино» (ВНИИМЗ) на дерново-подзолистых легкосуглинистых глееватых почвах, сформировавшихся на морене или двучленных отложениях, осушенных закрытым гончарным дренажем [2]. В пределах вершины холма, южного и северного склонов были выделены 7 агромикрорландшафтов (вариантов опыта): транзитно-аккумулятивный южного склона (Т-Аю), транзитный южного (Тю), элювиально-транзитный южного (Э-Тю), элювиально-аккумулятивный вершины (Э-А), элювиально-транзитный северного (Э-Тс), транзитный северного (Тс) и транзитно-аккумулятивный северного (Т-Ас). Учёт урожая проводили сноповым методом на учётных площадках 20 м² в четырёхкратной повторности. Обработку данных выполняли двухфакторным дисперсионным анализом (фактор А – агроландшафт, фактор В – год).

Агрометеорологические условия вегетационных периодов различались. Гидротермический коэффициент (ГТК) варьировал от 1,32 до 1,42, что соответствует умеренному увлажнению. При этом 2024 год характеризовался экстремально высокой суммой активных температур ($\Sigma t \geq 10^\circ\text{C} = 2015^\circ\text{C}$) при увеличении осадков до 271 мм, что ускорило развитие культур и привело к сокращению периода налива зерна.

Установлено, что средняя урожайность зерна обеих культур в 2024 г. статистически значимо снизилась на 28% по сравнению с 2022 г.: с 4,09 до 2,95 т/га для пшеницы и с 6,82 до 4,92 т/га для овса (табл.). Овёс показал достоверно более высокую среднюю урожайность за три года (5,92 т/га) по сравнению с пшеницей (4,15 т/га). Максимальная урожайность пшеницы (6,61 т/га) отмечена в 2023 г. в нижней части южного склона (Т-Аю), а овса (7,77 т/га) – в 2022 г. на средней части северного склона (Тс). В аномально жарком 2024 г. преимущество по урожайности овса сместилось к южному склону.

Таблица. Урожайность зерна яровой пшеницы и овса в 2022–2024 гг., т/га

Варианты опыта	2022		2023		2024		Среднее по фактору А	
	яровая пшеница	овёс	яровая пшеница	овёс	яровая пшеница	овёс	яровая пшеница	овёс
Т-Аю	3,95	5,77	6,61	4,92	2,67	5,53	4,41	5,41
Тю	3,54	5,73	5,53	5,31	2,71	4,37	3,93	5,14
Э-Тю	4,87	7,24	5,85	6,45	2,55	5,43	4,43	6,37
Э-А	4,43	6,95	5,92	6,41	2,51	4,77	4,28	6,04
Э-Тс	3,98	7,12	4,08	6,18	2,50	4,95	3,52	6,08
Тс	3,76	7,77	5,03	7,40	3,43	4,75	4,07	6,64
Т-Ас	4,11	7,16	4,86	5,56	4,30	4,67	4,43	5,80
Среднее по фактору В	4,09	6,82	5,41	6,03	2,95	4,92	4,15	5,92

Примечание: НСР_{0,05} для яровой пшеницы: частных различий – 0,70; фактора А – 0,41; фактора В – 0,27. Для овса: частных различий – 1,12; фактора А – 0,65; фактора В – 0,4

Анализ урожайности соломы показал, что овёс в условиях оптимального увлажнения (ГТК=1,42 в 2023 г.) формировал максимальную вегетативную массу (7,20 т/га на варианте Тс), тогда как у пшеницы в условиях теплового стресса (2024 г.) отмечена активация компенсаторных механизмов: урожайность соломы на варианте Т-Ас достигла 5,73 т/га, что является абсолютным максимумом за три года. Соотношение зерна к соломе у пшеницы в 2024 г. снизилось до 0,82 против 1,53 в 2023 г., что свидетельствует о перераспределении ассимилятов в пользу вегетативных органов. У овса минимальное соотношение (1,17) зафиксировано в 2023 г., что указывает на его склонность к наращиванию биомассы при достаточном увлажнении.

Проведённые исследования выявили дифференцированную реакцию различных зерновых культур на климатические и ландшафтные условия. Для повышения стабильности производства необходим постоянный мониторинг их продуктивности в разных агроландшафтных условиях [3]. При этом для устойчивого получения зерна в Нечерноземье рекомендуется размещать посевы пшеницы «Злата» в нижних частях склонов (Т-Аю, Т-Ас), а овса «Яков» – в нормальные годы на средней части северного склона (Тс), а при прогнозе аномальной жары – на нижних частях южного склона (Т-Аю). Использование соотношения зерна к соломе рекомендовано в качестве диагностического показателя стрессоустойчивости при планировании агротехнических мероприятий. Полученные данные имеют практическое значение для адаптации земледелия в зоне Нечерноземья в условиях усиливающихся климатических изменений.

Список литературы

1. Рублюк М. В., Иванов Д. А. Влияние погодных и ландшафтных условий на урожайность яровой пшеницы сорта Злата // Зерновое хозяйство России. 2023. Т. 15, № 5. С. 70–77.
2. Митрофанов Ю. И., Первушина Н. К. Динамика гумуса в полевых севооборотах на осушаемых землях // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024. Т. 25, № 1. С. 62–74.
3. Карасева О. В., Иванов Д. А., Рублюк М. В., Анциферова О. Н. Мониторинг продуктивности культур зернотравяного севооборота на осушаемых землях // Международный научно-исследовательский журнал. 2018. № 7(73). С. 64–68.

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАННЫХ ЙОДОМ ОРГАНО-МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА СОДЕРЖАНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТА В ОДНОЛЕТНИХ ТРАВАХ

К. Ф. ШАВРИНА, В. И. ДУБОВИЦКАЯ

ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург

Йод является одним из химических элементов, относящихся к группе незаменимых для животных и человека. Проблема йододефицита является крайне актуальной для территории Санкт-Петербургской агломерации вследствие низкого содержания йода в почвах и природных водах [1]. Дефицит йода негативно сказывается на качестве растениеводческой и животноводческой продукции и, как следствие, на репродуктивной и регуляторной функциях сельскохозяйственных животных и человеческого организма [2]. Проблема йодного питания растений в условиях геохимической аномалии его дефицита является недостаточно изученной. Наше исследование направлено на оценку применения растворов йодида и йодата калия в высоких концентрациях на почвах с дефицитом микроэлемента на разных мелиорантах и минеральном удобрении для повышения содержания йода в сельскохозяйственной продукции и разработке новых формул удобрений, легированных йодом.

С целью изучения влияния внесения йодных растворов в почву при использовании различных мелиорантов на развитие и качественный состав однолетних и многолетних трав в мае 2024 года на супесчаной агродерново-подзолистой почве в Меньковском филиале Агрофизического института был заложен микрополевой опыт. Опыт является двухфакторным:

Фактор А включает в себя 4 варианта с тремя мелиорантами: птичий помёт (ПП), биоуголь (БУ), низинный торф (НТ) и минеральным удобрением (МУ). Фактор Б – соединения йода (йодид и йодат калия) в 3-х концентрациях: 5, 10 и 15 кг/га.

Общая площадь делянки – 1,7 м², учетная площадь делянки – 1 м². Ширина защитных полос 0,5 м. Размещение делянок систематическое, 5-кратная повторность. Обработка мелиорантов и минерального удобрения растворами йодида и йодата калия проводилась с использованием помпового опрыскивателя, норма расхода рабочего раствора – 300 л/га или 30 мл/м².

Опытная культура – овес посевной (*Avena sativa* L.) сорта Яков и вика посевная (*Vicia sativa* L.) сорта Льговская-22. Подсев многолетних трав — клевер луговой (*Trifolium pratense* L.) сорта Седум и тимopheевка луговая (*Phleum pratense* L.) сорта Ленинградская 204.

Уборку урожая вико-овсяной смеси проводили в фазу цветения, уборку клевера перед началом фазы бутонизации.

Применение легирующих добавок в составе основной композиции ОМУ оказало существенное влияние на химический состав и питательную ценность кормового сырья. В зависимости от уровня дозировки характер такого воздействия заметно изменялись. Наиболее выраженные положительные эффекты были связаны, главным образом с сокращением уровня накопления в зеленой массе нитратов и увеличением ее обеспеченности йодом.

Обеспеченность зеленой массы кормового сырья однолетних трав йодом была значительно повышена. На диаграмме (рис.) отражено накопление йода в растительных образцах вико-овсяной смеси.

Содержание микроэлемента при внесении растворов йода увеличилось в среднем с 200 до 1630 мкг/кг, то есть в 8 раз по фону биоугля; со 160 мкг/кг в вариантах на птичьем помете и низинном торфе до 2620 и 2050 мкг/кг соответственно, т.е. по фону низинного торфа – в 12 раз, по фону птичьего помета – в 16 раз.

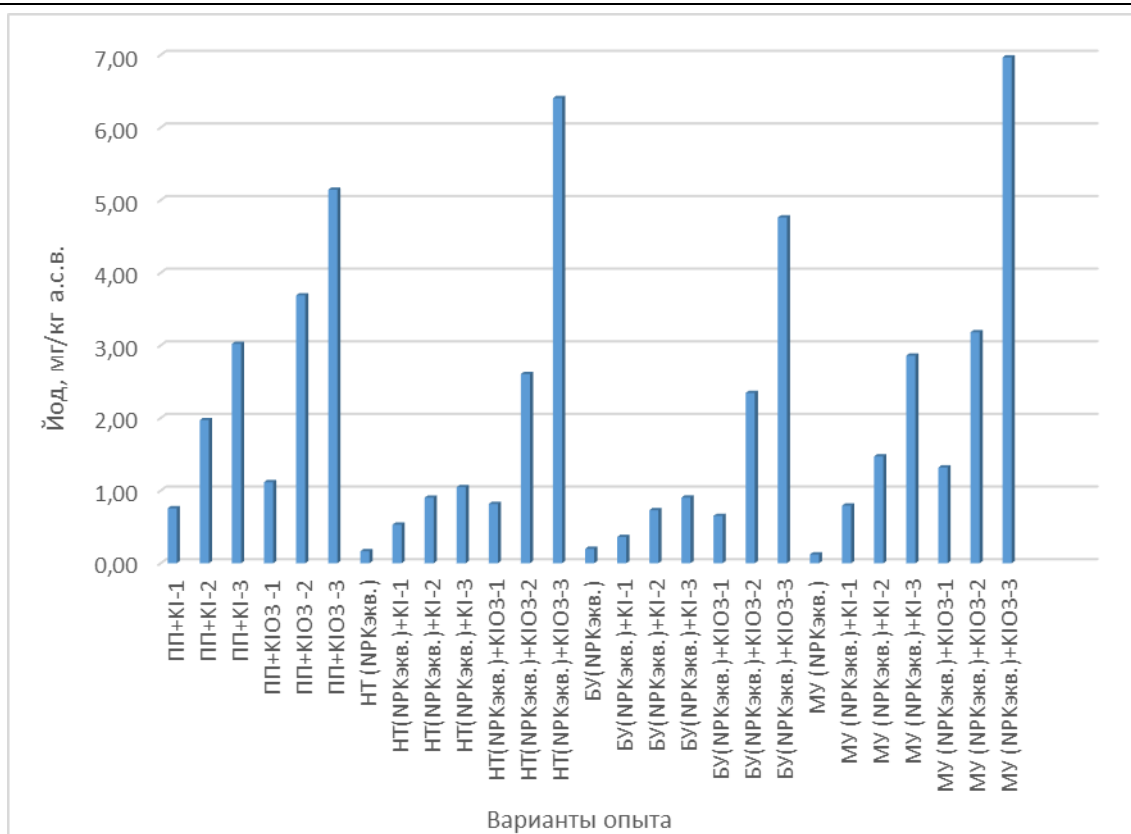


Рисунок. Содержание йода в зеленой массе вико-овсяной смеси, 2024 г.

Максимальное повышение содержание микроэлемента наблюдалось по фону минерального удобрения – со 120 до 2760 мкг/кг, то есть в 23 раза. Необходимо отметить, что растворы йодата калия оказались эффективнее растворов йодида калия от 1,7 до 6 раз в зависимости от варианта опыта. Абсолютный максимум содержания йода в зеленой массе вико-овсяной смеси составил 6970 мкг/кг и был зафиксирован в варианте на фоне минерального удобрения с максимальной дозировкой йодата калия (15 кг/га).

Таким образом, обогащение йодными растворами органо-минеральных удобрений позволило значительно улучшить качество зеленой массы однолетних трав за счет существенного повышения содержание йода в растительной продукции. Содержание микроэлемента увеличилось на всех фонах от 8 до 23 раз в зависимости от особенностей органо-минерального удобрения и концентрации растворов йодида и йодата калия.

Работа выполнена при поддержке гранта № 24-16-20021 из средств гранта РНФ и Санкт-Петербургского научного фонда.

Список литературы

1. Гинс М. С. Значение овощных культур в коррекции биохимического состава рациона человека / М. С. Гинс, В. К. Гинс, В. Ф. Пивоваров, П. Ф. Кононков, Н. М. Дерканосова // Вестник Российской сельскохозяйственной науки. 2017.С. 3–5.
2. Хинताल Т. В. Дефицит йода и йоддефицитные заболевания: актуальность проблемы профилактики и лечение в Российской Федерации // Terra medica nova. 2010. № 1. С. 25–28.

СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕКЦИИ

ОСНОВНЫЕ АБИОТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОДУКТИВНОСТЬЮ У РАСТЕНИЙ

ЧЕШОКОВ Ю. В. 3

РЕГУЛИРУЕМАЯ АГРОЭКОСИСТЕМА КАК НЕОТЪЕМЛЕМАЯ ЧАСТЬ НАУЧНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО БЕЗОПАСНОГО КОНТРОЛИРУЕМОГО И УСТОЙЧИВОГО СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

ПАНОВА Г. Г., УДАЛОВА О. Р., КАНАШ Е. В., СИНЯВИНА Н. Г., АРХИПОВ М. В., КУЛЕШОВА Т. Э., МИРСКАЯ Г. В., ГАЛУШКО А. С., ВОЛКОВА Е. Н., ХОМЯКОВ Ю. В., ПРИЯТКИН Н. С., ЖУРАВЛЕВА А. С., АРТЕМЬЕВА А. М., ЧЕШОКОВ Ю. В. 8

СПЕКТР ЛАБОРАТОРНЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ АНТИОКСИДАНТНОГО СТАТУСА РАСТЕНИЙ

ХОМЯКОВ Ю. В. 13

HSI-АГРОМОНИТОРИНГ: АГРОФИЗИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНИВАНИЮ СОСТОЯНИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕНСОРА RESONON PICA L В СОЧЕТАНИИ С МЕТОДАМИ ФИЛЬТРАЦИИ

НОВИКОВ А. И., ЧЕШОКОВ Ю. В. 17

ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ В АГРОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

МОИСЕЕВ К. Г. 22

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

ВЛИЯНИЕ УФ-В ОБЛУЧЕНИЯ В ПРЕДУБОРОЧНЫЙ ПЕРИОД НА ЛЕЖКОСТЬ ЛИСТОВОГО САЛАТА СОРТОВ «ИМПУЛЬС» И «КРИСПЕНЗА» В СВЕТОКУЛЬТУРЕ

АНОХИНА Ю. В., БУЙКО О. В. 28

ПРИМЕНЕНИЕ ИННОВАЦИОННОГО БИОУДОБРЕНИЯ НА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДЬЯХ КРАСНИИСК

АНТОНОВ Г. И., ГРОДНИЦКАЯ И. Д., СЕНАШОВА В. А., СОРОКИНА О. А., НЕШУМАЕВА Н. А. 30

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ВОДНОГО ОБМЕНА ПОЙМЕННОГО АГРОЛАНДШАФТА

БУБЕР А. А. 31

ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ РАСТИТЕЛЬНО-МИКРОБНОГО ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА НА ОСНОВЕ ВОДНОГО ГИАЦИНТА ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДЫ ОТ НИТРАТОВ

ВОЙНОВ А. А., ПОЛИТАЕВА Н. А., КУЛЕШОВА Т. Э. 34

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЧВЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЁМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ ВЛАЖНОСТИ

ГАВЛОВСКАЯ Е. Р., СОРОКИН Д. И., ДУНАЕВА Е. А. 36

ВЛИЯНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА СВЕТА НА ПРОДУКТИВНОСТЬ И МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ОБРАЗЦОВ *BRASSICA RAPA L.* В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОЙ СВЕТОКУЛЬТУРЫ

ГОРШКОВ О. А., СИНЯВИНА Н. Г., ЕГОРОВА К. В., АРТЕМЬЕВА А. М. 38

<u>ГИБРИДНАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЭВАПОТРАНСПИРАЦИИ НА ОСНОВЕ ЭНЕРГОБАЛАНСОВЫХ МОДЕЛЕЙ, СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ</u>	
ДОБРОХОТОВ А. В., МУХИНА Д. П., КОЗЫРЕВА Л. В.	40
<u>ОЦЕНКА СТРУКТУРНО-АГРЕГАТНОГО СОСТАВА ЧЕРНОЗЁМА ТИПИЧНОГО ПРИ ОСВОЕНИИ ТЕХНОЛОГИИ NO-TILL</u>	
ДОРОШЕНКО Е. В.	41
<u>ВЛИЯНИЕ ПРЕДУБОРОЧНЫХ СВЕТОВЫХ РЕЖИМОВ НА МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ И БИОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЛИСТОВОГО САЛАТА СОРТА «ДЖИПСИ» В УСЛОВИЯХ СВЕТОКУЛЬТУРЫ</u>	
ДРАНИЧНИКОВА Е. А., ТИМОФЕЕНКО И. А.	43
<u>ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНО-АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ ПОЧВЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ОБРАБОТКИ В ПОСЕВАХ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ</u>	
ДУРАКОВ П. П.	45
<u>СОДЕРЖАНИЕ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИХ ПИГМЕНТОВ В ЛИСТЬЯХ ДЕТЕРМИНАНТНОГО ТОМАТА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА СВЕТОВОЙ СРЕДЫ В РЕГУЛИРУЕМЫХ УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОЙ СВЕТОКУЛЬТУРЫ</u>	
ЕГОРОВА К. В., КАРМАНОВА О. И., КУЛЕШОВА Т. Э., ТОКАРЧУК Н. В., ХОМЯКОВ Ю. В., МИРСКАЯ Г. В., УДАЛОВА О. Р., ПАНОВА Г. Г.	48
<u>ФИТОТЕСТИРОВАНИЕ СУСПЕНЗИЙ МАЛОСЛОЙНОГО ГРАФЕНА КАК ПЕРСПЕКТИВНОГО АДАПТОГЕНА</u>	
ЖУРАВЛЕВА А. С., ВОЗНЯКОВСКИЙ А. А., МУХИНА Д. П., КУЛЕШОВА Т. Э., ВОЗНЯКОВСКИЙ А. П., ПАНОВА Г. Г.	50
<u>РЕГЛАМЕНТ РАЗРАБОТКИ ПРОТОКОЛА И ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ СЕМЯН СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР И ПОСЕВОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ</u>	
КАЙГОРОВОДА И. М., КОЗАРЬ Е. Г., ГРЯЗНОВ В. Г.	52
<u>О РЕАКЦИИ ДЕТЕРМИНАНТНОГО ТОМАТА НА ИМИТИРУЮЩИЙ СОЛНЕЧНЫЙ СВЕТ СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ СВЕТОВОЙ СРЕДЫ В УСЛОВИЯХ РЕГУЛИРУЕМОЙ АГРОЭКОСИСТЕМЫ</u>	
КАРМАНОВА О. И., ЕГОРОВА К. В., МИРСКАЯ Г. В., УДАЛОВА О. Р., ПАНОВА Г. Г., КУЛЕШОВА Т. Э.	55
<u>БАЗА ДАННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ И ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЧВ КРЫМА</u>	
КОЛОДЯЖНЫЙ М. В., БОЙКО Н. Г., ДУНАЕВА Е. А.	57
<u>ВЫРАЩИВАНИЕ РАСТЕНИЙ НА ИМИТАТОРАХ ЛУННОГО РЕГОЛИТА: ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ</u>	
КОЛПАКОВ И. А., СЕРБИН Д. В.	59
<u>ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИДРОГЕЛЯ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ ЗЕЛЁНОГО И ФИОЛЕТОВОГО БАЗИЛИКА В УСЛОВИЯХ ГИДРОПОНИКИ</u>	
КУЗНЕЦОВ В. Э., КОСЕНКО Р. В., ТИМЕЦ С. А., ГИЛЁВ А. М.	60
<u>МОЩНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БИОЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ В НИХ МИЗУНЫ ПОД РАЗЛИЧНЫМ СПЕКТРОМ ОСВЕЩЕНИЯ</u>	
КУЛЕШОВА Т. Э., ЕГОРОВА К. В., КАРМАНОВА О. И.	62
<u>ОЦЕНКА КАЧЕСТВА И УРОЖАЙНОСТИ КОНСКОГО БОБА (<i>Vicia faba</i> L.) В УСЛОВИЯХ ТАДЖИКИСТАНА</u>	
ЛАШКАРБЕКОВА О. М.	64

<u>ИЗУЧЕНИЕ ВСХОЖЕСТИ СЕМЯН <i>PHYSALIS PUBESCENS</i> L. В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ГОДА РЕПРОДУКЦИИ И СЕЗОНА ПРОРАЩИВАНИЯ</u>	
МАРЧЕВА М. М., ДАЦЮК К. И., ЕНГАЛЫЧЕВ М. Р.	65
<u>АУДИТ И МОНИТОРИНГ МЕЛИОРИРОВАННЫХ ПОЙМЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ ДЛЯ УСТОЙЧИВОГО СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА</u>	
МЕНЬШИКОВА С. А.	67
<u>МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГООБМЕНА В ПОЧВАХ ПРИИЛЬМЕНСКОЙ НИЗМЕННОСТИ</u>	
НЕРОБЕЛОВ П. М., ГОРНЫЙ В. И., БАЛУН О. В.	69
<u>ВЛИЯНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРЕПАРАТОВ НА УРОЖАЙНОСТЬ СОРТОВ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ НА ПРИМЕРЕ КАШТАНОВЫХ ПОЧВ ВОЛГО-ДОНСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ</u>	
ПОДКОВЫРОВ Е. И., КИРИЧКОВА И. В.	71
<u>ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ПОКАЗАТЕЛИ ПОЧВ ОСТРОВА РУССКИЙ</u>	
ПОНОМАРЕВА Т. И.	73
<u>ОПТИМИЗАЦИЯ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ АГРОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ</u>	
РОЖКО А. В.	75
<u>ВПИТЫВАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ПОЧВ В ЛЕСОПОЛОСАХ СКЛОНОВ ПОЛЯРНЫХ ЭКСПОЗИЦИЙ</u>	
РУБАНИК Ю. О.	77
<u>ОПЫТ ФОРМИРОВАНИЯ БАЗЫ ДАННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ, ОТРАЖАЮЩИХ ЭКОЛОГИЧЕСКУЮ БЕЗОПАСНОСТЬ ВЕДЕНИЯ ОРОШЕНИЯ ОГРАНИЧЕННО ПРИГОДНЫМИ ВОДАМИ</u>	
РУБЦОВ Н. Н., ГАВЛОВСКАЯ Е. Р., ДУНАЕВА Е. А.	79
<u>СОДЕРЖАНИЕ КАТЕХИНОВ В ЛИСТЬЯХ РАЗНЫХ ЭКОТИПОВ ДУБА ЧЕРЕШЧАТОГО (<i>QUERCUS ROBUR</i>) КАК ПОКАЗАТЕЛЬ СТРЕССА</u>	
СПИРИДОНОВ Н. Е., ГЕТМАНЕНКО А. Ю.	81
<u>СОРТОВАЯ РЕАКЦИЯ ШПИНАТА НА БИОФОРТИФИКАЦИЮ РАСТВОРОМ ХЕЛАТА ЖЕЛЕЗА</u>	
СПИРИДОНОВА М. В., ВОЛКОВА Е. Н.	83
<u>НАКОПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ НА ТОРФЯНЫХ И ВЫРАБОТАННЫХ ПОЧВАХ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПОД КОРМОВЫМИ КУЛЬТУРАМИ</u>	
УЛАНОВ Н. А.	85
<u>СРАВНИТЕЛЬНАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ И ОВСА В МЕЛИОРИРОВАННЫХ АГРОЛАНДШАФТАХ ВЕРХНЕВОЛЖЬЯ</u>	
ХАРХАРДИНОВ Н. А.	87
<u>ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАННЫХ ЙОДОМ ОРГАНО-МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА СОДЕРЖАНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТА В ОДНОЛЕТНИХ ТРАВАХ</u>	
ШАВРИНА К. Ф., ДУБОВИЦКАЯ В. И.	89

ISBN 978-5-905200-58-8



9 785905 200588

Сборник трудов II Школы молодых агрофизиков
«Энергия развития агрофизики» (ЭРА)
ФГБНУ АФИ, Санкт-Петербург
17–18 сентября 2026 г.

Технический редактор: А. Ю. Цивилёв

Подписано в печать 15.09.2026
Подготовлено к печати в ФГБНУ АФИ
195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14.