

УДК 581.1

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ФЕНОТИПИРОВАНИЯ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ И СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

А. Ю. ШАШКО<sup>1)</sup>, В. Ю. БОНДАРЕНКО<sup>1)</sup>, А. А. МИХАЛЬЧЕНКО<sup>1)</sup>, Т. Г. КАЛЯГА<sup>2)</sup>,  
О. Ю. САФОНОВА<sup>2)</sup>, Д. А. ПРЖЕВАЛЬСКАЯ<sup>1)</sup>, М. А. ЧЕРНЫШ<sup>1)</sup>, Д. В. КОЛБАНОВ<sup>3)</sup>,  
В. Н. ЖАБИНСКИЙ<sup>4)</sup>, В. А. ХРИПАЧ<sup>4)</sup>, И. И. СМОЛИЧ<sup>1)</sup>, А. И. СОКОЛИК<sup>1)</sup>,  
А. Н. ВАЛЬВАЧЕВ<sup>1)</sup>, С. В. АБЛАМЕЙКО<sup>1)</sup>, В. В. КРАСНОПРОШИН<sup>1)</sup>,  
Г. Н. СМОЛИКОВА<sup>5)</sup>, В. В. ДЕМИДЧИК<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

<sup>2)</sup>Институт биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси,  
ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Беларусь

<sup>3)</sup>Республиканское учебно-опытное унитарное предприятие БГУ «Щемыслица»,  
ул. Жуковского, 15-А, 223049, агрогородок Щемыслица, Минская обл., Беларусь

<sup>4)</sup>Институт биоорганической химии НАН Беларуси,  
ул. Академика В. Ф. Купревича, 5, 220141, г. Минск, Беларусь

<sup>5)</sup>Санкт-Петербургский государственный университет,  
Университетская набережная, 7/9, 199034, г. Санкт-Петербург, Россия

Фенотипирование – современная технология, позволяющая производить автоматическую регистрацию и анализ данных о фенотипах живых систем. В последние годы значительно развито высокоэффективное фенотипирование высших растений в целях глубокого исследования физиологических и биохимических основ их функционирования, а также селекции новых высокопродуктивных и стрессоустойчивых сортов. Оно базируется на адаптации и внедрении современных информационных подходов, таких как алгоритмы компьютерного зрения, и позволяет получать детальную информацию о феномах растений на различных уровнях их организации. Одним из не изученных пока разделов в данной области является фенотипирование саженцев древесных растений. В настоящем исследовании разработана система фенотипирования зеленых стеблевых черенков древесных растений *Thuja occidentalis* L. (сорт Smaragd), *Juniperus scopulorum* Sarg. (сорт Blue Arrow), *Picea abies* L., H. Karst. с использованием алгоритмов машинного зрения и спектрального анализа. Создан модульный феномный комплекс, состоящий из бокса, систем культивирования растений, освещения и полива, а также системы регистрации и обработки RGB-изображений, включая программное обеспечение. Данный комплекс протестирован в лаборатории и в условиях открытого грунта. Его первичное тестирование показало, что изменения кривых распределения пикселей RGB-изображений по длинам волн могут служить основой оценки размеров и физиологического состояния черенков древесных растений. Установлено, что смещение спектральной кривой отраженного света в длинноволновую область под действием водного дефицита позволяет неинвазивно и статистически достоверно регистрировать гибель части клеток. В то же время статистически достоверных отличий не было выявлено при тестировании воздействия фитогормонов (ауксинов и брассиностероидов) на укоренение черенков хвойных видов. Полученные результаты имеют фундаментальную практическую значимость и могут быть использованы в исследованиях физиологических процессов у высших растений, декоративном питомниководстве и лесоводстве.

**Ключевые слова:** фенотипирование; феномика растений; компьютерное зрение; черенки древесных растений; хвойные растения; декоративное питомниководство; фитогормоны.

**Благодарность.** Работа финансировалась в рамках проекта № 13 подпрограммы 1 «Инновационные биотехнологии – 2020» ГП «Наукоемкие технологии и техника» Республики Беларусь, проекта № 63 ОНТП Республики Беларусь «Интродукция, озеленение, экобезопасность», тем базового финансирования ГПНИ Республики Беларусь «Природопользование и экология» и «Химические технологии и материалы, природно-ресурсный потенциал» (№ 20161634 и 20161274).

### Образец цитирования:

Шашко АЮ, Бондаренко ВЮ, Михальченко АА, Каляга ТГ, Сафонова ОЮ, Пржевальская Да, Черныш МА, Колбанов ДВ, Жабинский ВН, Хрипач ВА, Смолич ИИ, Соколик АИ, Вальвачев АН, Абламейко СВ, Краснопрошин ВВ, Смоликова ГН, Демидчик ВВ. Разработка системы фенотипирования древесных растений при помощи алгоритмов машинного зрения и спектрального анализа. *Журнал Белорусского государственного университета. Биология*. 2019;1:33–44.  
<https://doi.org/10.33581/2521-1722-2019-1-33-44>

### For citation:

Shashko AYu, Bandarenko UYu, Mikhalchenko AA, Kalialha TG, Safonova OYu, Przhevalskaia DA, Charnysh MA, Kolbanov DV, Zhabinskii VN, Khripach VA, Smolich II, Sokolik AI, Valvachev AN, Ablameyko SV, Krasnoproshin VV, Smolikova GN, Demidchik VV. Development of woody plants phenotyping system with the help of machine vision and spectral analysis algorithms. *Journal of the Belarusian State University. Biology*. 2019;1:33–44. Russian.  
<https://doi.org/10.33581/2521-1722-2019-1-33-44>

Сведения об авторах см. на с. 43–44.

Information about authors see p. 43–44.

## DEVELOPMENT OF WOODY PLANTS PHENOTYPING SYSTEM WITH THE HELP OF MACHINE VISION AND SPECTRAL ANALYSIS ALGORITHMS

*A. Yu. SHASHKO<sup>a</sup>, U. Yu. BANDARENKA<sup>a</sup>, A. A. MIKHALCHENKO<sup>a</sup>, T. G. KALIAHA<sup>b</sup>,  
O. Yu. SAFONOVA<sup>b</sup>, D. A. PRZHEVALSKAYA<sup>a</sup>, M. A. CHARNYSH<sup>a</sup>, D. V. KOLBANOV<sup>c</sup>,  
V. N. ZHABINSKII<sup>d</sup>, V. A. KHRIPACH<sup>d</sup>, I. I. SMOLICH<sup>a</sup>, A. I. SOKOLIK<sup>a</sup>,  
A. N. VALVACHEV<sup>a</sup>, S. V. ABLAMEYKO<sup>a</sup>, V. V. KRASNOPROSHIN<sup>a</sup>,  
G. N. SMOLIKOVA<sup>c</sup>, V. V. DEMIDCHIK<sup>a</sup>*

<sup>a</sup>*Belarusian State University, 4 Nizozemskaya Street, Minsk 220030, Belarus*

<sup>b</sup>*Institute of Biophysics and Cell Engineering, National Academy of Sciences of Belarus,  
27 Akademicheskaya Street, Minsk 220072, Belarus*

<sup>c</sup>*Teaching and Research Centre «Schemislitsa», Belarusian State University,  
15-A Žukovskaya Street, Ščomyslitsa 223049, Minsk region, Belarus*

<sup>d</sup>*Institute of Bioorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus,  
5 Academician V. F. Kupreviča Street, Minsk 220141, Belarus*

<sup>e</sup>*Saint Petersburg State University, 7/9 Universitetskaya Embankment,  
Saint Petersburg 199034, Russia*

*Corresponding author: V. V. Demidchik (dzemidchik@bsu.by)*

Phenotyping is a modern technology that allows registering and analyzing data about living systems phenotypes in automatic mode. In recent years a high-efficiency higher plants phenotyping with the aim of deep study of the physiological and biochemical bases of their functioning, as well as selection of new high-yielding and stress-resistant varieties has acquired significant development. It is based on adaptation and introduction of modern information approaches such as algorithms of «computer vision» and allows receiving detailed information about plants phenomes at various organization levels. One of the unreached research sections in this field is tree plant cuttings phenotyping, which represents a great practical interest. In this work the system of phenotyping of green stem cuttings of woody plants *Thuja occidentalis* L. (Smaragd), *Juniperus scopulorum* Sarg. (Blue Arrow), *Picea Abies* L., H. Karst. was developed using machine vision algorithms and spectral analysis. A modular phenomics complex was created. It consists of phenomics box, plant cultivation system, lighting and watering systems, as well as system of registration and processing of RGB-images, including software. This complex has been tested in the laboratory and in field conditions. The initial testing of the phenomics complex was carried out. It showed that the data of changes in the pixel distribution of RGB-images by wavelengths can be the basis for estimating the size and physiological state of stem cuttings of woody plants. It was shown that the shift of the spectral curve of the reflected light into the long-wave area under the influence of water deficit allows to non-invasive and statistically reliably register the death of some cells. At the same time, statistically reliable distinctions have not been revealed at testing of influence of phytohormones (auxins and brassinosteroids) on rooting of stem cuttings of coniferous species. The obtained results have a fundamental practical significance and can be used in the research of physiological processes in higher plants, ornamental crop production and forestry.

**Key words:** phenotyping; plant phenomics; computer vision; stem cuttings of woody plants; coniferous plants; ornamental nursery-gardening; phytohormones.

**Acknowledgements.** The work was financed within the project No. 13 of subprogramme 1 «Innovative biotechnologies – 2020» of the state project «Science-intensive technologies and techniques» Republic of Belarus, the project No. 63 of the Industrial scientific and technical programs of the Republic of Belarus «Introduction, greening, eco-safety», the basic financing State programs of scientific research «Nature use and ecology» and «Chemical technologies and materials, natural resources potential» (No. 20161634 and 20161274).

### Введение

В последние годы в биологии растений активно развивается новое направление – феномика, объектом исследования которой являются закономерности формирования и функционирования фенотипов на различных уровнях организации живых систем. Работы в области феномики направлены на решение проблем регуляции роста и развития растений, фотосинтетических и метаболических процессов, выявление механизмов стрессовых реакций и адаптации к неблагоприятным факторам среды, формирования высокой урожайности и повышения качества сельскохозяйственной продукции [1–4]. Феномика также имеет значительный потенциал в области создания новых сортов и культиваров сельскохозяйственных растений с заданными свойствами, а также разработки прогрессивных технологий в лесоводстве и питомниководстве [5–7].

Важнейшим методическим подходом феномики растений является так называемое фенотипирование индивидуального организма или групп растений, осуществляющееся при помощи широкого спектра регистрирующих устройств, таких как гиперспектральные, термальные и RGB-камеры, сенсоры флуоресценции, различного рода томографы [8–12]. Получаемая информация накапливается в виде библиотек изображений (имиджей) и обрабатывается с использованием специализированных компьютерных приложений, обеспечивающих выделение измеряемых параметров и их детальный анализ. Современные феномные комплексы способны осуществлять «высокопроизводительное» фенотипирование, при котором регистрируются характеристики сотен или даже тысяч растений в течение нескольких месяцев. Автоматизированная обработка информации в таких комплексах приобретает исключительно большое значение.

В настоящее время феномика растений активно привлекает современные методы обработки графических данных, в частности технологии компьютерного зрения, гиперспектрального анализа и машинного обучения [13–15]. Такие подходы обеспечивают максимально глубокий уровень детализации и высокую эффективность обработки сложных имиджей. Использование методов компьютерного зрения в феномике позволяет осуществлять обнаружение, выделение, мониторинг, определение физических и спектральных свойств, классификацию и статистический анализ растительных объектов [16]. Алгоритмы компьютерного зрения способны четко определить границы области имиджа, занимаемой растением, его органами или частями, отделить его от фона, отфильтровать шумы, а также отобрать зоны с заданными пользователем параметрами [17]. С применением технологии компьютерного зрения в последние годы проведены исследования по различным направлениям физиологии и биотехнологии растений. Так, был разработан метод автоматического анализа изображений супензионной культуры клеток *Arabidopsis thaliana*, что позволило создать высокопроизводительные фотосинтезирующие культуры для данного вида [18]; выявлены закономерности влияния плотности супензионной культуры на продукцию биомассы и эффективность использования света в культуре *Synechocystis* sp. RCC 6803 [19]; продемонстрированы механизмы возникновения водного дефицита в листьях высших растений при помощи визуализации флуоресценции хлорофилла *a* [20].

Одним из направлений феномики, которое остается недостаточно развитым, является фенотипирование древесных видов, что обусловлено как крупными размерами и продолжительным жизненным циклом данных растений, так и отсутствием соответствующих теоретических подходов и программных средств для работы со сложными комплексными феномами. В феномике древесных растений на данный момент преобладают исследования лесных массивов (бук *Fagus sylvatica* L., дуб *Quercus ilex* L., ель *Picea abies* L., сосна *Pinus sylvestris* L.) и посадок плодовых деревьев, таких как яблони *Malus domestica*, абрикосы *Prunus armeniaca*, персики *Prunus persica*, лимоны *Citrus × limon*, апельсины *Citrus sinensis*, при помощи мульти- и гиперспектральных датчиков, закрепленных на беспилотных летательных аппаратах или спутниках [21; 22]. Это дает информацию о размерах, форме, наличии заболеваний или водного дефицита у больших групп изучаемых растений. В то же время пока отсутствуют развитые феномные системы, позволяющие проводить анализ укоренения черенков древесных растений, что крайне необходимо для развития новых технологий в питомниководстве и лесоводстве [23; 24].

Цель настоящего исследования – разработка системы фенотипирования укореняющихся черенков древесных растений на базе алгоритмов машинного зрения и спектрального анализа. Для этого решались задачи подбора компонентов феномной системы (бокс, культивационный трей, системы освещения и полива, система получения RGB-изображений, управляющий сервер-компьютер), тестирования ее функциональности в лабораторных и полевых условиях, демонстрации изменений спектральных характеристик на базе RGB-изображений черенков декоративных древесных растений, возникающих в ответ на стрессовые воздействия и фитогормональные обработки.

## Материалы и методы исследования

Объект исследования – черенки туи западной (*Thuja occidentalis* L., сорт Smaragd), культивируемые в нестерильных условиях. Это вечнозеленое хвойное дерево из семейства кипарисовых, высотой 3–5 м, с компактной пирамidalной кроной, чешуйвидной, глянцевой, от желто-зеленой до буро-зеленой хвоей [25]. Широко применяется в городском и частном озеленении благодаря своей декоративности, нетребовательности к условиям местообитания, а также простоте культивирования. Также использовались черенки можжевельника скального (*Juniperus scopulorum* Sarg., сорт Blue Arrow) и ели обыкновенной (*Picea abies* L., N. Karst.), обладающих схожей с туей значимостью для озеленения.

Стандартные протоколы вегетативного размножения и последующего культивирования древесных растений [26] в питомниках могут быть непригодными для феномного анализа [27], что обусловлено необходимостью строгой стандартизации исходного материала для фенотипирования. Поэтому в ходе

экспериментов использовались черенки туи западной, полученные от элиты деревьев синхронной маточной плантации УП «Щемыслица» БГУ, заложенной в 2012 г. Отбирались черенки размерами 7–15 см со здоровой зеленой хвоей и фрагментом древесины прошлого года у основания (так называемая «пята»), которые помещались в 0,3 % раствор диметилсульфоксида или 0,01 % тиомочевины на 12–24 ч и высаживались в субстрат.

В качестве субстрата для подращивания черенков применялась простерилизованная смесь крупнозернистого вермикулита (4–5 мм) и раскисленного верхового торфа в соотношении 1 : 1 по объему. Субстрат стерилизовался в автоклаве при давлении 1,4–1,6 атм и температуре 120–130 °C в течение не менее 30 мин, после чего обрабатывался контактно-системным фунгицидом в рекомендемых производителем дозах. Культивационными сосудами служили одиночные черные пластиковые горшки по 500 мл или черные пластиковые кассеты с ячейками объемом 200 мл. Черенки высаживались в субстрат «пяткой» на глубину 2–3 см, после чего грунт вокруг черенка слегка уплотнялся и обильно поливался теплым (30 °C) 5 % раствором солей Woody Plant Medium (WPM) без органических добавок в расчете 1 л на 8 л субстрата. Культивационные емкости с черенками помещались на ростовые стеллажи, оснащенные системой освещения из 6 светодиодных ламп (11 Вт; 3000 K; 850 лм) с режимом 16/8 ч (свет/темнота), обеспечиваемым электронным реле. В помещении поддерживалась температура 22 °C и относительная влажность 70 %; стерильность воздуха сохранялась с помощью бактерицидных ультрафиолетовых рециркуляторов «Витязь 01 ФК» (ОАО «Витязь», Беларусь).

Для тестирования разработанного программно-аппаратного комплекса в условиях открытого грунта (т. е. вне контролируемых условий лабораторного помещения) часть черенков после укоренения переносились в теплицы на базе УП «Щемыслица» БГУ в отсутствие стандартизации параметров освещенности, температуры и влажности воздуха.

Непосредственно экспериментальная часть исследования проводилась в специально разработанной феномной системе. Составными компонентами программно-аппаратного феномного комплекса являются бокс, культивационный трей, системы освещения и полива, система получения RGB-изображений, а также управляющий сервер-компьютер. Феномный бокс размером 300 × 200 × 200 см представляет собой алюминиевый каркас со стенками из гомогенного низкоблкнового пластика синего цвета. Его размерность позволяет расположить в нем все остальные компоненты; отсутствие пола и потолка обеспечивает возможность поддержания температуры и влажности воздуха на том же уровне, что и во всем лабораторном помещении для культивирования опытных черенков.

В центральной части феномного бокса помещался рабочий стенд (трей) из нержавеющей стали. Размер рабочей поверхности площадки 147 × 86 см, высота (26 ± 3) см. Вокруг стендса располагались по 4 осветителя и SLR-камеры NIKON D3400. В качестве источника света применялись также оригинальные осветительные приборы, представляющие собой утолщенный алюминиевый лист 30 × 60 см, усиленный алюминиевыми швеллерами по всему периметру; на передней поверхности были расположены 8 светодиодных ламп (11 Вт; 3000 K; 850 лм). Расстояние от осветителей и камер до объекта фенотипирования фиксировалось благодаря использованию настраиваемых стоек и штативов.

Феномная система автоматизирована при помощи компьютера, оснащенного хабом для широкого спектра подключений. Использовались операционная система Ubuntu 16.04 и язык программирования Python 3. Для работы с камерами, управления феномной системой и анализа данных создана компьютерная программа «Система автоматического получения и вывода RGB-имиджей». Для передачи информации управляющему компьютеру в феномную систему включены микроконтроллеры Arduino (HC, Китай), которые производили мониторинг данных от датчиков света, влажности почвы и температуры в феномном боксе. Датчики непрерывно собирали информацию и передавали ее на компьютер, который предупреждал пользователя при смещении норм считываемых параметров.

Спектральный анализ на основе подходов машинного зрения производился программой «Система автоматического получения и вывода RGB-имиджей», упрощенный алгоритм действий которой включает следующие этапы.

*Этап 1.* Перевод изображения в палитру HSV (Hue – оттенок, Saturation – насыщенность, Value – яркость). Для определения участков с изображениями растений выделяются все пиксели с параметром *H*, соответствующим зеленому цвету, т. е. от 46 до 112, а также с компонентами *S* от 39 до 255 и *V* от 42 до 255.

*Этап 2.* Уменьшение размеров изображения для ускорения процессов обработки.

*Этап 3.* Фильтрация шумов путем наложения медианного фильтра.

*Этап 4.* Определение начальной аппроксимации маски. Маской фотосинтезирующих частей растения является таковая исходного изображения, содержащая 1 только в пикселях, которые соответствуют растению, т. е. начальной аппроксимацией маски служит выборка пикселей, удовлетворяющих условиям: *H*[46, 112], *S*[39, 255], *V*[42, 255].

**Этап 5.** Дилатация – расширяющее преобразование маски. Расширение маски в определенную точку производится только в том случае, если расстояние между ее цветом и цветом точки, на основании которой данная точка будет добавлена к маске, достаточно невелико.

**Этап 6.** Фильтрация областей маски. Полученная на предыдущих этапах маска может содержать некоторое количество замкнутых областей; в зависимости от размера обрабатываемого изображения и предварительных параметров могут быть удалены небольшие по площади контуры (например, содержащие менее 10 пк).

**Этап 7.** Перевод показателей HSV в длины волн по формуле  $L = 625 - (2H \cdot 175/240)$ , где  $L$  – длина волны, соответствующая пикселю со значением оттенка в градусах, равным  $H$ .

**Этап 8.** Построение кривой распределения процентного соотношения пикселей по длине волны.

Следует отметить, что показатели длин волн – это приближенная интерпретация параметра  $H$  цветовой модели HSV; они не являются абсолютными значениями длин волн и достоверным отображением спектра отражения. По результатам обработки изображений программой можно получить информацию о наличии на исходной фотографии объектов с цветом, отличным от синего и зеленого (сухие части растения или же посторонние объекты). При наблюдении динамики распределения процентного соотношения пикселей по длине волн можно сделать выводы об изменениях в состоянии растения, например о его засыхании.

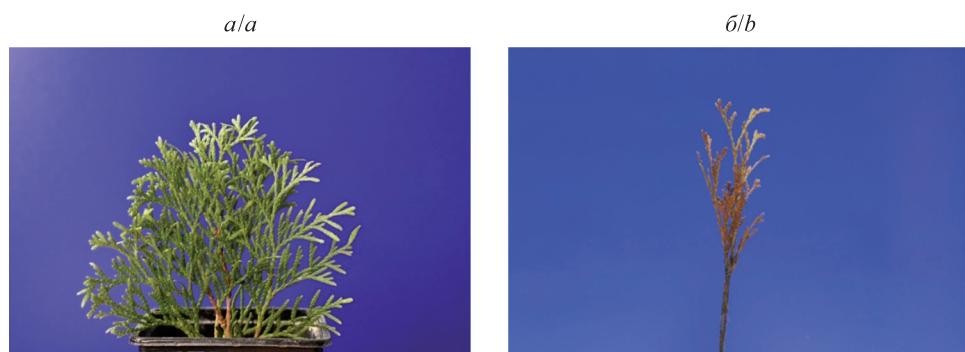
Данный программный пакет реализован как система поддержки принятия решений – компьютерная автоматизированная система, целью которой является помочь пользователям в сложных условиях для полного и объективного анализа предметной деятельности [28]. Эти системы в своей работе используют целый ряд методов, включая информационный поиск, интеллектуальный анализ данных, имитационное моделирование, рассуждение на основе прецедентов, эволюционные вычисления и генетические алгоритмы, нейронные сети, ситуационный анализ, когнитивное моделирование и др.

### Результаты и их обсуждение

Решен целый ряд задач, направленных на создание собственной феномной платформы. Для обеспечения оптимальных условий фотографирования собран феномный бокс, разработаны система освещения, методика съемки и программа для дистанционного управления SLR-камерами, автоматического накопления изображений и их анализа.

Для тестирования программы «Система автоматического получения и вывода RGB-имиджей» сформирована база данных изображений черенков туи западной (рис. 1), для чего изначально идентичные по возрасту, фазе жизненного цикла и физиологическому состоянию растения разделялись на две группы: контрольную (стандартный полив) и подверженную стрессу, вызванному водным дефицитом (исключение полива на период 30 сут).

Анализ полученных имиджей (рис. 2) продемонстрировал, что у растений туи западной контрольной группы характерны пики в области 520–525 и 540–545 нм, а для группы, подверженной стрессовому воздействию, пики наблюдались в более длинноволновой части спектра (540–550 нм). Таким образом, были идентифицированы отличия спектральных свойств изображений туи западной при разных физиологических состояниях.



*Rис. 1.* Примеры RGB-изображений базы данных черенков в разном физиологическом состоянии:  
а – черенок туи западной из контрольной выборки;  
б – фенотип черенка, подверженного водному дефициту

*Fig. 1.* Examples of RGB-images of the database of stem cuttings of *Thuja occidentalis* L., Smaragd in different physiological conditions:  
a – the stem cuttings of the *Thuja occidentalis* L., Smaragd from the control sample;  
b – phenotype of the cutting exposed to water deficit

Для отработки протоколов программно-аппаратного феномного комплекса проведен имиджинг растений в условиях теплицы и открытого грунта на базе УП «Щемыслица» БГУ. Регистрация изображений осуществлялась так же, как и в условиях феномного бокса, с четырех сторон SLR-камерами на штативах. Были протестированы черенки туи западной, можжевельника скального, а также ели обыкновенной. В процессе культивирования растения обрабатывались  $10^{-6}$  моль/л кастастерона (КС),  $10^{-6}$  моль/л гомо-кастастерона (ГК),  $10^{-6}$  моль/л брашинолида (БЛ),  $10^{-6}$  моль/л гомобрашинолида (ГБ), 50 мг/л индолил-масляной кислоты (ИМК) и 50 мг/л дихлорфенохуксусной кислоты (2,4-Д). Контрольные черенки не обрабатывались фитогормонами. Результаты исследования укореняемости черенков на примере туи

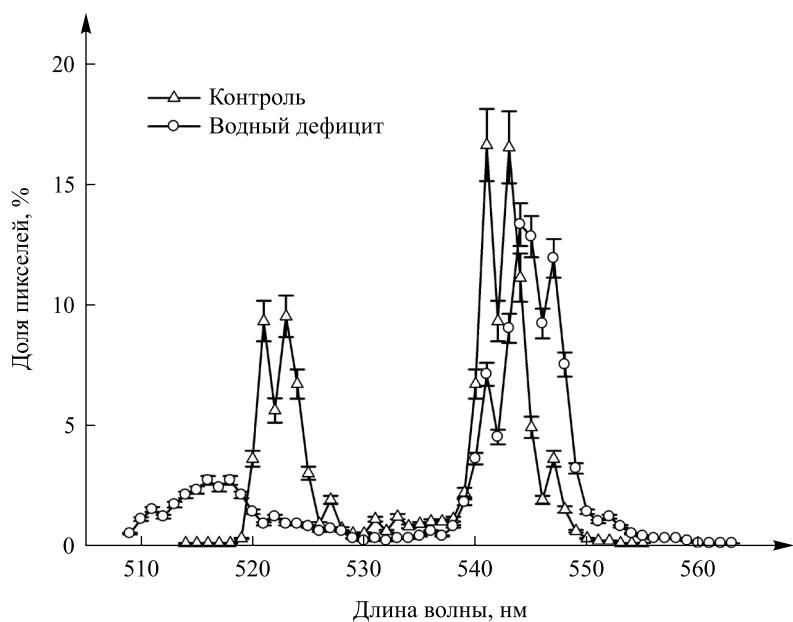


Рис. 2. Сравнительная характеристика спектрального состава изображений туи западной в различном физиологическом состоянии ( $n = 60$ ;  $X \pm S_x$ )

Fig. 2. Comparative characteristics of the spectral composition of images of *Thuja occidentalis* L., Smaragd, in various physiological state ( $n = 60$ ;  $X \pm S_x$ )

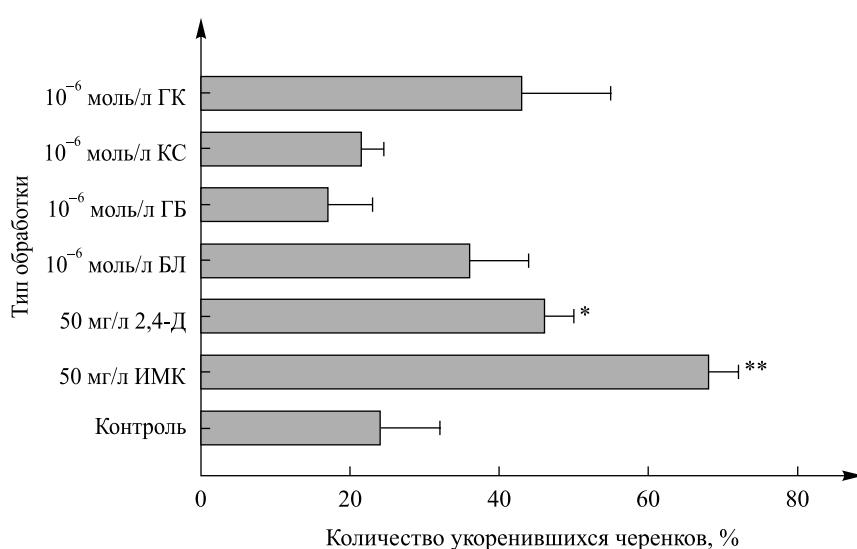


Рис. 3. Воздействие фитогормонов на укоренение черенков *Thuja occidentalis* L. сорта Smaragd ( $n = 30$ ; \* $p < 0,05$ , \*\* $p < 0,0001$ )

Fig. 3. Effects on the rooting of stem cuttings of *Thuja occidentalis* L., Smaragd ( $n = 30$ ; \* $p < 0,05$ , \*\* $p < 0,0001$ ) of phytohormones: homocastasteron (ГК), castasteron (КС), homobrassinolide (ГБ), brassinolide (БЛ), dichlorophenoxyacetic acid (2,4-Д), indolebutyric acid (ИМК)

западной через 120 сут представлены на рис. 3. Оценка укоренения растений можжевельника скального и ели обыкновенной в эти сроки не проводилась. Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что из представленных фитогормонов статистически достоверно повышали эффективность укоренения черенков туи западной только 2,4-Д и ИМК (50 мг/л).

Для выявления взаимосвязи между формированием корневой системы при действии фитогормонов и изменением спектральных характеристик растений проводился имиджинг групп растений туи западной, можжевельника скального и ели обыкновенной. Регистрация изображений проводилась на 120-е сутки культивирования с целью исследовать спектральные характеристики изображений черенков древесных растений программой «Система автоматического получения и вывода RGB-имиджей». Пример анализа спектрального состава растений на примере можжевельника скального представлен на рис. 4.

Результаты исследования спектральных характеристик имиджей черенков туи западной, можжевельника скального, ели обыкновенной представлены в таблице. Для растений, подверженных воздействию фитогормонов, выявлены статистически достоверные смещения пиков для черенков туи западной, обработанных ИМК, БЛ, КС и ГК; для черенков можжевельника скального, обработанных КС и ГБ, а также для черенков ели обыкновенной во всех обработках.

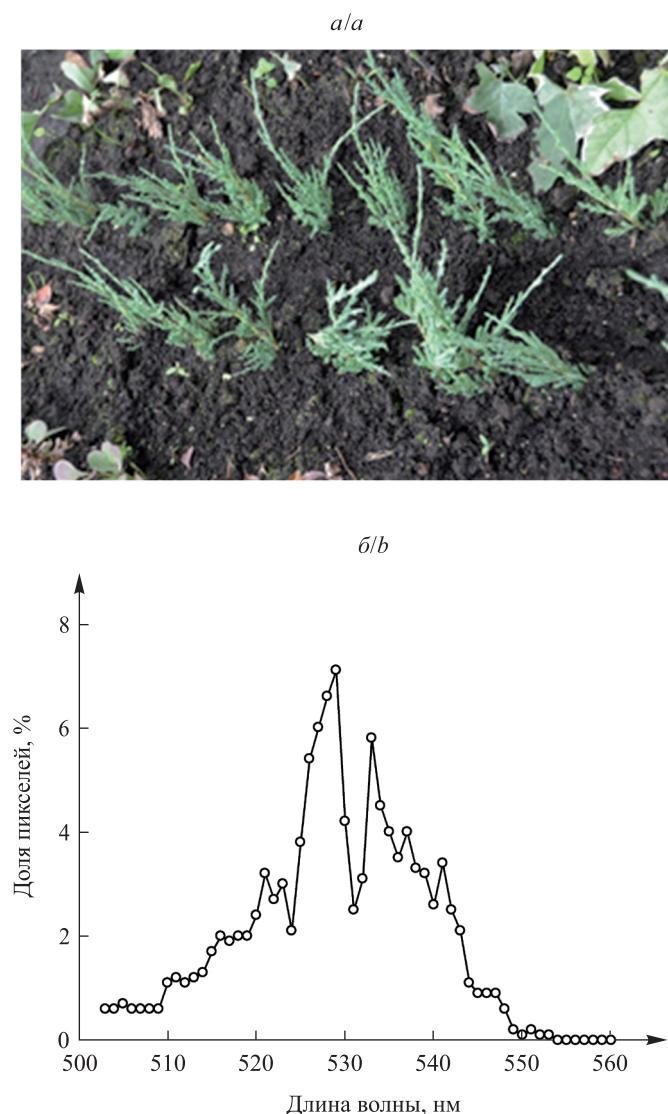


Рис. 4. Типичный RGB-имидж растений можжевельника скального, выращенных в открытом грунте (а), и распределение пикселей данного изображения по длинам волн (б)

Fig. 4. Typical RGB-image of *Juniperus scopulorum* Sarg. grown in open ground (a) and pixel distribution by wavelengths of the given image (b)

Спектральные характеристики RGB-изображений черенков туи западной, можжевельника скального и ели обыкновенной, обрабатываемых различными фитогормонами, на 120-е сутки культивирования

Spectral characteristics of RGB-images of stem cuttings of *Thuja occidentalis* L., Smaragd, *Juniperus scopulorum* Sarg., Blue Arrow, *Picea abies* L., H. Karst., treated by different phytohormones during 120 d of cultivation

Тип обработки	Диапазон значений пиков, нм	Среднее значение пика, нм	Уровень значимости <i>p</i> (тест ANOVA)
Туя западная ( <i>Thuja occidentalis</i> L., сорт Smaragd)			
Контроль	524–532	528 ± 0,81	–
50 мг/л ИМК	531–542	533 ± 1,08	0,0016
50 мг/л 2,4-Д	521–534	526 ± 1,21	0,1853
10 <sup>-6</sup> моль/л БЛ	527–537	532 ± 1,03	0,0069
10 <sup>-6</sup> моль/л ГБ	527–535	529 ± 0,78	0,3844
10 <sup>-6</sup> моль/л КС	546–553	550 ± 0,75	0,0001
10 <sup>-6</sup> моль/л ГК	532–539	537 ± 0,69	0,0001
Можжевельник скальный ( <i>Juniperus scopulorum</i> Sarg., сорт Blue Arrow)			
Контроль	516–528	521 ± 1,07	–
50 мг/л ИМК	518–525	520 ± 0,67	0,4383
50 мг/л 2,4-Д	520–532	524 ± 1,27	0,0868
10 <sup>-6</sup> моль/л БЛ	514–525	520 ± 1,24	0,5490
10 <sup>-6</sup> моль/л ГБ	515–523	517 ± 0,78	0,0073
10 <sup>-6</sup> моль/л КС	520–529	525 ± 0,96	0,0121
10 <sup>-6</sup> моль/л ГК	518–527	522 ± 0,97	0,4975
Ель обыкновенная ( <i>Picea abies</i> L., H. Karst.)			
Контроль	539–548	542 ± 0,86	–
50 мг/л ИМК	544–552	547 ± 0,70	0,0003
50 мг/л 2,4-Д	556–569	561 ± 1,42	0,0001
10 <sup>-6</sup> моль/л БЛ	580–588	583 ± 0,74	0,0001
10 <sup>-6</sup> моль/л ГБ	542–553	546 ± 1,10	0,0101
10 <sup>-6</sup> моль/л КС	544–554	547 ± 1,13	0,0025
10 <sup>-6</sup> моль/л ГК	540–549	545 ± 0,98	0,0335

Повышение эффективности функционирования программного комплекса «Система автоматического получения и вывода RGB-имиджей» и технологии феномного анализа саженцев древесных пород в будущем возможно по мере расширения базы имиджей с большим числом видов декоративных древесных растений на разных этапах развития черенков и в различных физиологических состояниях. Для получения необходимого количества черенков растений для феномных исследований была заложена маточная плантация элиты декоративных древесных культур и на базе Ботанического сада биологического факультета БГУ.

### Заключение

Разработанная программа обеспечивает получение данных о спектральных характеристиках растений, в частности черенков декоративных древесных видов, а также производит оценку их жизнеспособности. В ее основе лежит графическая информация от недорогих и доступных RGB/SLR-камер. Подобным функционалом обладает ряд феномных программ, однако все они базируются на полноценном и дорогостоящем гиперспектральном анализе [29–31] или применении методов автоматического стереоимиджинга для выявления закономерностей накопления биомассы, маркеров водного дефицита, а также корреляций между «зеленостью» черенков, определенной в RGB-диапазоне, и биомассой, между высотой и биомассой [23].

Алгоритмы компьютерного зрения, схожие с разработанными в настоящем исследовании, используются коммерческими платформами, такими как *Bellwether* [32] и *PhenomicsNL* [33]. Преимущество созданной программы – доступность для инсталляции на обычный персональный компьютер, простота интерфейса, в том числе для операторов, не являющихся специалистами в области феномики, возможность просмотра и экспортования данных на всех этапах анализа (от удаления шума и наложения масок до табличных данных и итоговых диаграмм).

По результатам проделанной работы можно сделать следующие выводы:

- разработанный и собранный модульный феномный комплекс (бокс, культивационный трей, системы освещения и полива, система получения RGB-изображений, компьютерная установка, специализированное программное обеспечение) обладает функциями, необходимыми для применения в лаборатории и в условиях открытого грунта, и обеспечивает регистрацию и анализ спектральных данных имиджей как одиночных растений, так и их групп;
- по изменению кривых распределения пикселей по длинам волн, получаемых при помощи программы «Система автоматического получения и вывода RGB-имиджей», можно судить об изменении физиологического состояния черенков древесных растений (в частности, продемонстрировано смещение пиков спектра отражения в длинноволновую область под действием водного дефицита);
- спектральные характеристики изображений черенков туи западной, можжевельника скального и ели обыкновенной статистически значимо изменяются под действием ауксинов и брассиностероидов.

## Библиографические ссылки

1. Furbank RT, Tester M. Phenomics – technologies to relieve the phenotyping bottleneck. *Trends in Plant Science*. 2011;16(12):635–644. DOI: 10.1016/j.tplants.2011.09.005.
2. Coppens F, Wuyts N, Inze D, Dhondt S. Unlocking the potential of plant phenotyping data through integration and data-driven approaches. *Current Opinion in Systems Biology*. 2017;4:58–63. DOI: 10.1016/j.coisb.2017.07.002.
3. Tardieu F, Cabrera-Bosquet L, Pridmore T, Bennett M. Plant phenomics, from sensors to knowledge. *Current Biology*. 2017;27(15):770–783. DOI: 10.1016/j.cub.2017.05.055.
4. Ghanem ME, Marrou H, Sinclair TR. Physiological phenotyping of plants for crop improvement. *Trends in Plant Science*. 2015;3:139–144. DOI: 10.1016/j.tplants.2014.11.006.
5. Awada L, Phillips PWB, Smyth SJ. The adoption of automated phenotyping by plant breeders. *Euphytica*. 2018;214. DOI: 10.1007/s10681-018-2226-z.
6. Araus JL, Cairns JE. Field high-throughput phenotyping: The new crop breeding frontier. *Trends in Plant Science*. 2014;19(1):52–61. DOI: 10.1016/j.tplants.2013.09.008.
7. Wallace A, Nichol C, Woodhouse I. Recovery of forest canopy parameters by inversion of multispectral LiDAR data. *Remote Sensing*. 2012;4(2):509–531. DOI: 10.3390/rs4020509.
8. Gerlai R. Phenomics: fiction or the future? *Trends Neurosciences*. 2002;25(10):506–509. DOI: 10.1016/S0166-2236(02)02250-6.
9. Thorp KR, Gore MA, Andrade-Sanchez P, Carmo-Silva AE, Welch SM, White JW, et al. Proximal hyperspectral sensing and data analysis: approaches for field-based plant phenomics. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2015;118:225–236. DOI: 10.1016/j.compag.2015.09.005.
10. Hughes N, Askew K, Scotson CP, Williams K, Sauze C, Corke F, et al. Non-destructive, high-content analysis of wheat grain traits using X-ray micro computed tomography. *Plant Methods*. 2017;13:76. DOI: 10.1186/s13007-017-0229-8.
11. Jones HG, Serraj R, Loveys BR, Xiong L, Wheaton A, Price AH. Thermal infrared imaging of crop canopies for the remote diagnosis and quantification of plant responses to water stress in the field. *Functional Plant Biology*. 2009;36:978–989. DOI: 10.1071/FP09123.
12. Garbout A, Munkholm LJ, Hansen SB, Petersen BM, Munk OL, Pajor R. The use of PET/CT scanning technique for 3D visualization and quantification of real-time soil/plant interactions. *Plant and Soil*. 2012;352:113–127.
13. Zhang J, Naik HS, Assefa T, Sarkar S, Reddy RVC, Singh A, et al. Computer vision and machine learning for robust phenotyping in genome-wide studies. *Scientific Reports*. 2017;7:440–448. DOI: 10.1038/srep44048.
14. Ghosal S, Blystone D, Singh AK, Ganapathysubramanian B, Singh A, Sarkar S. An explainable deep machine vision framework for plant stress phenotyping. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2018;115(18):4613–4618. DOI: 10.1073/pnas.1716999115.
15. Gutiérrez S, Fernandez-Novales J, Diago MP, Tardaguila J. On-the-go hyperspectral imaging under field conditions and machine learning for the classification of grapevine varieties. *Frontiers in Plant Science*. 2018;9:1102. DOI: 10.3389/fpls.2018.01102.
16. Hunt ER, Hively WD, Fujikawa S, Linden D, Daughtry CST, McCarty G. Acquisition of NIR-Green-Blue digital photographs from unmanned aircraft for crop monitoring. *Remote Sensing*. 2010;2(1):290–305. DOI: 10.3390/rs2010290.
17. Pottmann H. Integral invariants for robust geometry processing. *Computer Aided Geometric Design*. 2009;26(1):37–60. DOI: 10.1016/j.cagd.2008.01.002.
18. Sello S, Moscatiello R, La Rocca N, Baldan B, Navazio L. A rapid and efficient method to obtain photosynthetic cell suspension cultures of *Arabidopsis thaliana*. *Frontiers in Plant Science*. 2017;8:1444. DOI: 10.3389/fpls.2017.01444.
19. Straka L, Rittmann BE. Effect of culture density on biomass production and light utilization efficiency of *Synechocystis* sp. PCC 6803. *Biotechnology and Bioengineering*. 2018;115(2):507–511. DOI: 10.1002/bit.26479.
20. Mishra KB, Mishra A, Novotná K, Rapantová B, Hodaňová P, Urban O, et al. Chlorophyll a fluorescence, under half of the adaptive growth-irradiance, for high-throughput sensing of leaf-water deficit in *Arabidopsis thaliana* accessions. *Plant Methods*. 2016;12(46). DOI: 10.1186/s13007-016-0145-3.

21. Gonzalez-Dugo V, Zarco-Tejada P, Nicolas E, Nortes PA, Alarcon JJ, Intrigliolo DS, et al. Using high resolution UAV thermal imagery to assess the variability in the water status of five fruit tree species within a commercial orchard. *Precision Agriculture*. 2013;14(6):660–678. DOI: 10.1007/s11119-013-9322-9.
22. Dungey HS, Dash JP, Pont D, Clinton PW, Watt MS, Telfer EJ. Phenotyping whole forests will help to track genetic performance. *Trends in Plant Science*. 2018;23(10):854–864. DOI: 10.1016/j.tplants.2018.08.005.
23. Montagnoli A, Terzaghi M, Fulgaro N, Stoew B, Wipenmyr J, Ilver D, et al. Non-destructive phenotypic analysis of early stage tree seedling growth using an automated stereovision imaging method. *Frontiers in Plant Science*. 2016;7:1644–1662. DOI: 10.3389/fpls.2016.01644.
24. Krabel D, Meyer M, Nyamjav B, Reiche B. Phenotyping trees for traits related to drought stress tolerance – importance and challenge. In: *Agrosym 2017. VIII International Scientific Agriculture Symposium; 2017 October 5–8; Jahorina, Bosnia and Herzegovina*. Lukavica: University of East Sarajevo; 2017.
25. Матюхин ДЛ, Манина ОС, Королёва НС. *Виды и формы хвойных, культивируемые в России*. Москва: Товарищество научных изданий КМК; 2009. с. 138–139.
26. Леонтьяк ГП. *Дендропроектирование (Архитектура зеленого строительства)*. Тирасполь: ПГУ; 2006. с. 16–17.
27. Warner JL, Denny JC, Kreda DA, Alterovitz G. Seeing the forest through the trees: Uncovering phenomic complexity through interactive network visualization. *Journal of the American Medical Informatics Association*. 2015;22(2):324–329. DOI: 10.1136/amia-jnl-2014-002965.
28. Ларичев ОИ. Системы поддержки принятия решений. Современное состояние и перспективы их развития. *Итоги науки и техники. Серия: Техническая кибернетика*. 1987;21:131–164.
29. Martin SL, George T. Applications of hyperspectral image analysis for precision agriculture. In: *Conference on Micro- and Nanotechnology Sensors, Systems, and Applications X; 2018 April 15–19; Orlando, United States*. Orlando: [publisher unknown]; 2018. DOI: 10.1117/12.2303921.
30. Zhao H, Xu L, Shi S, Jiang H, Chen D. A high throughput integrated hyperspectral imaging and 3D measurement system. *Sensors*. 2018;18(4):1068. DOI: 10.3390/s18041068.
31. Yao X, Si H, Cheng T, Jia M, Chen Q, Tian Y, et al. Hyperspectral estimation of canopy leaf biomass phenotype per ground area using a continuous wavelet analysis in wheat. *Frontiers in Plant Science*. 2018;9:1360. DOI: 10.3389/fpls.2018.01360.
32. Fahlgren N, Feldman M, Gehan MA, Wilson MS, Shyu C, Bryant DW, et al. A versatile phenotyping system and analytics platform reveals diverse temporal responses to water availability in *Setaria*. *Molecular Plant*. 2015;8(10):1520–1535. DOI: 10.1016/j.molp.2015.06.005.
33. Phenomics NL. Wageningen UR [Internet]. [Cited 2018 November 29]. Available from: <https://www.wageningenur.nl/en/Research-Results/Projects-and-programmes/PhenomicsNL.htm>.

## References

1. Furbank RT, Tester M. Phenomics – technologies to relieve the phenotyping bottleneck. *Trends in Plant Science*. 2011;16(12):635–644. DOI: 10.1016/j.tplants.2011.09.005.
2. Coppens F, Wuyts N, Inze D, Dhondt S. Unlocking the potential of plant phenotyping data through integration and data-driven approaches. *Current Opinion in Systems Biology*. 2017;4:58–63. DOI: 10.1016/j.coisb.2017.07.002.
3. Tardieu F, Cabrerá-Bosquet L, Pridmore T, Bennett M. Plant phenomics, from sensors to knowledge. *Current Biology*. 2017;27(15):770–783. DOI: 10.1016/j.cub.2017.05.055.
4. Ghanem ME, Marrou H, Sinclair TR. Physiological phenotyping of plants for crop improvement. *Trends in Plant Science*. 2015;3:139–144. DOI: 10.1016/j.tplants.2014.11.006.
5. Awada L, Phillips PWB, Smyth SJ. The adoption of automated phenotyping by plant breeders. *Euphytica*. 2018;214. DOI: 10.1007/s10681-018-2226-z.
6. Araus JL, Cairns JE. Field high-throughput phenotyping: The new crop breeding frontier. *Trends in Plant Science*. 2014;19(1):52–61. DOI: 10.1016/j.tplants.2013.09.008.
7. Wallace A, Nichol C, Woodhouse I. Recovery of forest canopy parameters by inversion of multispectral LiDAR data. *Remote Sensing*. 2012;4(2):509–531. DOI: 10.3390/rs4020509.
8. Gerlai R. Phenomics: fiction or the future? *Trends Neurosciences*. 2002;25(10):506–509. DOI: 10.1016/S0166-2236(02)02250-6.
9. Thorp KR, Gore MA, Andrade-Sánchez P, Carmo-Silva AE, Welch SM, White JW, et al. Proximal hyperspectral sensing and data analysis; approaches for field-based plant phenomics. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2015;118:225–236. DOI: 10.1016/j.compag.2015.09.005.
10. Hughes N, Askew K, Scotson CP, Williams K, Sauze C, Corke F, et al. Non-destructive, high-content analysis of wheat grain traits using X-ray micro computed tomography. *Plant Methods*. 2017;13:76. DOI: 10.1186/s13007-017-0229-8.
11. Jones HG, Serraj R, Loveys BR, Xiong L, Wheaton A, Price AH. Thermal infrared imaging of crop canopies for the remote diagnosis and quantification of plant responses to water stress in the field. *Functional Plant Biology*. 2009;36:978–989. DOI: 10.1071/FP09123.
12. Garbout A, Munkholm LJ, Hansen SB, Petersen BM, Munk OL, Pajor R. The use of PET/CT scanning technique for 3D visualization and quantification of real-time soil/plant interactions. *Plant and Soil*. 2012;352:113–127.
13. Zhang J, Naili HS, Assefa T, Sarkar S, Reddy RVC, Singh A, et al. Computer vision and machine learning for robust phenotyping in genome-wide studies. *Scientific Reports*. 2017;7:440–448. DOI: 10.1038/srep44048.
14. Ghosal S, Blystone D, Singh AK, Ganapathysubramanian B, Singh A, Sarkar S. An explainable deep machine vision framework for plant stress phenotyping. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2018;115(18):4613–4618. DOI: 10.1073/pnas.1716999115.
15. Gutiérrez S, Fernandez-Novales J, Diago MP, Tardaguila J. On-the-go hyperspectral imaging under field conditions and machine learning for the classification of grapevine varieties. *Frontiers in Plant Science*. 2018;9:1102. DOI: 10.3389/fpls.2018.01102.
16. Hunt ER, Hively WD, Fujikawa S, Linden D, Daughtry CST, McCarty G. Acquisition of NIR-Green-Blue digital photographs from unmanned aircraft for crop monitoring. *Remote Sensing*. 2010;2(1):290–305. DOI: 10.3390/rs2010290.

17. Pottmann H. Integral invariants for robust geometry processing. *Computer Aided Geometric Design*. 2009;26(1):37–60. DOI: 10.1016/j.cagd.2008.01.002.
18. Sello S, Moscatiello R, La Rocca N, Baldan B, Navazio L. A rapid and efficient method to obtain photosynthetic cell suspension cultures of *Arabidopsis thaliana*. *Frontiers in Plant Science*. 2017;8:1444. DOI: 10.3389/fpls.2017.01444.
19. Straka L, Rittmann BE. Effect of culture density on biomass production and light utilization efficiency of *Synechocystis* sp. PCC 6803. *Biotechnology and Bioengineering*. 2018;115(2):507–511. DOI: 10.1002/bit.26479.
20. Mishra KB, Mishra A, Novotná K, Rapantová B, Hodaňová P, Urban O, et al. Chlorophyll a fluorescence, under half of the adaptive growth-irradiance, for high-throughput sensing of leaf-water deficit in *Arabidopsis thaliana* accessions. *Plant Methods*. 2016; 12(46). DOI: 10.1186/s13007-016-0145-3.
21. Gonzalez-Dugo V, Zarco-Tejada P, Nicolas E, Nortes PA, Alarcon JJ, Intrigliolo DS, et al. Using high resolution UAV thermal imagery to assess the variability in the water status of five fruit tree species within a commercial orchard. *Precision Agriculture*. 2013; 14(6):660–678. DOI: 10.1007/s11119-013-9322-9.
22. Dungey HS, Dash JP, Pont D, Clinton PW, Watt MS, Telfer EJ. Phenotyping whole forests will help to track genetic performance. *Trends in Plant Science*. 2018;23(10):854–864. DOI: 10.1016/j.tplants.2018.08.005.
23. Montagnoli A, Terzaghi M, Fulgaro N, Stoew B, Wipenmyr J, Ilver D, et al. Non-destructive phenotypic analysis of early stage tree seedling growth using an automated stereovision imaging method. *Frontiers in Plant Science*. 2016;7:1644–1662. DOI: 10.3389/fpls.2016.01644.
24. Krabel D, Meyer M, Nyamjav B, Reiche B. Phenotyping trees for traits related to drought stress tolerance – importance and challenge. In: *Agrosym 2017. VIII International Scientific Agriculture Symposium; 2017 October 5–8; Jahorina, Bosnia and Herzegovina*. Lukavica: University of East Sarajevo; 2017.
25. Matyukhin DL, Manina OS, Koroleva NS. *Vidy i formy khvoinykh, kul'tiviruemye v Rossii*. Moscow: Tovarishchestvo nauchnykh izdanii KMK; 2009. p. 138–139. Russian.
26. Leontyak GP. *Dendroproektirovanie (Arkhitektura zelenogo stroitel'stva)*. Tiraspol: Pridnestrovian State University named after Taras Shevchenko; 2006. p. 16–17. Russian.
27. Warner JL, Denny JC, Kreda DA, Alterovitz G. Seeing the forest through the trees: Uncovering phenomic complexity through interactive network visualization. *Journal of the American Medical Informatics Association*. 2015;22(2):324–329. DOI: 10.1136/amia-jnl-2014-002965.
28. Larichev OI. Sistemy podderzhki prinyatiya reshenii. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy ikh razvitiya. *Itogi nauki i tekhniki. Seriya: Tekhnicheskaya kibernetika*. 1987;21:131–164. Russian.
29. Martin SL, George T. Applications of hyperspectral image analysis for precision agriculture. In: *Conference on Micro- and Nanotechnology Sensors, Systems, and Applications X; 2018 April 15–19; Orlando, United States*. Orlando: [publisher unknown]; 2018. DOI: 10.1117/12.2303921.
30. Zhao H, Xu L, Shi S, Jiang H, Chen D. A high throughput integrated hyperspectral imaging and 3D measurement system. *Sensors*. 2018;18(4):1068. DOI: 10.3390/s18041068.
31. Yao X, Si H, Cheng T, Jia M, Chen Q, Tian Y, et al. Hyperspectral estimation of canopy leaf biomass phenotype per ground area using a continuous wavelet analysis in wheat. *Frontiers in Plant Science*. 2018;9:1360. DOI: 10.3389/fpls.2018.01360.
32. Fahlgren N, Feldman M, Gehan MA, Wilson MS, Shyu C, Bryant DW, et al. A versatile phenotyping system and analytics platform reveals diverse temporal responses to water availability in *Setaria*. *Molecular Plant*. 2015;8(10):1520–1535. DOI: 10.1016/j.molp.2015.06.005.
33. Phenomics NL. Wageningen UR [Internet]. [Cited 2018 November 29]. Available from: <https://www.wageningenur.nl/en/Research-Results/Projects-and-programmes/PhenomicsNL.htm>.

Статья поступила в редакцию 25.01.2019.  
Received by editorial board 25.01.2019.

## Авторы:

**Антонина Юрьевна Шашко** – магистрант кафедры клеточной биологии и биоинженерии растений биологического факультета. Научный руководитель – В. В. Демидчик.

**Владислав Юрьевич Бондаренко** – магистрант кафедры клеточной биологии и биоинженерии растений биологического факультета. Научный руководитель – В. В. Демидчик.

**Александр Алексеевич Михальченко** – стажер младшего научного сотрудника научно-исследовательской лаборатории информационных технологий и компьютерной графики кафедры информационных систем управления факультета прикладной математики и информатики.

**Татьяна Геннадьевна Каляга** – младший научный сотрудник лаборатории биофизики и биохимии растительной клетки.

**Ольга Юрьевна Сафонова** – младший научный сотрудник лаборатории биофизики и биохимии растительной клетки.

## Authors:

**Antonina Yu. Shashko**, master's degree student at the department of plant cell biology and bioengineering, faculty of biology. [antonina.shashko@gmail.com](mailto:antonina.shashko@gmail.com)

**Uladzislau Yu. Bandarenka**, master's degree student at the department of plant cell biology and bioengineering, faculty of biology.

[uladzislau.bandarenka@gmail.com](mailto:uladzislau.bandarenka@gmail.com)

**Alexander A. Mikhalkenko**, probationer of junior researcher at the research laboratory of information technologies and computer graphics, department of management information systems, faculty of applied mathematics and computer science.

**Tatsiana G. Kalialha**, junior researcher at the laboratory of plant cell biophysics and biochemistry.

[t\\_kalyaga@mail.ru](mailto:t_kalyaga@mail.ru)

**Olga Yu. Safonova**, junior researcher at the laboratory of plant cell biophysics and biochemistry.

[olga.safonova.1995@mail.ru](mailto:olga.safonova.1995@mail.ru)

**Дарья Андреевна Пржевальская** – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории физиологии и биотехнологии растений кафедры клеточной биологии и биоинженерии растений биологического факультета.

**Мария Александровна Черныш** – аспирант кафедры клеточной биологии и биоинженерии растений биологического факультета. Научный руководитель – В. В. Демидчик.

**Дмитрий Викторович Колбанов** – заместитель директора.

**Владимир Николаевич Жабинский** – доктор химических наук, доцент; главный научный сотрудник лаборатории химии стероидов.

**Владимир Александрович Хрипач** – академик НАН Беларуси, доктор химических наук, профессор; заведующий лабораторией химии стероидов.

**Игорь Иванович Смолич** – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры клеточной биологии и биоинженерии растений биологического факультета.

**Анатолий Иосифович Соколик** – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры клеточной биологии и биоинженерии растений биологического факультета.

**Александр Николаевич Вальвачев** – кандидат технических наук; доцент кафедры информационных систем управления факультета прикладной математики и информатики.

**Сергей Владимирович Абламейко** – академик НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор; профессор кафедры веб-технологий и компьютерного моделирования механико-математического факультета.

**Виктор Владимирович Краснопрошин** – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой информационных систем управления факультета прикладной математики и информатики.

**Галина Николаевна Смоликова** – кандидат биологических наук; доцент кафедры физиологии и биохимии растений биологического факультета.

**Вадим Викторович Демидчик** – доктор биологических наук, доцент; заведующий кафедрой клеточной биологии и биоинженерии растений биологического факультета.

**Darya A. Przhevalskaya**, junior researcher at the research laboratory of plant physiology and biotechnology, department of plant cell biology and bioengineering, faculty of biology.

*daryaprzhevalskaya@gmail.com*

**Maryia A. Charnysh**, postgraduate student at the department of plant cell biology and bioengineering, faculty of biology.

*chernyshmaryia@gmail.com*

**Dmitrii V. Kolbanov**, deputy director.

*dmitry-kolbanov@tut.by*

**Vladimir N. Zhabinskii**, doctor of science (chemistry), docent; chief researcher at the laboratory of steroid chemistry.

*vz@ns.iboch.ac.by*

**Vladimir A. Khripach**, academician of the National Academy of Sciences of Belarus, doctor of science (chemistry), full professor; head of the laboratory of steroid chemistry.

*khripach@iboch.bas-net.by*

**Ihor I. Smolich**, PhD (biology), docent; associate professor at the department of plant cell biology and bioengineering, faculty of biology.

*smolich@bsu.by*

**Anatoliy I. Sokolik**, PhD (biology), docent; associate professor at the department of plant cell biology and bioengineering, faculty of biology.

*sokolik@bsu.by*

**Alexander N. Valvachev**, PhD (engineering); associate professor at the department of information management systems, faculty of applied mathematics and computer science.

*van\_955@mail.ru*

**Sergei V. Ablameyko**, academician of the National Academy of Sciences of Belarus, doctor of science (engineering), full professor; professor at the department of web technologies and computer modeling, faculty of mechanics and mathematics.

*ablameyko@bsu.by*

**Victor V. Krasnoproshin**, doctor of science (engineering), full professor; head of the department of information management systems, faculty of applied mathematics and computer science.

*krasnoproshin@bsu.by*

**Galina N. Smolikova**, PhD (biology); associate professor at the department of plant physiology and biochemistry, faculty of biology.

*galina.smolikova@gmail.com*

**Vadim V. Demidchik**, doctor of science (biology), docent; head of the department of plant cell biology and bioengineering, faculty of biology.

*dzemidchik@bsu.by*