

# ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 632.08

DOI: 10.26897/2687-1149-2022-6-70-75

## ДИАГНОСТИКА НА ФАБРИКАХ РАСТЕНИЙ: ОБЗОР НЕИНВАЗИВНЫХ МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ РАСТЕНИЙ ДЛЯ ЗАКРЫТЫХ РЕГУЛИРУЕМЫХ АГРОЭКОСИСТЕМ

**БУРЫНИН ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ**✉, аспирант

burynin@gmail.com✉; <https://orcid.org/0000-0003-3624-1474>

**СМИРНОВ АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник

as984788@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-9236-2281>

**ПРОШКИН ЮРИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник

yproshkin@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-3566-2226>

**КАЧАН СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ**, младший научный сотрудник

89263745692@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2726-2433>

**ДОЛГАЛЕВ АЛЕКСЕЙ ПАВЛОВИЧ**, главный специалист

alexexie2006@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-6364-4346>

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5

**Аннотация.** В условиях выращивания культур на фабриках растений своевременная информация о физиологическом состоянии растений позволяет поддерживать урожайность культуры на высоком уровне. В растениеводстве наибольшее распространение получили неинвазивные методы диагностики, позволяющие выявлять стрессовые состояния растения на ранней стадии. В теоретическом исследовании применительно к фабрикам растений проведено сравнение электрофизических методов мониторинга (измерения биопотенциала и биоимпеданса), термографических методов (метода регистрации ксилемного потока и инфракрасной термографии), оптических методов (измерения отражательных характеристик листьев, гипер- и мультиспектральной визуализации) и метода измерения флуоресценции хлорофилла. Исследуемые методы классифицировались и анализировались по нескольким критериям: измеряемые показатели, оценка параметров растений, портативность измерительного прибора, возможность сканирования на уровне полога. Сделан вывод о том, что неинвазивные методы диагностики физиологического состояния растений способны на ранней стадии сигнализировать о негативных изменениях, позволяют косвенно оценить стрессовое состояние растений, транспирацию, фотосинтез, пигментный и элементный состав, электрическое сопротивление тканей. Среди технологий неинвазивной диагностики физиологического состояния растений для закрытых регулируемых агроэкосистем эффективными являются метод спектрального анализа листьев растений – в частности, спектральная визуализация, и флуоресцентный метод. В дальнейших исследованиях для оценки фотосинтеза и составления «световых рецептов» планируется сравнить флуоресцентный метод и метод спектральной визуализации в практических условиях.

**Ключевые слова:** мониторинг растений, фотосинтез, биопотенциал, биоимпеданс, ксилемный поток, термография, флуоресценция, спектральная визуализация, флуоресцентный метод

**Формат цитирования:** Бурынин Д.А., Смирнов А.А., Прошкин Ю.А., Качан С.А., Долгалев А.П. Диагностика на фабриках растений: обзор неинвазивных методов мониторинга состояния растений для закрытых регулируемых агроэкосистем // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 6. С. 70-75. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-70-75>.

© Бурынин Д.А., Смирнов А.А., Прошкин Ю.А., Качан С.А., Долгалев А.П.



ORIGINAL PAPER

## SCREENING IN PLANT FACTORIES: A REVIEW OF NON-INVASIVE PLANT MONITORING TECHNIQUES FOR CLOSED REGULATED AGROECOSYSTEMS

**DMITRIYA A. BURYNIN**✉, postgraduate student

burynin@gmail.com✉; <https://orcid.org/0000-0003-3624-1474>

**ALEKSANDR A. SMIRNOV**, PhD (Eng), Senior Research Engineer

as984788@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-9236-2281>

**YURIYA A. PROSHKIN**, PhD (Eng), Senior Research Engineer

yproshkin@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-3566-2226>

**SERGEY A. KACHAN**, Junior Research Engineer

89263745692@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2726-2433>

**ALEKSEI P. DOLGALEV**, Chief Expert

alexei2006@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-6364-4346>

Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 5, 1<sup>st</sup> Institutskiy Proezd Srt., Moscow, 109428, Russian Federation

**Abstract.** Under the conditions of growing crops in plant factories, timely information about the physiological state of plants makes it possible to maintain crop yields at a high level. In crop production, non-invasive methods of plant diagnostics are most widely used, which helps identify plant stress conditions at an early stage. In the theoretical study applied to plant factories, the authors compared electrophysical monitoring methods (the measurement of biopotential and bioimpedance), thermography methods (the method of registration of xylem sap flow and infrared thermography), optical methods (the measurement of reflective characteristics of leaves, hyper- and multispectral imaging), and the method for measuring chlorophyll fluorescence. The studied methods were classified and analyzed according to several criteria: measurable indicators, the assessment of plant parameters, the portability of the measuring instrument, the ability to scan at the canopy level. It was concluded that non-invasive methods for diagnosing the physiological state of plants are capable of signaling negative changes at an early stage, provide for indirect assessing plant stress, transpiration, photosynthesis, pigment and elemental composition, and the electrical resistance of tissues. Among the technologies for non-invasive diagnostics of the physiological state of plants for closed regulated agroecosystems, the method of spectral analysis of plant leaves, in particular, spectral visualization, and the fluorescence method are particularly effective. In further studies to evaluate photosynthesis and compose “light recipes”, the authors are planning to compare the fluorescence method and the spectral imaging method in practical conditions.

**Keywords:** plant monitoring, photosynthesis, biopotential, bioimpedance, xylem sap flow, thermography, fluorescence, spectral imaging, fluorescence method

**For citation:** Burynin D.A., Smirnov A.A., Proshkin Yu.A., Kachan S.A., Dolgalev A.P. Screening in plant factories: a review of non-invasive plant monitoring techniques for closed regulated agroecosystems. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2022; 24(6): 70-75. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-70-75>.

**Введение.** На фабриках растений контролируется ряд параметров: спектральный состав освещения, длительность светового дня, температура и влажность воздуха, водный и минеральный баланс питания растений, концентрация углекислого газа [1]. При этом на искусственное освещение выращиваемых растений расходуется более 80% всей потребляемой энергии [2].

Одним из способов повышения урожайности на фабриках растений является разработка так называемых световых рецептов выращивания растений. Поскольку в оптимальных климатических условиях производство биомассы зависит в первую очередь от интенсивности фотосинтеза, при управлении длиной светового дня, температурой, влажностью, доступностью воды и минеральных веществ основными параметрами выращивания становятся интенсивность и спектр облучения. Интенсивность фотосинтеза начинает возрастать от световой точки компенсации пропорционально росту интенсивности облучения, пока не достигнет максимума, то есть точки светового насыщения фотосинтеза [3].

В процессе повышения интенсивности фотосинтеза чем ближе к точке светового насыщения, тем более значительная часть энергии рассеивается посредством защитных механизмов растения, флуоресценции и нефотохимического тушения [4]. Следовательно, неконтрольное облучение растений может приводить к значительным потерям энергоресурсов. Помимо интенсивности освещения, необходимо учитывать спектральное распределение фотосинтетически активной радиации, а также в зависимости от активности протекания фотосинтеза поддерживать приемлемую концентрацию углекислого газа.

Другим способом повышения урожайности является контроль здоровья растений. В растениеводстве наибольшее распространение получили неинвазивные методы диагностики, позволяющие выявлять стрессовые состояния растения на ранней стадии. Своевременная информация о физиологическом состоянии растения позволяет поддерживать урожайность культуры на неизменно высоком уровне, что

является важным в условиях выращивания растений на фабриках.

**Цель исследований:** проанализировать современные неинвазивные, а также минимально инвазивные методы диагностики растений, основанные на физиологических признаках, в контексте использования на фабриках растений.

**Материалы и методы.** В исследованиях рассмотрены методы мониторинга растений, основанные на физиологических признаках, применительно к фабрикам растений, описаны особенности методов. Исследуемые методы классифицировались и анализировались по критериям: измеряемые показатели, оценка параметров растений, портативность измерительного прибора, возможность сканирования на уровне полога.

**Результаты и их обсуждение.** Традиционно физиологическое состояние растения оценивалось визуально и с помощью инвазивных методов анализа, которые являются трудозатратными и требуют наличия химической лаборатории. Для оценки физиологического состояния растений могут использоваться различные неинвазивные, а также минимально инвазивные методы.

К методам оценки физиологического состояния растений, основанным на электрофизическом воздействии, относится измерение биопотенциала, а также биоимпедансный анализ. Данные методы требуют установки электродов непосредственно в ткань растения – как правило, в лист или стебель, где между электродами проводятся измерения.

Импеданс биологической ткани в диапазоне частот 10 Гц...1 МГц зависит от сопротивления внутриклеточного содержимого, сопротивления межклеточного содержимого и импеданса клеточных мембран. При этом клеточная мембрана по своим электрическим свойствам напоминает конденсатор, емкость которого зависит от частоты [5].

Биоимпедансный анализ может использоваться для измерения комплексного электрического сопротивления биологических тканей и позволяет оценить водный статус растений [6], азотный статус растений [7], выявлять солевой стресс [8], проводить мониторинг корневой системы [9],

выявлять метаболические нарушения или структурные изменения тканей в растениях до появления видимых симптомов [10].

Биопотенциал представляет собой тип биологических сигналов, вызванных переносом ионов – таких, как мембранный транспорт. Измерение биопотенциала позволяет определить стрессовое состояние растения [11].

Методы биоимпедансного анализа и измерения биопотенциала являются полезными инструментами для исследования биологических тканей и позволяют проводить быстрые измерения в течение вегетации растения. Однако инвазивное введение электродов изменяет свойства тканей на поврежденном участке и ведет к некрозу этих тканей. Измерения отражают не только физиологические, но и стрессовые процессы [12].

Известен неинвазивный метод измерения биоэлектрического потенциала [12]. Хлорофитум хохлатый был пророщен таким образом, что его корни касались сеток из нержавеющей стали, между которыми и измерялась разница потенциалов (рис. 1). Было установлено, что динамика изменений биоэлектрического потенциала между почвой и растением отражает меру засушливости почвы и статус водного стресса.

В качестве альтернативы возможно использование различных полимерных электродов (рис. 2), однако нет достаточной информации о конкретном практическом применении [13].

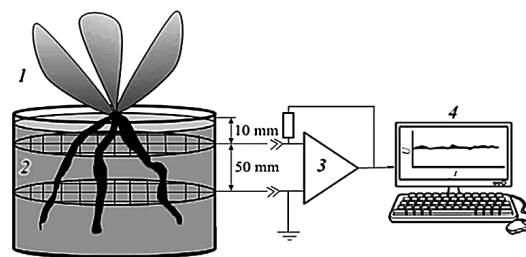
Метод измерения водного потока в ксилеме с помощью датчиков ксилемного потока (сокодвигания) позволяет оценить состояние водного обмена растений (рис. 3).

По водному обмену растения можно судить о скорости транспирации [14], а скорость потока сока ксилемы контролируется в первую очередь устьичной проводимостью [15]. Между фотосинтетической и транспирационной активностью листьев у растений существует взаимосвязь: например, коэффициент корреляции между фотосинтетической и транспирационной активностью у листьев растений сои составил 0,91 [16].

Для характеристики фотосинтетической активности листьев, а также физиологического состояния растения в целом одним из наиболее популярных методов является измерение флуоресценции с помощью импульсов света и датчика (рис. 4).

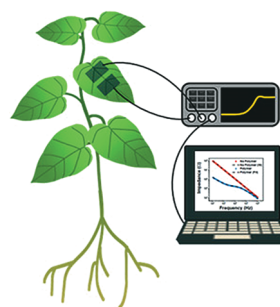
Установлена криволинейная зависимость интенсивности флуоресценции хлорофилла *a* от времени. После светового воздействия на адаптированные к темноте листья происходит резкое увеличение интенсивности флуоресценции, а затем следует ее медленное снижение. Флуоресценция является одним из трех конкурирующих процессов по растрате световой энергии, поглощенной хлорофиллом, наряду с фотохимическим и нефотохимическим тушением. Анализ изменения флуоресценции основан на явлении насыщения и закрытия всех реакционных центров фотосистемы II посредством импульса света высокой интенсивности и подавления при этом фотохимического тушения. Насыщающий импульс света должен быть достаточно коротким, чтобы не вызвать значительного увеличения нефотохимического тушения в момент вспышки. Для расчета коэффициентов тушения определяются минимальный и максимальный выход флуоресценции после адаптации к темноте, а также оценивается максимальный выход флуоресценции в условиях световой адаптации и постоянный уровень флуоресценции на свету перед вспышкой [17].

Вычисление параметров флуоресценции позволяет выявлять биотические стрессы [18], абиотические стрессы [19], в том числе нарушение метаболизма листьев, замедление роста проростков [18], фотоингибирование, водный стресс [20]. Метод измерения флуоресценции чувствителен к незначительным изменениям в метаболизме растений, что выделяет

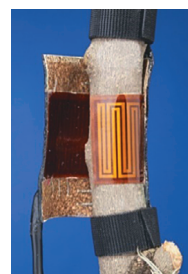


**Рис. 1. Схема измерения биоэлектрического потенциала корней растения:**  
1 – исследуемый образец; 2 – электроды в виде сеток с выводами из емкости с субстратом; 3 – микроконтроллер; 4 – персональный компьютер [12]

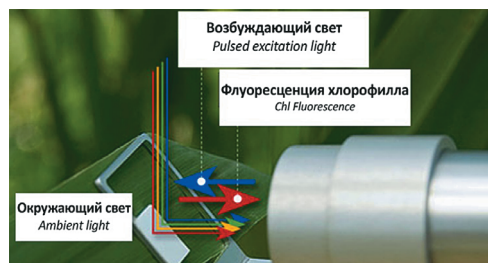
**Fig. 1. Scheme for measuring the bioelectric potential of plant roots:**  
1 – test sample; 2 – electrodes in the form of grids with leads from a container with a substrate; 3 – microcontroller; 4 – personal computer [12]



**Рис. 2. Схема измерения импеданса биологической ткани с помощью полимерных электродов [13]**  
**Fig. 2. Scheme for measuring the impedance of biological tissue using polymer electrodes [13]**



**Рис. 3. Датчик ксилемного потока Dynamax<sup>1</sup>**  
**Fig. 3. Dynamax xylem sap flow sensor<sup>1</sup>**



**Рис. 4. Схема измерения флуоресценции хлорофилла<sup>2</sup>**  
**Fig. 4. Scheme for measuring chlorophyll fluorescence<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Transpiration Sap Flow. Patent US8590373 B1. URL: <https://dynamax.com/products/transpiration-sap-flow/exo-skin-sap-flow-sensor> (дата обращения: 30.09.2022).

<sup>2</sup> Chlorophyll fluorometer MONITORING-PAM. URL: <https://ictinternational.com/products/monitoring-pam/monitoring-pam/> (дата обращения: 30.09.2022).

его среди других методов. Однако его недостатки заключаются в том, что ручные флуориметры обеспечивают только точечные измерения, а фотосинтетическая активность может изменяться от основания до кончика листа даже в благоприятных условиях. Стационарные системы визуализации флуоресценции могут охватывать некоторую площадь, однако возникает проблема равномерного освещения большой площади насыщающим импульсом высокой интенсивности, а также регистрации флуоресценции. Данные проблемы решены в системах фенотипирования, но стоимость таких систем является весьма высокой, чтобы использовать их в качестве коммерческого диагностического инструмента на фабриках растений.

Основным недостатком измерения параметров флуоресценции является необходимость затенять листья в течение как минимум 20 мин перед измерением. В связи с этим для коммерческого использования больше подходят измерения, которые можно проводить на свету. Измерение таких параметров флуоресценции, как скорость переноса электронов между фотосистемами (ETR) и квантовый выход электронного транспорта фотосистемы II (FPSII), стало возможным благодаря применению амплитудно-импульсной модуляции (PAM) – затенение при измерении данных параметров не требуется.

ETR оценивает скорость переноса электронов между фотосистемами:

$$ETR = FPSII \cdot PPF D \cdot 0,84 \cdot 0,5,$$

где PPF D – плотность фотосинтетического потока фотонов, являющаяся количеством поглощенного света (только 84% падающего света поглощается листом); 0,5 – коэффициент, учитывающий потребность в двух фотонах для переноса одного электрона через фотосистемы I и II [21].

Параметр FPSII отражает эффективность фотосистемы II, а именно долю поглощенного света, используемую в фотохимических реакциях [17]:

$$FPSII = (Fm' - Ft) / Fm',$$

где  $Fm'$  – максимальный выход флуоресценции;  $Ft$  – постоянный уровень флуоресценции.

Известно, что процессы связывания углерода напрямую влияют на рост растений. Скорость переноса электронов и фиксация углерода сильно коррелируют между собой в контролируемых условиях выращивания [22]. Поэтому на фабриках растений должны соблюдаться следующие условия: поддержание определенного уровня углекислого газа [23] и температурного режима; доступность воды и минеральных веществ; исключение как недостатка освещения, так и фотоингибирования.

Измерение ETR является точным, неинвазивным, быстрым и доступным средством оценки эффективности фотосинтеза для фабрик растений.

Отражательная способность листьев на различных длинах волн связана с их химическим составом, а именно с концентрацией пигментов и питательных элементов. В сельском хозяйстве широкое распространение получил метод диагностики растений на основе спектров отражения, пропускания, поглощения. Возможны как проведение точечных измерений листьев с помощью различных ручных приборов – таких, как различные спектрорадиометры [24] или измерители хлорофилла, например, хлорофиллометр SPAD-502 (KONICA MINOLTA, Япония), так и получение спектральной или гиперспектральной визуализации, что позволяет охватывать большие площади сельскохозяйственных угодий. Применительно к фабрикам растений данным методом можно проводить измерения на уровне как листьев, так и полога, используя спектральную

визуализацию (рис. 5). Для повышения точности измерений необходима калибровочная пластина (эталон отражения).

Изначально метод диагностики растений с помощью измерения спектральной отражательной способности листьев сводился к вычислению вегетационных индексов растительности на основе кривой отражения. Для этого достаточно измерить значения интенсивности отражения на определенных длинах волн, их отношения описываются как вегетационные индексы.

Множество работ посвящено оценке хлорофилла [26], каротиноидов [27], антоцианов [28] в листьях с помощью различных индексов растительности. Для такой оценки используется видимая часть электромагнитного спектра (380...700 нм), а также дальний красный диапазон спектра. Количество хлорофилла или соотношение пигментов позволяют определить физиологическое состояние растения: например, увеличение содержания хлорофилла  $b$  по отношению к хлорофиллу  $a$  дает сигнал о стрессе [29]. Для оценки статуса азота, водного баланса растения, сухого вещества используется, как правило, коротковолновая инфракрасная область спектра. Спектральный анализ позволяет также выявить биотический стресс.

Отдельно стоит выделить такой вегетационный индекс растительности, как индекс фотохимического отражения (PRI):

$$PRI = (R531 - R570) / (R531 + R570).$$

Индекс PRI коррелирует с циклом ксантофилла, защищающим растение от фотоповреждения, и позволяет оценить эффективность использования света фотосинтетическим аппаратом растений [30]. Таким образом, индекс PRI можно использовать для подбора интенсивности облучения. Индекс PRI может служить еще одним средством, контролирующим эффективность облучения, однако чувствительность данного индекса к интенсивности фотосинтеза требует дальнейших исследований, так как PRI чувствителен также к общему соотношению пигментов хлорофилла и каротиноидов [30].

Метод измерения отражательной способности отдельных листьев с помощью различных спектрорадиометров достаточно точен, однако требуется несколько измерений даже на один лист для получения достоверного результата в связи с большой вариацией спектральных характеристик поверхности листа. Если рассматривать спектральную визуализацию на уровне полога, возникает множество нерешенных проблем относительно точности измерений. Спектр отражения в значительной мере зависит от содержания пигментов, однако такие факторы, как геометрия растительного покрова, фоновая отражательная способность почвы, неравномерность отражения излучения ввиду наклона или формы листьев, вносят ошибки в измерение. Эффект экранирования антоцианов иногда может затруднить получение достоверного результата [31].

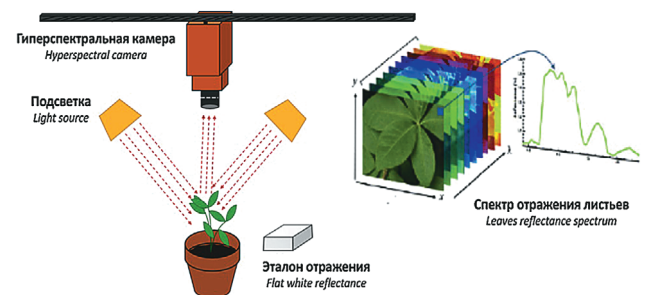


Рис. 5. Схема гиперспектральной визуализации для мониторинга растений [25]

Fig. 5. Scheme of hyperspectral visualization for plant monitoring [25]

Помимо узкополосных индексов растительности, применяются машинное обучение, модели RTM (модель переноса излучения), гибридные методы, использующие гиперспектральную визуализацию. Они более информативны, но требуют больших вычислительных мощностей и разработки сложных алгоритмов.

Методом термографии фиксируют изменения температуры растений, в том числе локальные, свидетельствующие об изменении транспирации листьев, а также определяют водный статус и выявляют потребность в поливе растений, что позволяет на ранней стадии обнаружить биотические и абиотические стрессы [32]. Однако данный метод имеет ряд недостатков: значительные колебания температуры между освещенными

и затененными листьями не всегда позволяют дать верную оценку транспирации термографическим методом [33]; тепловое излучение фитосветильников, находящихся близко к растениям при стеллажном выращивании, также может вносить существенные погрешности в измерения; при выявлении биотических стрессов методом инфракрасной термографии присуща низкая специфичность; заболевания, незначительно влияющие на транспирацию, не могут быть обнаружены термографически [34].

Ведущие методы диагностики растений, основанные на физиологических признаках, которые могут применяться для использования на фабриках растений, представлены в таблице.

Таблица

Ведущие методы диагностики растений, основанные на физиологических признаках

Table

Main methods of plant diagnostics based on physiological traits

Метод измерения <i>Method</i>	Измеряемая величина <i>Measured value</i>	Оценка параметров <i>Parameters</i>	Портативность <i>Portability</i>	Сканирование на уровне полога <i>Scanning at the canopy level</i>	Особенности <i>Peculiarities</i>
Биопотенциал, биоимпеданс <i>Biopotential, bioimpedance</i>	Электрическое сопротивление тканей растения <i>Electrical resistance of plant tissues</i>	Оценка водного статуса, выявление стрессов <i>Assessment of water status, identification of stresses</i>	Нет <i>No</i>	Нет <i>No</i>	Ввод электродов в ткань растения <i>Inserting sensors into a plant</i>
Ксилемный поток <i>Sap flow</i>	Тепло, переносимое соком растения <i>Heat carried by plant sap</i>	Оценка водного статуса, транспирация <i>Water status assessment, transpiration</i>	Нет <i>No</i>	Нет <i>No</i>	Установка датчиков на растение <i>Placing sensors on a plant</i>
Флуоресценция (при измерении флуориметром) <i>Fluorescence (by fluorometer)</i>	Свечение хлорофилла <i>Light re-emitted by chlorophyll</i>	Фотосинтез, выявление стрессов <i>Photosynthesis, stress detection</i>	Да <i>Yes</i>	Нет <i>No</i>	Ручной прибор, неинвазивное измерение <i>Handheld device, non-invasive</i>
Флуоресцентная визуализация <i>Fluorescent Imaging</i>	Свечение хлорофилла <i>Light re-emitted by chlorophyll</i>	Фотосинтез, выявление стрессов <i>Photosynthesis, stress detection</i>	Нет <i>No</i>	Да <i>Yes</i>	Неинвазивно <i>Non-invasive</i>
Спектроскопия (при измерении спектро радиометром) <i>Spectroscopy (by spectroradiometer)</i>	Спектр отражения, поглощения, пропускания <i>Spectrum of reflection, absorption and transmission</i>	Относительное содержание пигментов, азота, водный статус, выявление стрессов <i>Relative content of pigments, nitrogen, lignin, water status, stress detection</i>	Да <i>Yes</i>	Нет <i>No</i>	Ручной прибор, неинвазивное измерение <i>Handheld device, non-invasive</i>
Спектральная/Гиперспектральная визуализация <i>Spectral/Hyperspectral imaging</i>	Спектр отражения <i>Spectrum of reflection</i>	Относительное содержание пигментов, азота, водный статус, выявление стрессов <i>Relative content of pigments, nitrogen, lignin, water status, stress detection</i>	Да <i>Yes</i>	Да <i>Yes</i>	Неинвазивно <i>Non-invasive</i>
Инфракрасная термография <i>Thermography</i>	Тепло, излучаемое объектами <i>Heat emitted by objects</i>	Оценка водного статуса, транспирация, выявление стрессов <i>Water status assessment, transpiration, stress detection</i>	Да <i>Yes</i>	Да <i>Yes</i>	Неинвазивно <i>Non-invasive</i>

**Выводы**

1. Неинвазивные методы диагностики физиологического состояния растений способны на ранней стадии сигнализировать о негативных изменениях в растениях, позволяют косвенно оценивать стрессовое состояние растений, транспирацию, фотосинтез, пигментный и элементный состав, электрическое сопротивление тканей.

2. Среди современных технологий неинвазивной диагностики физиологического состояния растений для закрытых регулируемых агроэкосистем эффективными являются метод спектрального анализа листьев растений (в частности, спектральная визуализация) и флуоресцентный метод.

3. В дальнейших исследованиях для оценки фотосинтеза и составления «световых рецептов» планируется сравнить флуоресцентный метод и метод спектральной визуализации в практических условиях.

## Список использованных источников / References

- Kozai T. Resource use efficiency of closed plant production system with artificial light: Concept, estimation and application to plant factory. Proceedings of the Japan Academy, Ser. B, Physical and Biological Sciences. 2013; 89(10). <https://doi.org/10.2183/pjab.89.447>
- Graamans L., Baeza E., van den Dobbelsteen A., Tsafaras I., Stanghellini C. Plant factories versus greenhouses: Comparison of resource use efficiency. *Agricultural Systems*. 2018; 160: 31-43. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2017.11.003>
- Ahmad P., Ahanger M.A., Alyemeni M.N., Alam P. Effect of Light Intensity on Photosynthesis. *Photosynthesis, Productivity and Environmental Stress*. 2019: 65-73. <https://doi.org/10.1002/9781119501800.ch4>
- Demmig-Adams B.; Adams III W.W. Photoinhibition. *Encyclopedia of Applied Plant Sciences*. 2017; 1: 78-85. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394807-6.00093-9>
- Jócsák I., Végvári G., Vozáry E. Electrical impedance measurement on plants: a review with some insights to other fields. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*. 2019; 31: 359-375.
- Jamaludin D., Abd Aziz S., Ahmad D., Z.E. Jaafar, H. Impedance analysis of *Labisia pumila* plant water status. *Information Processing in Agriculture*. 2015; 2(3-4): 161-168. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2015.07.004>
- Muñoz-Huerta R.F., Ortiz-Melendez A. De J., Guevara-Gonzalez R.G. et al. An analysis of electrical impedance measurements applied for plant n status estimation in lettuce (*Lactuca sativa*). *Sensors*. 2014; 14(7): 11492-11503. <https://doi.org/10.3390/s140711492>
- Ben Hamed K., Zorrig W., Hamzaoui A.H. Electrical impedance spectroscopy: A tool to investigate the responses of one halophyte to different growth and stress conditions. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2016; 123: 376-383. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.03.006>
- Ozier-Lafontaine H., Bajazet T. Analysis of root growth by impedance spectroscopy (EIS). *Plant and Soil*. 2005; 277: 299-313. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-7531-3>
- Repo T., Korhonen A., Laukkanen M., Lehto T., Silvennoinen R. Detecting mycorrhizal colonisation in Scots pine roots using electrical impedance spectra. *Biosystems Engineering*. 2014; 121: 139-149. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.02.014>
- Hasegawa Y., Puglisi D., Spetz A.L. Development of agriculture support system using plant bioelectric potential responses and gas sensor. *International Journal of Food and Biosystems Engineering*. 2017; 5(1): 44-51.
- Кулешова Т.Э., Бушлякова А.В., Галль Н.Р. Неинвазивное измерение биоэлектрических потенциалов растений // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. № 5. С. 6-8. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2019.05.47387.17541>
- Kuleshova T.E., Bushlyakova A.V., Gall' N.R. Non-invasive measurement of plants' bioelectric potentials. *Pis'ma v ZHTF*. 2019; 45(5): 6-8. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2019.05.47387.17541> (In Rus.)
- Taniguchi H., Akiyama K., Fujie T. Biopotential Measurement of plant leaves with ultra-light and flexible conductive polymer nanosheets. *CSJ Journals*. 2020; 93(8): 1007-1013. <https://doi.org/10.1246/bscj.20200064>
- Одинцова В.А. Фитомониторинг при изучении водного обмена и температурного режима растений черешни // Научные труды СКФНЦБВ. 2017. Т. 13. С. 55-58. EDN: ZMWFMD
- Odintsova V.A. Phytomonitoring in the study of water exchange and temperature regime of sweet cherry. *Nauchnye trudy SKFNTsSVV*. 2017; 13: 55-58. (In Rus.)
- Thompson M.V., Zwieniecki M.A. 11 – The role of potassium in long distance transport in plants. *Physiological Ecology*. 2005: 221-240. <https://doi.org/10.1016/B978-012088457-5/50013-7>
- Амелин А.В., Чекалин Е.И., Заикин В.В., Сальникова Н.Б. Интенсивность фотосинтеза и транспирации листьев у растений *Glycine Max* (L.) MERR // Вестник аграрной науки. 2017. № 6(69). С. 3-8 <https://doi.org/10.15217/issn2587-666X.2017.6.3>
- Amelin A.V., Chekalin E.I., Zaikin V.V., Sal'nikova N.B. Intensity of photosynthesis and transpiration of leaves in plants *Glycine Max* (L.) MERR. *Vestnik agrarnoy nauki*. 2017; 6(69): 3-8. <https://doi.org/10.15217/issn2587-666X.2017.6.3> (In Rus.)
- Guidi L., Degl'Innocenti E. Imaging of chlorophyll a fluorescence: A tool to study abiotic stress in plants. *Abiotic Stress in Plants – Mechanisms and Adaptations*. 2010. <https://doi.org/10.5772/22281>
- Perez-Bueno M.L., Pineda M., Baron M. Phenotyping plant responses to biotic stress by chlorophyll fluorescence imaging. *Front. Plant Sci*. 2019; 10: 1135. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01135>
- Kalaji H.M., Jajou A., Oukarroum A. et al. Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions. *Acta Physiologiae Plantarum*. 2016; 38: 102. <https://doi.org/10.1007/s11738-016-2113-y>
- Lichtenthaler H. Multi-colour fluorescence imaging of photosynthetic activity and plant stress. *Photosynthetica*. 2021; 59 (SI): 364-380. <https://doi.org/10.32615/ps.2021.020>
- Kim C., van Iersel M.W. Morphological and physiological screening to predict lettuce biomass production in controlled environment agriculture. *Remote Sens*. 2022; 14 (2): 316. <https://doi.org/10.3390/rs14020316>
- Seaton G.R., Walker D.A. Chlorophyll fluorescence as a measure of photosynthetic carbon assimilation. *Proc. R. Soc. Lond. B*. 1990; 242: 29-35. <https://doi.org/10.1098/rspb.1990.0099>
- Zhaiyou J., Xiuren Z., Jing T. Photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics of *Isodon rubescens* (Hemsley) H. Hara. *Scientific Reports*. 2020; 10: 10043. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67192-2>
- Бурьнин Д.А., Смирнов А.А. Обзор технических средств неинвазивного мониторинга состояния растений, использующих методы гиперспектральной визуализации // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2021. № 68 (2). С. 54-61. EDN: PLYYEN
- Burynin D.A., Smirnov A.A. Review of technical means for non-invasive monitoring of the state of plants using hyperspectral imaging methods. *Elektrotehnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2021; 68(2): 54-61. (In Rus.)
- Mishra P., Lohumi S., Ahmad Khan H., Nordon A. Close-range hyperspectral imaging of whole plants for digital phenotyping: Recent applications and illumination correction approaches. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020; 178: 105780. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105780>
- Lichtenthaler H.K., Gitelson A., Lang M. Non-destructive determination of chlorophyll content of leaves of a green and an aurea mutant of tobacco by reflectance measurements. *Journal of Plant Physiology*. 1996; 148 (3-4): 483-493. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(96\)80283-5](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(96)80283-5)
- Hernández-Clemente R., Navarro-Cerrillo R.M., Zarco-Tejada P.J. Carotenoid content estimation in a heterogeneous conifer forest using narrow-band indices and PROSPECT + DART simulations. *Remote Sensing of Environment*. 2012; 127: 298-315. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.09.014>
- Gitelson A.A., Merzlyak M.N., Chivkunova O.B. Optical properties and nondestructive estimation of anthocyanin content in plant leaves. *Photochemistry and Photobiology*. 2001; 74 (1): 38-45. [https://doi.org/10.1562/0031-8655\(2001\)074<0038:opaneo>2.0.co;2](https://doi.org/10.1562/0031-8655(2001)074<0038:opaneo>2.0.co;2)
- Pattanayak G., Biswal A., Reddy V.S., Tripathy B.C. Light-dependent regulation of chlorophyll b biosynthesis in chlorophyllide a oxygenase over-expressing tobacco plants. *Biochemical and biophysical research communications*. 2005; 326(2): 466-471. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2004.11.049>
- Gamon J.A., Peñuelas J., Field C.B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment*. 1992; 41: 35-44. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(92\)90059-S](https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90059-S)
- Proshkin Y.A., Smirnov A.A., Semenova N.A., Dorokhov A.S., Burynin D.A., Ivanitskikh A.S., Panchenko V.A. Assessment of ultraviolet impact on main pigment content in purple basil (*Ocimum basilicum* L.) by the spectrometric method and hyperspectral images analysis. *Applied Sciences*. 2021; 11 (19): 8804. <https://doi.org/10.3390/app11198804>
- Pineda M., Barón M., Pérez-Bueno M.-L. Thermal imaging for plant stress detection and phenotyping. *Remote Sensing*. 2021; 13 (1): 68. <https://doi.org/10.3390/rs13010068>
- Jones H.G. Application of thermal imaging and infrared sensing in plant physiology and ecophysiology. *Advances in Botanical Research*. 2004; 41: 107-163. [https://doi.org/10.1016/s0065-2296\(04\)41003-9](https://doi.org/10.1016/s0065-2296(04)41003-9)
- Oerke E.-C., Steiner U. Potential of digital thermography for disease control. *Precision Crop Protection – the Challenge and Use of Heterogeneity*. 2010. P. 167-182. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-9277-9\\_11](https://doi.org/10.1007/978-90-481-9277-9_11)

## Критерии авторства

Бурьнин Д.А., Смирнов А.А., Прошкин Ю.А., Качан С.А., Долгалев А.П. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов подготовили рукопись. Бурьнин Д.А., Смирнов А.А., Прошкин Ю.А., Качан С.А., Долгалев А.П. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 09.06.2022

Одобрена после рецензирования 21.07.2022

Принята к публикации 30.09.2022

## Contribution

D.A. Burynin, A.A. Smirnov, Yu.A. Proshkin, S.A. Kachan and A.P. Dolgalev performed theoretical studies and, based on the results obtained wrote the manuscript. D.A. Burynin, A.A. Smirnov, Yu.A. Proshkin, S.A. Kachan and A.P. Dolgalev have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

## Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The article was received 09.06.2022

Approved after reviewing 21.07.2022

Accepted for publication 30.09.2022