

СОВРЕМЕННЫЕ ФЕНОМНЫЕ ПЛАТФОРМЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В БИОЛОГИИ РАСТЕНИЙ И СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

А. Ю. ШАШКО¹⁾, В. Ю. БОНДАРЕНКО¹⁾, М. А. ЧЕРНЫШ¹⁾, Д. А. ПРЖЕВАЛЬСКАЯ¹⁾,
С. Л. УСНИЧ¹⁾, Н. Л. ПШИБЫТКО¹⁾, И. И. СМОЛИЧ¹⁾, В. В. ДЕМИДЧИК¹⁾

Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Феномные платформы – аппаратно-программные комплексы, обеспечивающие сбор и обработку информации о фенотипе растений или других организмов. В представленном исследовании дан аналитический обзор феномных платформ основных мировых изготовителей, их компонентов, характеристик и применения в биологии, сельском хозяйстве и биотехнологии. Проведено сравнение феномных установок по ключевым параметрам, выявлены

Образец цитирования:

Шашко АЮ, Бондаренко ВЮ, Черныш МА, Пржевальская ДА, Уснич СЛ, Пшибытко НЛ, Смолич ИИ, Демидчик ВВ. Современные феномные платформы и их применение в биологии растений и сельском хозяйстве. *Журнал Белорусского государственного университета. Биология*. 2020;2:15–25.
<https://doi.org/10.33581/2521-1722-2020-2-15-25>

For citation:

Shashko AY, Bandarenka VYu, Charnysh MA, Przhevalskaya DA, Usnich SL, Pshybytko NL, Smolich II, Demidchik VV. Modern phenotyping platforms and their application in plant biology and agriculture. *Journal of the Belarusian State University. Biology*. 2020;2:15–25. Russian.
<https://doi.org/10.33581/2521-1722-2020-2-15-25>

Авторы:

Антонина Юрьевна Шашко – магистрант кафедры клеточной биологии и биоинженерии растений биологического факультета; стажер младшего научного сотрудника научно-исследовательской лаборатории физиологии и биотехнологии растений. Научный руководитель – В. В. Демидчик.

Владислав Юрьевич Бондаренко – аспирант кафедры клеточной биологии и биоинженерии растений биологического факультета; младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории физиологии и биотехнологии растений. Научный руководитель – В. В. Демидчик.

Мария Александровна Черныш – аспирант кафедры клеточной биологии и биоинженерии растений биологического факультета; младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории физиологии и биотехнологии растений. Научный руководитель – В. В. Демидчик.

Дарья Андреевна Пржевальская – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории физиологии и биотехнологии растений кафедры клеточной биологии и биоинженерии растений; заведующий учебной лабораторией «Биотехнологический кластер БГУ».

Савелий Леонидович Уснич – аспирант кафедры клеточной биологии и биоинженерии растений биологического факультета; младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории физиологии и биотехнологии растений. Научный руководитель – В. В. Демидчик.

Наталья Лёггиновна Пшибытко – кандидат биологических наук; ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории физиологии и биотехнологии растений кафедры клеточной биологии и биоинженерии растений биологического факультета.

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

Вадим Викторович Демидчик – доктор биологических наук, доцент; профессор кафедры клеточной биологии и биоинженерии растений, декан биологического факультета.

Authors:

Antonina Yu. Shashko, master's degree student at the department of plant cell biology and bioengineering, faculty of biology, and probationer of junior researcher at the research laboratory of plant physiology and biotechnology.
bio.shashkoAY@bsu.by

Uladzislau Yu. Bandarenka, postgraduate student at the department of plant cell biology and bioengineering, faculty of biology, and junior researcher at the research laboratory of plant physiology and biotechnology.
bandarenkaVY@bsu.by

Maryia A. Charnysh, postgraduate student at the department of plant cell biology and bioengineering, faculty of biology, and junior researcher at the research laboratory of plant physiology and biotechnology.
chernyshmaryia@gmail.com

Darya A. Przhevalskaya, junior researcher at the research laboratory of plant physiology and biotechnology, department of plant cell biology and bioengineering, faculty of biology, and head of the training laboratory «Biotechnology Cluster of BSU».
daryaprzhevalskaya@gmail.com

Saveli L. Usnich, postgraduate student at the department of plant cell biology and bioengineering, faculty of biology, and junior researcher at the research laboratory of plant physiology and biotechnology.
usnichbio@gmail.com

Natalia L. Pshybytko, PhD (biology); leading researcher at the laboratory of plant physiology and biotechnology, department of plant cell biology and bioengineering, faculty of biology.
pshybytko@bsu.by

Igor I. Smolich, PhD (biology), docent; head of the department of plant cell biology and bioengineering, faculty of biology.
smolich@bsu.by

Vadim V. Demidchik, doctor of science (biology), docent; professor at the department of plant cell biology and bioengineering, and dean of the faculty of biology.
dzemidchik@bsu.by

тенденции развития их сенсорной и программно-аналитической составляющих. Дана оценка современного состояния мирового рынка феномных систем. Приводятся наиболее важные примеры использования феномных установок для фенотипирования в полевых и лабораторных условиях, фундаментальных и практических исследованиях в различных областях биологии растений.

Ключевые слова: феномика; фенотипирование; физиология растений; феномная платформа; рост и развитие растений; продуктивность растений; стрессоустойчивость растений.

MODERN PHENOTYPING PLATFORMS AND THEIR APPLICATION IN PLANT BIOLOGY AND AGRICULTURE

*A. Yu. SHASHKO^a, U. Yu. BANDARENKA^a, M. A. CHARNYSH^a, D. A. PRZHEVALSKAYA^a,
S. L. USNICH^a, N. L. PSHEYBYTKO^a, I. I. SMOLICH^a, V. V. DEMIDCHIK^a*

^aBelarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

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

Phenotyping platforms is hardware and software systems that provide collection and processing of information about plant or other organism phenotypes. In the presented study, an analytical review of the phenotyping platforms of the world's major manufacturers, their components, characteristics and applications in biology, agriculture and biotechnology was carried out. A comparison of the phenomics attitudes by key parameters was made, trends in the development of their sensory and program-analytical components were revealed. The assessment of the world market of phenotyping systems current state was made. The most important examples of phenomics facilities use for phenotyping in the field and laboratory conditions, fundamental and practical research in various fields of plant biology are given.

Keywords: phenomics; phenotyping; plant phenomics; phenotyping platform; plant growth and development; plant productivity; plant stress resistance.

Введение

Феномика – раздел биологии, связанный с глубоким анализом свойств фенотипа и рассматривающий вопросы его формирования в онтогенезе, а также модификацию при ответе на внешние факторы среды [1–3]. Современная феномика представляет собой омиксную дисциплину, сводящую анатомические характеристики и физиологические процессы к численно-анализируемому цифровому формату, схожему с массивами информации в геномике и протеомике [4; 5]. Важнейшим экспериментальным приемом феномики является так называемое фенотипирование – сбор и анализ данных от внешних сенсоров о размере, форме, физиолого-биохимических характеристиках организма или популяции. На основе фенотипирования выявляются закономерности формирования фенотипа и особенности фенома как совокупности фенотипов в определенных условиях среды. Работы в области феномики выполняются для всех царств живых организмов, однако наиболее активно развивается феномика растений, так как растения обладают наиболее широкой гаммой фенотипических проявлений и высокой физиологической пластичностью. Стоит отметить, что фенотип – это своего рода конечный результат любой работы в области растениеводства, питомниководства, плодоводства, садоводства, ягодоводства, культивирования водорослей и др.

В настоящее время феномика растений базируется на аппаратно-программных комплексах, создаваемых как независимыми предприятиями, так и в рамках научной работы университетов и исследовательских центров [6–8]. Такие комплексы по аналогии с геномикой носят название феномных платформ и имеют принципиальные отличия как по мощности (количество анализируемых растений и скорость анализа), так и специализации (высшие травянистые или древесные растения различных размеров, водоросли) [9; 10]. В настоящей работе представлен анализ существующих данных о феномных платформах, принципах их работы, технических характеристиках, специализации и примерах решенных научных и прикладных проблем.

Определение, устройство и принцип работы феномных платформ для анализа надземной и подземной части растения

Для автоматизированного мониторинга роста и развития растений и исследований фенотипа разработан широкий спектр феномных платформ – аппаратно-программных комплексов, обеспечивающих культивирование растений в стандартизованных условиях и их неинвазивный анализ с использованием камер и сенсоров [11–17]. В большинстве случаев феномные платформы – это установки, которые состоят

из площадки для культивирования и инсталляции исследуемого образца; измерительного оборудования; систем управления сбором, хранением и обработкой информации; программного обеспечения для управления системами и анализа фенома [12; 18]. Ключевыми параметрами систем фенотипирования растений являются пропускная способность, разрешение и размерность регистрирующей аппаратуры для последующей компьютерной обработки полученной информации, наличие или отсутствие систем глубокого анализа данных с помощью методов машинного обучения и др. [19–22].

Важнейшая задача работы феномных платформ – сбор и обработка сведений о фенотипе растения на протяжении всего жизненного цикла или определенной фазы онтогенеза (см. таблицу). В случае феномных комплексов исследуемые растения чаще всего выращиваются непосредственно внутри данных комплексов, которые входят в термостатируемые теплицы, стенды, конвейеры с вегетационными сосудами или роботизированные комплексы. Современные феномные платформы используют широкий спектр передовых технических средств сбора данных о фенотипах надземной части растения: DSLR-, мульти- и гиперспектральные камеры, VIS- и NIR-сенсоры, флуориметры, компьютерные и позитронно-эмиссионные томографы, а также ряд прорывных компьютерных технологий анализа данных [15; 23]. Подземные органы растений также представляют большой интерес для исследований в области феномных технологий. В этом случае используются установки с различной степенью автоматизации и типами регистрации изображений [24], базирующиеся на особых прозрачных корневых сосудах с почвенными, водными или гелевыми субстратами. Для изучения корневой феномики растений все чаще применяются полностью неинвазивные технологии, такие как электротомография, техника электромагнитной индукции почвы, почвенные радары, построение карты распространения корней на основе рефракции и рассеивания импульсов высокочастотных радиоволн [25].

Мировой рынок систем цифрового фенотипирования растений

Исследования, проведенные консалтинговой компанией *Markets and Markets* (Великобритания) и представленные в аналитическом отчете за 2020 г., показали, что текущий рынок базового феномного оборудования, разнообразных сенсоров для фенотипирования и программного обеспечения оценивается в 318 млн долл. США в год при прогнозируемом увеличении до 2 млрд долл. США к 2025 г. На данный момент цена высокопроизводительной платформы конвейерного типа составляет от 5 до 50 млн долл. США в зависимости от устанавливаемых датчиков и пропускной способности. Цены на стационарные платформы начинаются от 0,5 млн долл. США. Среди частных и полугосударственных производителей феномных систем можно выделить следующие крупнейшие компании: *LemnaTec* (Германия), *Photon Systems Instruments* (Чехия), *Qubit Phenomics* (дистрибьютор *Photon Systems Instruments* (PSI) в Канаде), *Phenomix* (Франция), *Phenospec* (Австралия), *Delta-T Devices Ltd.* (Великобритания), *Heinz Walz* (Германия), *WPS (We Prove Solutions)*, (Голландия), *CropDesign (Badische Anilin- & Soda-Fabrik, отделение в Бельгии)*, *Weighing, Imaging & Watering Machines (WIWAM)* (Бельгия), *Rothamsted Research* (Великобритания) и *Vienna BioCenter Core Facilities* (Австрия). На их долю приходится более 95 % всего производимого в мире феномного оборудования. Примечательно, что данные производители планируют масштабные разработки феномных платформ для работы с системами *in vitro* и *ex vitro* в ближайшее время.

Программное обеспечение для фенотипирования производится большим количеством частных компаний, исследовательских центров и отдельных специалистов в сфере информационных технологий. Наиболее подробный обзор программных продуктов и решений в области феномики приводится порталом *Plant Image Analysis*. На начало 2020 г. этим интернет-ресурсом представлены более 200 компьютерных программ и 30 баз данных для проведения феномных исследований. Корпоративные системы крупных производителей имеют собственные программные продукты с закрытым кодом. В настоящее время ведутся активные разработки систем машинного обучения (искусственных нейронных сетей) для приложений в области феномики растений, что, по ряду оценок, в ближайшее время преобразит рынок феномного программного обеспечения и определит путь дальнейших разработок в этом направлении [12; 15; 17]. Прогнозируется, что программы на базе технологий искусственных нейронных сетей со временем заменят классические системы анализа изображений [12]. Тем не менее пока готовых коммерческих продуктов на основе систем машинного обучения на рынке не представлено.

Основные разработчики и производители феномных платформ

В настоящее время на мировом рынке феномного оборудования представлено большое количество компаний-производителей. Их работа сосредоточена на решении как фундаментальных, так и прикладных задач биологии растений, а также выпуске различных продуктов: от одиночных датчиков и сенсоров до крупномасштабных модульных систем [26–28]. Лидирующие позиции занимают компании *LemnaTec*, *PSI* и дочерние предприятия, однако многие другие платформы также пользуются спросом среди научных центров, фермерских и лесных хозяйств, питомников декоративных растений.

Компании – производители оборудования для фенотипирования растений и характеристики основных феномных систем
Manufacturers of equipment for plant phenotyping and characteristics of the main phenotyping systems

Производитель оборудования, основные платформы	Используемое аналитическое оборудование	Объект исследования	Измеряемые параметры
LemmaTec (Германия): <i>ImageAlxpert</i> <i>PhenoAlxpert</i> <i>HyperAlxpert</i> <i>SeedAlxpert</i> <i>PhenoTron</i> <i>Scanalyzer Field</i>	RGB-камеры, гиперспектральные, термальные, флуоресцентные камеры и камеры, работающие в ближней инфракрасной области спектра; лазерные 3D-сканеры	Растения различных форм и размеров, их популяции, плоды, семена; грибы, нематоды, личинки культуры водорослей	Скорость роста, показатели накопления биомассы и продуктивности; морфология семян, структура надземной части и корневой системы; биофизические характеристики фотосинтеза; показатели водного статуса; температура поверхности листа; поражение патогенными микроорганизмами и насекомыми; архитектура корня
Photon systems instruments (Чехия): <i>PlantScreen Modular System</i> <i>PlantScreen Robotic XYZ Systems</i> <i>PlantScreen Compact Systems</i> <i>PlantScreen Self Contained Systems</i>	RGB-камеры, гиперспектральные, термальные, флуоресцентные камеры и камеры ближней инфракрасной области спектра; лазерные 3D-сканеры	Небольшие травянистые растения, модельные виды, злаковые культуры	Темпы роста, показатели накопления биомассы и продуктивности; структура кроны, морфология семян, архитектура корневой системы; биофизические характеристики фотосинтеза; показатели водного статуса; температура поверхности листа, присутствие микроорганизмов и насекомых
Optimadlog (Франция): <i>Phenopsis</i>	RGB-камеры и камеры, работающие в ближней инфракрасной области спектра	Небольшие растения в условиях закрытого грунта	Скорость роста, показатели накопления биомассы и продуктивности; архитектура побега и корня, показатели водного статуса
CropDesign (Бельгия): <i>TraitMill</i>	RGB-камеры и камеры, работающие в ближней инфракрасной области спектра; лазерные 3D-сканеры	Злаковые культуры	Показатели накопления биомассы и продуктивности, скорость роста; архитектура побега и корня, показатели водного статуса; морфология семян, структура надземных органов и корневой системы
Phenoscope (Франция): <i>Phenoscope</i>	RGB-камеры и камеры, работающие в ближней инфракрасной области спектра	Травянистые растения от небольших до крупных размеров	Темпы роста, показатели накопления биомассы и продуктивности; архитектура побега и корня, водный статус
SMO (Бельгия): <i>ITWAM XY</i> <i>ITWAM Line</i> <i>ITWAM Conveyor</i>	RGB-камеры, гиперспектральные камеры и камеры, работающие в ближней инфракрасной области спектра	Травянистые растения от небольших до крупных размеров	Скорость роста, показатели накопления биомассы и продуктивности; архитектура побега и корня, показатели водного статуса; параметры фотосинтеза
Phenospect (Нидерланды): <i>DroughtSpotter</i> <i>MicroScan</i> <i>FieldScan</i> <i>FieldScale</i> <i>TraitFinder</i>	RGB-камеры, флуоресцентные, термальные камеры и камеры, работающие в ближней инфракрасной области спектра; лазерные 3D-сканеры	Травянистые растения различных размеров, популяции растений	Скорость роста, показатели накопления биомассы и продуктивности; морфология семян, архитектура надземной части и корневой системы; биофизические характеристики фотосинтеза; показатели водного статуса; температура поверхности листа; поражение патогенными микроорганизмами и насекомыми

LemnaTec (Ахен, Германия) – компания, которая является мировым лидером по цифровому фенотипированию и тестированию растений и семян. Ранние разработки систем *LemnaTec* были направлены на создание подвижных конвейерных установок, в которых емкости с субстратом и растущими в них растениями передвигались для фенотипирования в затемненные боксы с камерами, сканерами и сенсорами. Первые национальные центры исследования феномики растений (в Германии, Австралии, Великобритании и США) были созданы на базе таких систем. В дальнейшем было показано, что перемещение сосудов с растениями приводит к значительному (до 20–25 %) снижению скорости роста тестируемых растений [1]. В результате началась активная разработка и внедрение стационарных систем фенотипирования. В настоящее время *LemnaTec* выпускает широкий спектр аппаратуры для закрытых лабораторных помещений, теплиц, открытых опытных площадок и полевых условий передвижного и стационарного типов, а также участвует в производстве систем аэрофеномики.

Основой линейки продуктов *LemnaTec* являются платформы номенклатуры *Alxpert*, функционирование которых поддерживается при помощи камер и сенсоров собственного производства и программного обеспечения *LemnaLauncher*, базирующегося на подходах компьютерного зрения, модульной автоматизации и статистической обработки данных. *LemnaTec* также развивает новую платформу *PhenoTron*, в которой используются системы полного контроля среды и комплекс интегрированных камер.

PSI (Драсов, Чехия) – эта компания была основана как производитель высокоточных сенсоров и камер для анализа роста и физиологических характеристик растений. С 2010 г. она производит линейку устройств для фенотипирования от источников освещения и RGB-камеры до собственных высокопроизводительных феномных платформ, включая роботизированные манипуляторы, фото-биореакторы и модульные контейнерные системы для открытых площадок. В последние годы компания достигла уровня *LemnaTec* по количеству продаваемых систем и стала вторым лидером в области феномики растений в мире. Крупнейший североамериканский разработчик и продавец феномных систем *Qubit Phenomics* (Канада) недавно стал частью *PSI* и ее официальным дилером в Северной Америке. *PSI* была первой компанией, внедрившей в феномные комплексы системы получения изображений флуоресценции хлорофилла – камеры *FluorCam*, которые используют систему амплитудно-импульсной модуляции светового потока (PAM) для измерения параметров флуоресценции хлорофилла. Основные универсальные платформы – *PlantScreen Phenotyping*, *PlantScreen Robotic XYZ* и *PlantScreen Field*.

CropDesign (Невеле, Бельгия) – биотехнологическая компания, разрабатывающая технологические платформы для анализа проявления генетических признаков на уровне фенотипа в целях получения новых сортов кукурузы, риса и других сельскохозяйственных растений. Компания производит платформы серии *TraitMill*, сочетающие в себе автоматизированные смарт-теплицы, предназначенные для глубокого высокопроизводительного фенотипирования различных видов растений, с современными технологиями автоматического сбора данных и передовыми статистическими, биоинформационными, компьютерными подходами [29]. С помощью *TraitMill* проводится широкий спектр феномных работ по производству трансгенных растений [30].

Optimalog (Тур, Франция) – компания, специализирующаяся на производстве промышленных компьютеров и программного обеспечения для фенотипирования, а также с 2003 г. выпускающая феномную платформу *Phenopsis*, используемую в научных центрах Франции. Эта платформа представляет собой сложную интегрированную систему культивирования растений небольшого размера в автоматическом режиме при поддержании заданных условий среды и полива (до нескольких сотен тестируемых растений). Система автоматически производит рутинное взвешивание культивационных сосудов, а также фенотипирование в VIS- и NIR-диапазонах [31]. Компания ведет политику открытости данных и публикует все свои исследования в онлайн-режиме на сайте bioweb.supagro.inra.fr/phenopsis/.

Phenoscope (Версаль, Франция) – компания, которая разрабатывает феномные платформы в целях мониторинга сотен индивидуальных культивационных сосудов с небольшими растениями в режиме реального времени и анализа морфологических показателей большого количества растений различных генетических линий [9]. Система внедрена главным образом во Франции.

WTWAM (Экло, Бельгия) – название серии феномных роботизированных систем, производимых компанией *SMO* и Фламандским институтом биотехнологии (Гент, Бельгия). Феномные установки имеют системы контроля внешних условий среды, капельный полив растений по заданной схеме, а также аппаратуру для автоматического получения изображений в различных спектральных диапазонах. Система позволяет производить визуализации различных параметров роста растений в онлайн-режиме.

PhenospeX (Херлен, Нидерланды) – относительно новая биотехнологическая компания, занимающаяся созданием умных датчиков для анализа роста растений в режиме реального времени. Разработки данной фирмы применяются в области растениеводства, селекции и сельского хозяйства. Основная цель компании – создание полностью автоматизированных тепличных и полевых платформ для изучения тысяч растений одновременно.

Лабораторные феномные платформы

Изучение растительных организмов в стандартизированных лабораторных условиях является важнейшим разделом современной феномики растений. Использование систем различного размера с полнотой контролируемых условиями среды позволяет создать идеальную модель для изучения влияния биотических и абиотических факторов и их комбинаций на растения.

ImageAlxpert (*LemnaTec*) – компактная платформа типа «система – бокс» с низкой пропускной способностью, ручной установкой растений, обладающая гибкостью программной реализации и высокой точностью данных. Комплект включает в себя несколько основных элементов и опций: 1) фиксированные камеры в различных диапазонах съемки и сенсоры; 2) ручную установку растений (растения в культивационных сосудах или лотках, семена или плоды в чашках Петри или многоячеечных платах, водоросли в пробирках или стаканах); 3) программное обеспечение для изучения скорости роста, набора биомассы, изменения архитектуры растения; 4) специальное программное обеспечение для контроля процесса получения изображений, экспорта и обработки данных. Система была успешно использована для целого ряда фундаментальных и прикладных исследований. Например, детально изучена динамика фенотипических ответов C_4 -растений на дефицит азота и засуху [32]; найдена группа генов, контролирующая геометрию листа пасленовых [33]; описана эффективность функционирования фотосистемы II арабидопсиса и кукурузы [34] и др.

PhenoAlxpert (разработана на базе *Scanalyzer HTS, LemnaTec*) – система высокоинформативного роботизированного скрининга и фенотипирования небольших растений. Выпускается в трех конфигурациях: стандартная *PhenoAlxpert* – для мелких объектов; *PhenoAlxpert Pro* – для более крупных, например культурных злаковых растений; *PhenoAlxpert Root* – для изучения корневой системы (включает в себя высокотехнологичные ризотроны). Все платформы имеют шесть автоматизированных вариантов работы роботизированных систем и несут до пяти возможных типов сенсоров. Благодаря такой вариативности система обладает возможностью установки различных экспериментальных сосудов – от чашек Петри, многоячеечных плат и лотков до цветочных горшков, а также специализируется на исследованиях не только растений, но и грибов, насекомых, мелких водных и наземных животных, например нематод и личинок комаров. Она обладает возможностью исследования влияния светового цикла, движения объектов, а также анализа живых клеток с использованием программного обеспечения *Lemna Launcher*. К одним из наиболее значимых исследований с применением версий данной системы можно отнести выявление механизма поддержания покоя зерен пшеницы под действием гиббереллинов [35].

HyperAlxpert (разработана на базе *Phenocenter, LemnaTec*) – лабораторная мультисенсорная феномная платформа на основе крупных конвейеров, способная исследовать до тысячи растений. Конвейеры оборудуются боксами для фотосъемки, количество сенсоров в которых может достигать шести, в числе которых, например, лазерный сканер, флуоресцентные камеры и NIR-камеры. Основная функция – получение высокоточных данных для «расшифровки» феномов растений. Данная платформа является основой в большинстве феномных центров мира и упоминается в наибольшем количестве статей по феномике растений [11–13]. С использованием этой платформы, например, проведено глубокое исследование механизмов поддержания водного потенциала листа злаков [36], а также создана уникальная технология оценки эффективности фотосинтеза различных видов растений [37].

SeedAlxpert (*LemnaTec*) – модульная система для анализа показателей прорастания и всхожести семян в автоматическом режиме. Комплекс приспособлен для оценки как простейших морфологических параметров семян (размеры, форма, окраска, длина корня и гипокотили), так и более сложных и комплексных (количество проросших семян, скорость прорастания, гомогенность, наличие или отсутствие болезней, посторонних объектов).

PhenoTron (*LemnaTec*) – комбинированная платформа, объединяющая ростовую камеру и бокс фенотипирования. Она сочетает в себе возможности регистрации и обработки феномных данных с преимуществами полного климат-контроля и отсутствия передвижения объектов исследования. Система предназначена для изучения небольших растений, семян, отдельных листовых пластинок, плодов, корней, а также рясок и насекомых. Ключевой элемент – камера роста – поддерживает стабильные условия с температурой от 15 до 40 °C (± 3 °C), оснащена 16 независимыми группами LED-источников освещения с длинами волн от 350 до 850 нм и цифровой RGB-камерой, что позволяет регистрировать такие параметры, как количество элементов, их размер, морфологию и цветные особенности.

PlantScreen Modular System (*PSI*) – система, которая является флагманом линейки платформ *PSI* и обладает наибольшей производительностью. Это модульная конвейерная скрининговая установка, позволяющая контролировать множество характеристик роста и развития растений, реакции на биотические и абиотические стрессоры. Система включает фототермографическое оборудование, аппаратуру для 3D-реконструкции, гиперспектральной съемки, NIR-имиджинга, морфометрического анализа и RGB-

анализа, визуализации флуоресценции хлорофилла, а также аппаратуру для взвешивания и полива растений. Возможности *PlantScreen Modular System* позволили впервые обнаружить и детально описать динамику изменения флуоресценции хлорофилла в листьях арабидопсиса в ответ на дефицит влаги [7].

PlantScreen Robotic XYZ Systems – стационарная система *PSI*, представляющая большой интерес для исследователей. Она включает в себя все типы доступных сенсоров и камер и способна высокоточно перемещаться в 3D-режиме в пределах объемной площадки размерами $4,5 \times 4,5 \times 4,0$ м в стандартном исполнении. Система позволяет производить детальное изучение растений на площадке, находящихся в любых емкостях и имеющих разнообразные геометрические параметры в пределах сканируемого объема. Эта система является модульной и может адаптироваться под конкретные цели. Примером ее использования являются работы по выявлению особенностей объемного распределения листьев в розетках у растений арабидопсиса в зависимости от стрессовых условий [38], а также по установлению взаимосвязей между засолением, флуоресценцией хлорофилла и продуктивностью нескольких сортов латука посевного [39].

PlantScreen Compact Systems (PSI) – интегрированная роботизированная платформа для мелко- и среднемасштабного фенотипирования небольших растений, например арабидопсиса, клубники, сои, табака, при помощи широкого арсенала сенсоров (RGB-, NIR-, термо-, гиперспектральных камер, 3D-сканеров). Растения культивируются в открытых индивидуальных сосудах, *in vitro* или в многоячеечных кассетах. Системы снабжены функцией управления условиями среды: интенсивностью и качеством света, температурой, влажностью и др.

PlantScreen Self Contained Systems (PSI) – компактный автономный и автоматизированный комплекс, разработанный для изучения одиночных растений высотой не более 50 см, выращиваемых в почве или *in vitro*. Горшок вручную помещается в светоизолированный феномный бокс с полностью контролируемыми условиями, где проводится автоматический сбор и анализ данных с одного или нескольких перечисленных выше сенсоров *PSI* через заданные пользователем интервалы времени.

PlantEye F500 – основной продукт компании *PhenospeX*. Представляет собой четырехканальный мультиспектральный 3D-сканер высокого разрешения (400–900 нм), адаптированный для фенотипирования растений. *PlantEye* объединяет в себе подходы 3D-моделирования и спектрального имиджинга, что позволяет автоматически рассчитывать спектр морфологических параметров растений, таких как высота растения, площадь листовой поверхности, биомасса, глубина проникновения света и др., и визуализировать полученную информацию в виде трехмерного облака точек. Сканер используется во всех платформах компании – лабораторных и тепличных комплексах *MicroScan* и *TraitFinder*, системе *DroughtSpotter* – для изучения влияния засухи на одиночных растениях, а также крупных полевых комплексах *FieldScan* и *FieldScale*, представляющих собой рельсовую платформу изучения растений в естественных условиях обитания и высокопроизводительный прецизионный комплекс измерения скорости транспирации соответственно. Все платформы *PhenospeX* оснащены также специализированным программным обеспечением *HortControl*, позволяющим модулировать схему эксперимента, контролировать условия среды, а также визуализировать и анализировать феномные данные с датчиков и сенсоров.

WIWAM XY (WIWAM) – комплекс лабораторного фенотипирования, основная функция которого состоит в изучении физиологических процессов у растений арабидопсиса, других мелких растений или саженцев в уже существующей ростовой камере. Система является модульной и высокоточной, включает роботизированный манипулятор, системы взвешивания и полива. Для неинвазивного имиджинга может быть использован широкий спектр сенсоров, подбор которых осуществляется исходя из целей конкретного исследования. Использование этой платформы продемонстрировало, что более высокая выживаемость растений арабидопсиса в условиях сильной засухи по сравнению с умеренной связана с постоянной активацией влагосберегающих механизмов, таких как закрытие устьиц, однако темпы роста выше у растений при умеренной засухе [40].

WIWAM Line – платформа, которую производит компания *SMO* для высокопроизводительного фенотипирования небольших стеблевых растений. Комплекс включает в себя несколько линий для позиционирования культивационных сосудов, базовый робот-портал и станцию для полива и взвешивания экспериментальных образцов. Изображения регистрируются под разными углами.

WIWAM Conveyor – роботизированное решение для фенотипирования крупных растений, таких как кукуруза, в тепличных условиях. Комплекс состоит из транспортной системы, объединяющей растения с несколькими станциями взвешивания и полива и феномными боксами, несущими ряд неинвазивных имидж-сенсоров.

Phenoscope – станции взвешивания и полива платформ, позволяющие контролировать и регулировать количество воды и питательных веществ в соответствии со сценарием, заданным пользователем и определенным для каждого горшка в отдельности, а станции имиджинга предназначены для неинвазивного

фенотипирования в VIS- и IR-диапазонах. Наиболее значимым исследованием, проведенным при помощи платформы *Phenoscope* [41], является разработка метода генотипической дифференциации растений *Arabidopsis thaliana* посредством сегментации и отслеживания ростовых движений листьев.

Системы полевой феномики

В последнее десятилетие технологии высокопроизводительного полевого фенотипирования (ВППФ) значительно расширили возможности по мониторингу и количественной оценке полевых экспериментов и питомниководства. Преимущества этих технологий в том, что они не только заменяют утомительные и субъективные процедуры оценки более быстрыми и дешевыми методами, но и раскрывают потенциал новых фенотипов, представляющих интерес как для изучения их физиологической основы, так и практического использования.

Достижения ВППФ предоставили качественно новую возможность для синхронизированного отслеживания роста и развития большого количества растений в течение всего онтогенеза с высоким пространственным и временным разрешением, ранее недоступным [42]. Объединение этих данных с информацией об окружающей среде и ее динамике позволяет оценивать специфические для отдельного генотипа нормы реакции и фенотипическую пластичность, тем самым улучшая понимание взаимодействия между генотипом, окружающей средой и агротехническими мероприятиями [43; 44]. Далее будут рассмотрены возможности основных современных платформ для ВППФ.

В настоящее время на наиболее распространенных полевых платформах используются наземные колесные или воздушные транспортные средства, в которых применяются датчики нескольких типов для измерения характеристик растений в масштабе времени, составляющем несколько секунд на участок [45].

Scanalyzer Field (LemnaTec) – комплекс оборудования для фенотипирования в полевых условиях, предназначенный для автоматического сбора данных о росте, морфологии и физиологическом состоянии растений. Основа комплекса представлена рельсовой системой шириной до 15 м, по которой передвигается арочная конструкция с уникальным роботизированным манипулятором, фиксирующим и перемещающим к тестируемым растениям сенсорную головку. Сенсорная часть включает в себя RGB-датчик для цветового и морфологического анализа, термальную камеру для анализа работы устьичного аппарата и содержания воды, мультиспектральную камеру для повышения информативности анализа физиологического состояния, флуориметр для измерения интенсивности флуоресценции хлорофилла, системы лазерного сканирования для 3D-реконструкции растений в поле, датчики для анализа содержания азота, диоксида углерода, температуры, освещенности, ветра, количества осадков и др.

По сравнению с феномным оборудованием для закрытых помещений наружные измерительные системы приспособлены к изменчивым параметрам окружающей среды. Метеоданные могут быть получены с помощью интернета; анализируя их, *Scanalyzer Field* может самостоятельно защититься от неблагоприятных погодных условий. Существует два возможных варианта сборки системы *Scanalyzer Field*. Для вытянутых полей на ровных площадках имеется крановая система в виде буквы П, устанавливаемая на рельсы. С ее помощью могут исследоваться несколько сотен квадратных метров поля. Другой вариант сборки – так называемый полевой портал, который представляет собой стойку с мостом на монорельсовой платформе. Головка с сенсорами крепится с помощью подвижного кронштейна, чтобы иметь возможность опуститься для боковой съемки. Полевой портал подходит для применения практически в любых условиях и на различных размерах поля. Обе конструкции *Scanalyzer Field* являются настраиваемыми и позволяют производить фенотипирование зерновых культур, небольших деревьев и других растений высотой до 10 м в поле или специализированных контейнерах. Широкие возможности данных систем обеспечили им активное применение в исследованиях физиологии полевых культур. Так, они использовались при изучении ключевых стадий развития пшеницы – цветения и колошения [46], в исследованиях архитектуры побегов, развития стрессовых реакций, а также для выявления закономерностей формирования фенотипа у растений с известным генотипом и системами регуляции процессов дыхания и фотосинтеза [47; 48].

Полевая система **PlantScreen Field** компании *PSI* схожа с аналогом компании *LemnaTec*. Она имеет такие же сенсорные приборы, однако, по ряду оценок, данная система у *PSI* отличается лучшим качеством изображений флуоресцентных имиджей, а также стандартизацией регистрации измерений флуоресценции хлорофилла. Изобретение компании *PSI* также имеет схожую с *LemnaTec* систему серверов различного уровня, высокоэффективную систему контроля процессов систематизации и аннотации данных, радиомаркирования и т. д. Данные, полученные этой платформой [49], позволили детально описать механизм холодоустойчивости гороха.

FieldScan (Phenospec) – платформа высокопроизводительного фенотипирования в полевых условиях, функционирующая в режиме 24/7 с пропускной способностью до 5 тыс. растений в час. Центральным элементом платформы является уникальный многокомпонентный кран мостового типа, так называемое

устройство – носитель датчиков (*sensor carrier device*, SCD), обеспечивающее перемещение сенсоров, датчиков, системы полива и другого оборудования, расположенного над растениями. Такая конструкция позволяет SCD не затенять растения и проводить измерения со следующими характеристиками: ширина полосы сканирования – до 50 м, длина – до 500 м, скорость движения SCD – до 15 м/мин, скорость сканирования – 3 м/мин. Для увеличения пропускной способности оборудования может быть использовано несколько сканеров, установленных параллельно. Для исключения погрешности из-за различий в микроклимате на различных участках поля (например, так называемые краевые эффекты) *Phenospec FieldScan* снабжена целой системой сенсоров для измерения температуры и относительной влажности воздуха, фотосинтетически активной радиации, скорости и направления ветра, количества осадков.

Аэрофеномика

Активно развивающимся в последние годы подходом для быстрого и неразрушающего фенотипирования с высокой пропускной способностью является использование платформ дистанционного зондирования на базе беспилотных летательных аппаратов – аэрофеномики. Такие аппараты оснащаются различными сенсорами и системами стабилизации фотосъемки [50]. Беспилотные летательные аппараты становятся доступным и эффективным инструментом феномики сельскохозяйственных и лесных культур благодаря снижению стоимости и постоянно увеличивающейся гибкости в комплектации и удобстве управления [51; 52].

Беспилотники могут использоваться для выполнения автономных задач с применением оборудования радиуправления и системы автоматического управления, которые можно разделить на несколько типов в зависимости от режима полета [53]. В качестве сенсоров обычно используются цифровые и мультиспектральные камеры, гиперспектральные датчики, инфракрасные тепловизоры, а также системы обнаружения и измерения освещенности (LIDAR). Это позволяет изучить как геометрические характеристики (высота растений, форма и размеры отдельных органов), так и физиологические (биомасса, качественный и количественный пигментный состав, показатели фотосинтеза, дыхания и транспирации, урожайность), а также индикаторы стресса (устычная проводимость, динамика температуры растительного покрова, водный потенциал листа) и др. [54].

С помощью платформ дистанционного зондирования на базе беспилотных летательных аппаратов произведено несколько десятков исследовательских работ за последние 3 года [55–57]. Чаще всего исследовались злаковые культуры с помощью цифровых и термальных камер. Стоит отметить наиболее важные исследования динамики фенотипа твердой пшеницы под действием водного дефицита и засухи [58], влияния азотного питания на урожайность гибридов ячменя [59], сезонной динамики площади листьев у различных линий сорго [60]. Широкий интерес вызывают также разработки феномной модели динамики продуктивности сорго [61] и анализ стрессового ответа черного тополя [62].

Заключение

Проведенный анализ данных показал, что в настоящее время в мире существует широкий спектр феномных платформ, которые производятся десятками компаниями и научными центрами. Наиболее широко представлены феномные платформы компаний *LemnaTec* и *PSI*, которыми развиты конвейерные и стационарные системы, такие как *Phenocenter* и *PlantScreen Robotic XYZ Systems*. В последние годы широкое применение нашли модульные и компактные системы, которые используются для оценки морфологических и физиологических параметров семян в небольших выборках, фенотипирования растений средних размеров в сосудах *in vitro* или в открытых кассетах. Активно развивается также направление полевой феномики на сельскохозяйственных угодьях, садовых, парковых и лесных площадках как с помощью стационарных конструкций, так и с использованием беспилотных летательных аппаратов (аэрофеномика). В системы специализированного программного обеспечения все чаще внедряются новые компьютерные технологии, такие как машинное обучение, которые обеспечивают повышение точности измерений и эффективности многофакторных фенотипических анализов.

Библиографические ссылки / 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. Yang W, Feng H, Zhang X, Zhang J, Doonan JH, Batchelor WD, et al. Crop phenomics and high-throughput phenotyping: past decades, current challenges and future perspectives. *Molecular Plant*. 2020;13:187–214. DOI: 10.1016/j.molp.2020.01.008.
3. Demidchik VV, Shashko AYU, Bondarenko VYu, Smolikova GN, Przheval'skaya DA, Chernysh MA, et al. *Fenomika rastenii: fundamental'nye osnovy, programmno-apparatnye platformy i metody mashinnogo obucheniya* [Plant phenomics: fundamental principles, software and hardware platforms and machine learning methods.]. *Fiziologiya rastenii*. 2020;67(3):227–245. DOI: 10.31857/S0015330320030069.

4. Zhou J, Tardieu F, Pridmore T, Doonan JH, Reynolds D, Hall N, et al. Plant phenomics: history, present status and challenges. *Journal of Nanjing Agricultural University*. 2018;41(4):580–588. DOI: 10.7685/jnau.201805100.
5. Tardieu F, Cabrera-Bosquet L, Pridmore T, Bennett M. Plant phenomics, from sensors to knowledge. *Current Biology*. 2017;27(15):R770–R783. DOI: 10.1016/j.cub.2017.05.055.
6. 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.
7. Mishra KB, Mishra A, Klem K, Govindjee G. Plant phenotyping: a perspective. *Indian Journal of Plant Physiology*. 2016;21(4):514–527. DOI: 10.1007/s40502-016-0271-y.
8. Golbach F, Kootstra G, Damjanovic S, Otten G, van de Zedde R. Validation of plant part measurements using a 3D reconstruction method suitable for high-throughput seedling phenotyping. *Machine Vision and Applications*. 2016;27:663–680. DOI: 10.1007/s00138-015-0727-5.
9. Tisne S, Serrand Y, Bach L, Gilbault E, Ben Ameer R, Balasse H, et al. Phenoscope: an automated large-scale phenotyping platform offering high spatial homogeneity. *Plant Journal*. 2013;74(3):534–544. DOI: 10.1111/tpj.12131.
10. Kikkawa M, Fujita S, Matsuo T, Ishiura M. High-throughput phenotyping of *Chlamydomonas* swimming mutants based on nanoscale video analysis. *Biophysical Journal*. 2014;107(2):336–345. DOI: 10.1016/j.bpj.2014.05.033.
11. Li L, Zhang Q, Huang D. A review of imaging techniques for plant phenotyping. *Sensors*. 2014;14(11):20078–20111. DOI: 10.3390/s141120078.
12. Singh A, Ganapathysubramanian B, Sarkar S. Machine learning for high-throughput stress phenotyping in plants. *Trends in Plant Science*. 2016;21:110–124. DOI: 10.1016/j.tplants.2015.10.015.
13. Berry JC, Fahlgren N, Pokorny AA, Bart RS, Velez KM. An automated, high-throughput method for standardizing image color profiles to improve image-based plant phenotyping. *PeerJ*. 2018;6:1–12. DOI: 10.7717/peerj.5727.
14. Perez-Sanz F, Navarro PJ, Egea-Cortines M. Plant phenomics: an overview of image acquisition technologies and image data analysis algorithms. *Gigascience*. 2017;6(11):1–18. DOI: 10.1093/gigascience/gix092.
15. Zhang J, Naik HS, Assefa T, Sarkar S, Chowda Reddy RV, Singh A, et al. Computer vision and machine learning for robust phenotyping in genome-wide studies. *Scientific Reports*. 2017;7:1–11. DOI: 10.1038/srep44048.
16. Czedik-Eysenberg A, Seitner S, Guldener U, Koemeda S, Jez J, Colombini M. The «PhenoBox», a flexible, automated, open-source plant phenotyping solution. *The New Phytologist*. 2018;219(2):808–823. DOI: 10.1111/nph.15129.
17. Ghosal S, Blystone D, Singh AK, Ganapathysubramanian B, Sarkar S. An explainable deep machine vision framework for plant stress phenotyping. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. 2018;115:4613–4618. DOI: 10.1073/pnas.1716999115.
18. Rouphael Y, Spichal L, Panzarova K, Casa R, Colla G. High-throughput plant phenotyping for developing novel biostimulants: from lab to field or from field to lab? *Frontiers in Plant Science*. 2018;9:1–6. DOI: 10.3389/fpls.2018.02297.
19. Dhondt S, Wuyts N, Inze D. Cell to whole-plant phenotyping: the best is yet to come. *Trends in Plant Science*. 2013;18(8):428–439. DOI: 10.1016/j.tplants.2013.04.008.
20. Granier C, Vile D. Phenotyping and beyond: modeling the relationships between traits. *Current Opinion in Plant Biology*. 2014;18:96–102. DOI: 10.1016/j.pbi.2014.02.009.
21. Ghanem ME, Marrou H, Sinclair TR. Physiological phenotyping of plants for crop improvement. *Trends in Plant Science*. 2015;20(3):139–144. DOI: 10.1016/j.tplants.2014.11.006.
22. Fahlgren N, Gehan MA, Baxter I. Lights, camera, action: high-throughput plant phenotyping is ready for a close-up. *Current Opinion in Plant Biology*. 2015;24:93–99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2015.02.006>.
23. Roitsch T, Cabrera-Bosquet L, Fournier A, Ghamkhar K, Jimenez-Berni J, Pinto F. Review: new sensors and data-driven approaches – a path to next generation phenomics. *Plant Science*. 2019;282:2–10. DOI: 10.1016/j.plantsci.2019.01.011.
24. Pound MP, Atkinson JA, Townsend AJ, Wilson MH, Griffiths M, Jackson AS. Erratum to: Deep machine learning provides state-of-the-art performance in image-based plant phenotyping. *Gigascience*. 2018;7(7):1–9. DOI: 10.1093/gigascience/giy042.
25. Finkel E. With «phenomics» plant scientists hope to shift breeding into overdrive. *Science*. 2009;325:380–381. DOI: 10.1126/science.325_380.
26. Humplik JF, Lazar D, Husickova A, Spichal L. Automated phenotyping of plant shoots using imaging methods for analysis of plant stress responses – a review. *Plant Methods*. 2015;11:1–10. DOI: 10.1186/s13007-015-0072-8.
27. Pratar A, Tomar R, Kumar J. High-throughput plant phenotyping platforms. In: *Phenomics in crop plants: trends, options and limitations*. New Delhi: Springer; 2015. DOI: 10.1007/978-81-322-2226-2_19.
28. Fiorani F, Schurr U. Future scenarios for plant phenotyping. *Annual Review of Plant Biology*. 2013;64:267–291. DOI: 10.1146/annurev-arplant-050312-12013.
29. Reuzeau C. TraitMill (TM): a high throughput functional genomics platform for the phenotypic analysis of cereals. *In Vitro Cellular & Developmental Biology*. 2007;43:1–8.
30. Reuzeau C, Pen J, Frankard V, de Wolf J, Peerbolte R, Broekaert W, et al. TraitMill: a discovery engine for identifying yield-enhancement genes in cereals. *Plant Gene and Trait*. 2010;1(1). DOI: 10.5376/pgt.2010.01.0001.
31. Fabre J, Dauzat M, Negre V, Granier C. Phenopsis DB: an information system for *Arabidopsis thaliana* phenotypic data in an environmental context. *BMC Plant Biology*. 2011;11:1–7. DOI: 10.1186/1471-2229-11-77.
32. Neilson EH, Edwards AM, Blomstedt CK, Berger B, Lindberg Moller B, Gleadow RM. Utilization of a high-throughput shoot imaging system to examine the dynamic phenotypic responses of a C4 cereal crop plant to nitrogen and water deficiency over time. *Journal of Experimental Botany*. 2015;66(7):1817–1832. DOI: 10.1093/jxb/eru526.
33. Coneva V, Frank MH, de Luis Balaguer MA, Li M, Sozzani R, Chitwood DH. Genetic architecture and molecular networks underlying leaf thickness in desert-adapted tomato *Solanum pennellii*. *Plant Physiology*. 2017;175(1):376–391. DOI: 10.1104/pp.17.00790.
34. Tschiersch H, Junker A, Meyer RC, Altman T. Establishment of integrated protocols for automated high throughput kinetic chlorophyll fluorescence analyses. *Plant Methods*. 2017;13:1–16. DOI: 10.1186/s13007-017-0204-4.
35. Van De Velde K, Chandler PM, Van Der Straeten D, Rohde A. Differential coupling of gibberellin responses by Rht-B1c suppressor alleles and Rht-B1b in wheat highlights a unique role for the DELLA N-terminus in dormancy. *Journal of Experimental Botany*. 2017;68(3):443–455. DOI: 10.1093/jxb/erw471.
36. 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.

37. Cabrera-Bosquet L, Fournier C, Brichet N, Welcker C, Suard B, Tardieu F. High-throughput estimation of incident light, light interception and radiation-use efficiency of thousands of plants in a phenotyping platform. *New Phytologist*. 2016;212:269–282. DOI: 10.1111/nph.14027.
38. De Diego N, Furst T, Humplik JF, Ugena L, Podlesakova K, Spichal L. An automated method for high-throughput screening of *Arabidopsis* rosette growth in multi-well plates and its validation in stress conditions. *Frontiers in Plant Science*. 2017;8:1702. DOI: 10.3389/fpls.2017.01702.
39. Adhikari ND, Simko I, Mou B. Phenomic and physiological analysis of salinity effects on lettuce. *Sensors*. 2019;19(21):1–25. DOI: 10.3390/s19214814.
40. Skirycz A, Vandenbroucke K, Clauw P, Maleux K, De Meyer B, Dhondt S, et al. Survival and growth of *Arabidopsis* plants given limited water are not equal. *Nature Biotechnology*. 2011;29(3):212–214. DOI: 10.1038/nbt.1800.
41. Viaud G, Loudet O, Cournede PH. Leaf segmentation and tracking in *Arabidopsis thaliana* combined to an organ-scale plant model for genotypic differentiation. *Frontiers in Plant Science*. 2017;7:1–14. DOI: 10.3389/fpls.2016.02057.
42. Perich G, Hund A, Anderegg J, Roth L, Boer MP, Walter A, et al. Assessment of multi-image unmanned aerial vehicle based high-throughput field phenotyping of canopy temperature. *Frontiers in Plant Science*. 2020;11:1–17. DOI: 10.3389/fpls.2020.00150.
43. Bukowiecki J, Rose T, Ehlers R, Kage H. High-throughput prediction of whole season green area index in winter wheat with an airborne multispectral sensor. *Frontiers in Plant Science*. 2020;10:1–14. DOI: 10.3389/fpls.2019.01798.
44. Prey L, Hu Y, Schmidhalter U. High-throughput field phenotyping traits of grain yield formation and nitrogen use efficiency: optimizing the selection of vegetation indices and growth stages. *Frontiers in Plant Science*. 2019;10:1–20. DOI: 10.3389/fpls.2019.01672.
45. Zhang C, Kovacs JM. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precision Agriculture*. 2012;13:693–712. DOI: 10.1007/s11119-012-9274-5.
46. Sadeghi-Tehran P, Sabermanesh K, Virlet N, Hawkesford MJ. Automated method to determine two critical growth stages of wheat: heading and flowering. *Frontiers in Plant Science*. 2017;8:1–14. DOI: 10.3389/fpls.2017.00252.
47. Virlet N, Sabermanesh K, Sadeghi-Tehran P, Hawkesford M. Field Scanalyzer: an automated robotic field phenotyping platform for detailed crop monitoring. *Functional Plant Biology*. 2016;44(1):143–153. DOI: 10.1071/FP16163.
48. Cendrero-Mateo MP, Muller O, Albrecht H, Burkart A, Gatzke S, Janssen B, et al. Field phenotyping: challenges and opportunities. In: Chabbi A, Loescher HW, editors. *Terrestrial ecosystem research infrastructures*. Boca Raton: CRC Press; 2017. DOI: 10.1201/9781315368252-4.
49. Humplik JF, Lazar D, Furst T, Husickova A, Hybl M, Spichal L. Automated integrative high-throughput phenotyping of plant shoots: a case study of the cold-tolerance of pea (*Pisum sativum* L.). *Plant Methods*. 2015;11:1–11. DOI: 10.1186/s13007-015-0063-9.
50. Yang G, Liu J, Zhao C, Li Z, Huang Y, Yu H, et al. Unmanned aerial vehicle remote sensing for field-based crop phenotyping: current status and perspectives. *Frontiers in Plant Science*. 2017;8:1–26. DOI: 10.3389/fpls.2017.01111.
51. Ballesteros R, Ortega JF, Hernandez D, Moreno MA. Applications of georeferenced high-resolution images obtained with unmanned aerial vehicles. Part I: Description of image acquisition and processing. *Precision Agriculture*. 2014;15(6):579–592. DOI: 10.1007/s11119-014-9355-8.
52. Candiago S, Remondino F, De Gligio M, Dubbini M, Gattelli M. Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images. *Remote Sensing*. 2015;7(4):4026–4047. DOI: 10.3390/rs70404026.
53. Sankaran S, Khot LR, Espinoza CZ, Jarolmasjed S, Sathuvalli VR, Vandemark GJ, et al. Low-altitude, high-resolution aerial imaging systems for row and field crop phenotyping: a review. *European Journal of Agronomy*. 2015;70:112–123. DOI: 10.1016/j.eja.2015.07.004.
54. 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.
55. Cobb JN, Declerck G, Greenberg A, Clarck R, McCouch S. Next-generation phenotyping: requirements and strategies for enhancing our understanding of genotype-phenotype relationships and its relevance to crop improvement. *Theoretical and Applied Genetics*. 2013;126(4):867–887. DOI: 10.1007/s00122-013-2066-0.
56. Kirchgessner N, Liebisch F, Yu K, Pfeifer J, Friedli M, Hund A. The ETH field phenotyping platform FIP: a cable-suspended multi-sensor system. *Functional Plant Biology*. 2016;44(4):154–168. DOI: 10.1071/F.P.16165.
57. Gevaert C, Suomalainen J, Tang J, Kooistra L. Generation of spectral-temporal response surfaces by combining multispectral satellite and hyperspectral UAV imagery for precision agriculture applications. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2015;1(6):1–9. DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2406339.
58. Kyratzis AC, Skarlatos DP, Menexes GC, Vamvakousis VF, Katsiotis A. Assessment of vegetation indices derived by UAV imagery for durum wheat phenotyping under a water limited and heat stressed mediterranean environment. *Frontiers in Plant Science*. 2017;8:1–14. DOI: 10.3389/fpls.2017.01114.
59. Kefauver SC, Vicente R, Vergara-Diaz O, Fernandez-Gallego JA, Kerfal S, Lopez A, et al. Comparative UAV and field phenotyping to assess yield and nitrogen use efficiency in hybrid and conventional barley. *Frontiers in Plant Science*. 2017;8:1–15. DOI: 10.3389/fpls.2017.01733.
60. Potgieter AB, George-Jaeggli B, Chapman SC, Laws K, Suarez Cadavid LA, Wixted J, et al. Multi-spectral imaging from an unmanned aerial vehicle enables the assessment of seasonal leaf area dynamics of sorghum breeding lines. *Frontiers in Plant Science*. 2017;8:1–11. DOI: 10.3389/fpls.2017.01532.
61. Watanabe K, Guo W, Arai K, Takanashi H, Kajiya-Kanegae H, Kobayashi M, et al. High-throughput phenotyping of sorghum plant height using an unmanned aerial vehicle and its application to genomic prediction modeling. *Frontiers in Plant Science*. 2017;8:1–11. DOI: 10.3389/fpls.2017.00421.
62. Ludovisi R, Tauro F, Salvati R, Khoury S, Scarascia GM, Harfouche A. UAV-based thermal imaging for high-throughput field phenotyping of black poplar response to drought. *Frontiers in Plant Science*. 2017;8:1–18. DOI: 10.3389/fpls.2017.01681.

Статья поступила в редакцию 08.05.2020.
Received by editorial board 08.05.2020.