

ФЕНОМИКА – ПОСТГЕНОМНАЯ НАУКА В АГРОЭКОЛОГИИ

В. Н. КИПЕНЬ¹⁾, М. М. ПАТРИН²⁾, М. А. СИТНИКОВ³⁾

¹⁾Институт генетики и цитологии, Национальная академия наук Беларуси,
ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Беларусь,

²⁾Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Ленинские горы, 1, 119234, г. Москва, Россия

³⁾ООО «Феномика», 143420,
поселок Архангельское, 2Б, гор. округ Красногорск, Московская обл., Россия

Высокопроизводительное цифровое фенотипирование (феномика) представляет собой революционное направление в современной физиологии растений, находящееся на стыке физиологии, генетики, информационных технологий и агроэкологии. Данная методология позволяет осуществлять комплексный анализ фенотипических характеристик растительных организмов с беспрецедентной точностью и объективностью, что делает её незаменимым инструментом в современных биологических исследованиях. Интеграция феномики с передовыми технологическими решениями, включая мультиспектральный анализ, гиперспектральную съемку и искусственный интеллект, открывает новые перспективы для изучения механизмов развития растений и их взаимодействия с окружающей средой. Особое значение приобретает применение феномических подходов в решении актуальных задач агроэкологии, направленных на повышение продуктивности сельскохозяйственных культур и создание стрессоустойчивых сортов растений. Современные феномические исследования способствуют оптимизации использования биологических ресурсов и разработке инновационных методов селекции, что имеет первостепенное значение для обеспечения продовольственной безопасности и устойчивого развития аграрного сектора. Внедрение цифровых технологий фенотипирования позволяет существенно ускорить процесс создания новых сортов растений с улучшенными характеристиками, включая повышенную урожайность, устойчивость к неблагоприятным факторам среды и оптимальное использование ресурсов. Таким образом, феномика выступает фундаментальной основой для развития современной агробиотехнологии, объединяя достижения различных научных дисциплин и обеспечивая комплексный подход к решению ключевых задач растениеводства в условиях глобальных экологических вызовов.

Ключевые слова: высокопроизводительное цифровое фенотипирование; феномика; агроэкология; мультиспектральный анализатор; гиперспектральный анализатор; нейронные сети; большие данные; искусственный интеллект; селекция растений.

Образец цитирования:

Кипень ВН, Патрин ММ, Ситников МА. Феномика – постгеномная наука в агроэкологии. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2025;4:69–82.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-4-69-82>

For citation:

Kipen VN, Patrin MM, Sitnikov MA. Phenomics – postgenomic science in agroecology. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2025;4:69–82. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-4-69-82>

Авторы:

Вячеслав Николаевич Кипень – кандидат биологических наук, доцент; ведущий научный сотрудник лаборатории прикладной геномики.

Максим Михайлович Патрин – научный сотрудник, кафедры биофизики, биологический факультет.

Максим Александрович Ситников – технический специалист по приложениям цифрового фенотипирования.

Authors:

Viachaslau N. Kipen, PhD (biology), docent; leading researcher of the laboratory of applied genomics.

v.kipen@igc.by

Maksim M. Patrin, researcher of the department of biophysics, faculty of biology.

patmaksim@yandex.ru

Maksim A. Sitnikov, technical specialist for digital phenotyping applications.

projects@phenomics.ru

PHENOMICS – POSTGENOMIC SCIENCE IN AGROECOLOGY

V. N. KIPEN^a, M. M. PATRIN^b, M. A. SITNIKOV^c

^a*Institute of Genetics and Cytology, National Academy of Sciences of Belarus
27 Akademičnaja Street, Minsk 220072, Belarus*

^b*M. V. Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory, Moscow 119234, Russia*

^c*LLC «Phenomics»,*

2B village Arkhangelskoye 143420, Krasnogorsk urban district, Moscow region, Russia

Corresponding author: V. N. Kipen (v.kipen@igc.by)

High-throughput digital phenotyping (phenomics) is a revolutionary approach in modern plant physiology, located at the intersection of physiology, genetics, information technology, and agroecology. This methodology enables a comprehensive analysis of the phenotypic characteristics of plants with unprecedented accuracy and objectivity, making it an indispensable tool in modern biological research. The integration of phenomics with advanced technological solutions, including multispectral analysis, hyperspectral imaging, and artificial intelligence, opens new perspectives for studying the mechanisms of plant development and their interactions with the environment. The application of phenomic approaches is particularly important in addressing pressing agroecological challenges aimed at increasing crop productivity and developing stress-resistant plant varieties. Modern phenomic research contributes to the optimization of biological resource use and the development of innovative breeding methods, which is of paramount importance for ensuring food security and sustainable development of the agricultural sector. The introduction of digital phenotyping technologies significantly accelerates the development of new plant varieties with improved characteristics, including increased yield, resistance to adverse environmental factors, and optimal resource utilization. Thus, phenomics serves as a fundamental basis for the development of modern agrobiotechnology, integrating the achievements of various scientific disciplines and providing a comprehensive approach to addressing key plant production challenges in the face of global environmental challenges.

Keywords: high-performance digital phenotyping; phenomics, agroecology; multispectral analyzer; hyperspectral analyzer; neural networks; big data, artificial intelligence; plant breeding.

Введение

Агроэкология (Agroecology) представляет собой комплексную научную дисциплину, изучающую взаимодействие сельскохозяйственных систем с окружающей средой и разрабатывающую методы рационального природопользования в аграрном производстве. Данная наука находится на стыке экологии, агрономии, почвоведения, биологии и других естественных наук, что определяет ее междисциплинарный характер. В центре внимания агроэкологии находятся процессы функционирования агроэкосистем, их структура, динамика и устойчивость. Особое внимание уделяется исследованию биогеохимических циклов, потокам энергии и вещества в сельскохозяйственных ландшафтах, а также оценке влияния антропогенных факторов на состояние агроэкосистем. Методологическая база агроэкологии включает как традиционные полевые и лабораторные исследования, так и современные методы мониторинга, математического моделирования и системного анализа с использованием высокопроизводительного цифрового фенотипирования.

Высокопроизводительное цифровое фенотипирование растений (High-Throughput Plant Phenotyping) – это современное научное направление на стыке физиологии, генетики, биоинформатики и информационных технологий, которое занимается изучением фенома – набора фенотипических черт растения и норм реакций его систем.

Феномика (Phenomics) исследует закономерности формирования и изменения фенотипа растений в процессе их роста и развития, а также реакции на различные факторы внешней среды. Особое внимание уделяется изучению морфологических характеристик, физиологических процессов и адаптационных механизмов растений. В основе феномики лежит фенотипирование – комплекс методов автоматизированного анализа растений с помощью современных технологий: цифровых камер, систем компьютерного зрения, гиперспектральной съемки и искусственного интеллекта.

Анализ публикационной активности в PubMed NCBI по ключевым словосочетаниям «феномика растения (plant phenomics)» и «гиперспектральный [анализ] для растений (hyperspectral for plants)» выявил тенденцию к экспоненциальному росту опубликованных исследований за последние 10 лет (рис. 1). Данный факт свидетельствует о стремительном вовлечении технологии мульти- и гиперспектрального анализа в феномные исследования растений [1].

Феномика растений представляет собой современную научную дисциплину, которая возникла на стыке различных областей знаний и является естественным продолжением развития генетических

исследований. Будучи постгеномной наукой, она фокусируется на изучении фенотипа – совокупности всех характеристик и признаков живого организма. В основе феномики лежит понимание того, что геном растения не определяет его свойства в полной мере. Реальные характеристики проявляются только через взаимодействие генотипа с окружающей средой, что и формирует фенотип. Именно поэтому феномика занимается комплексным изучением того, как генетическая информация реализуется в конкретных признаках растения.

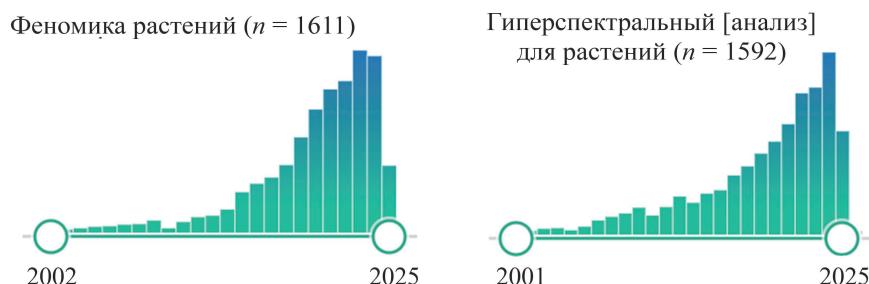


Рис. 1. Количество опубликованных научных статей в базе данных PubMed NCBI; plant phenomics – феномика растений; hyperspectral for plants – гиперспектральный [анализ] для растений

Fig. 1. Number of published scientific articles in the PubMed NCBI database; plant phenomics; hyperspectral for plants

Биоинформатические технологии играют ключевую роль в развитии феномики. Современные методы обработки больших данных (big data), алгоритмы машинного обучения (machine learning) и искусственного интеллекта (artificial intelligence) позволяют анализировать огромные массивы информации, получаемые при изучении растений – данные о морфологии, физиологии, биохимии и других аспектах растительного организма. Использование достижений биоинформатики позволяет феномике решать сложные задачи, которые были недоступны традиционным методам исследования. Например, возможно одновременно отслеживать тысячи параметров развития растения, анализировать их взаимосвязи и выявлять закономерности, которые невозможно обнаружить при визуальном наблюдении. Это позволяет не только лучше понимать фундаментальные процессы жизнедеятельности растительных организмов, но и находить практические решения в области селекции, защиты растений и оптимизации условий их выращивания.

Высокопроизводительное цифровое фенотипирование растений в агроэкологии позволяет проводить комплексную оценку состояния агроэкосистем и разрабатывать научно обоснованные рекомендации по их оптимизации. Практическая значимость агроэкологии заключается в разработке экологически безопасных технологий возделывания сельскохозяйственных культур, методов сохранения и воспроизводства плодородия почв, способов снижения негативного воздействия сельскохозяйственной деятельности на окружающую среду. Современная агроэкология активно развивается в направлении создания адаптивно-ландшафтных систем земледелия, внедрения принципов органического сельского хозяйства и разработки методов точного земледелия. Особое внимание уделяется вопросам сохранения биоразнообразия, защиты почв от эрозии и деградации, рационального использования водных ресурсов и минимизации эмиссии парниковых газов в агропромышленном комплексе. Таким образом, агроэкология выступает фундаментальной основой для развития устойчивого сельского хозяйства, обеспечивая баланс между экономической эффективностью производства и сохранением природных ресурсов для будущих поколений.

В современной агроэкологии цифровое фенотипирование активно используется для мониторинга роста и развития растений в полевых условиях. Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и наземных роботизированных систем позволяет осуществлять регулярный сбор данных о морфологических и физиологических параметрах растительных популяций. Особую значимость метод приобретает при проведении селекционных исследований. Высокопроизводительное фенотипирование обеспечивает точную оценку таких количественных признаков растений, как биомасса, площадь листьев, архитектура побега и продуктивность. Это позволяет значительно ускорить процесс создания новых сортов с улучшенными характеристиками. В области экологического мониторинга цифровое фенотипирование применяется для оценки реакции растений на различные стрессовые факторы окружающей среды. С помощью мультиспектральной и гиперспектральной визуализации исследователи получают данные о состоянии растений при воздействии засухи, засоления, температурных аномалий и других неблагоприятных условий. Современные технологии фенотипирования также активно используются при изучении взаимодействия растений с почвенной микрофлорой и другими компонентами агроэкосистемы. Интеграция данных дистанционного зондирования с информацией о генетическом полиморфизме позволяет выявлять адаптивные признаки и механизмы устойчивости растений к абиотическим и биотическим стрессам.

Такой междисциплинарный подход значительно ускоряет процесс получения новых знаний и способствует развитию инновационных технологий в агроэкологии. Благодаря этому становится возможным создание более устойчивых и продуктивных сортов растений, а также формирование действенных механизмов для целенаправленного регулирования их развития. Совместное использование данных феномного и геномного анализа позволяет решать ряд задач: изучение физических и биохимических признаков растений, анализ фенотипической пластичности, селекция и улучшение сортов, оптимизация условий выращивания, разработка методов защиты растений от стрессовых факторов и др. Феномика включает в себя несколько ключевых направлений (рис. 2):

- структурная феномика – изучает количество, содержание и взаимодействие элементов организма;
- функциональная феномика – исследует особенности реакций систем организма;
- сравнительная феномика – оценивает биологическую и эволюционную близость организмов.

Структурная и функциональная феномика, в первую очередь, практикоориентированы, в то время как сравнительная феномика довлечет к фундаментальным знаниям. Все направления феномики связаны между собой, а задачи и цели для них зачастую пересекаются [2].

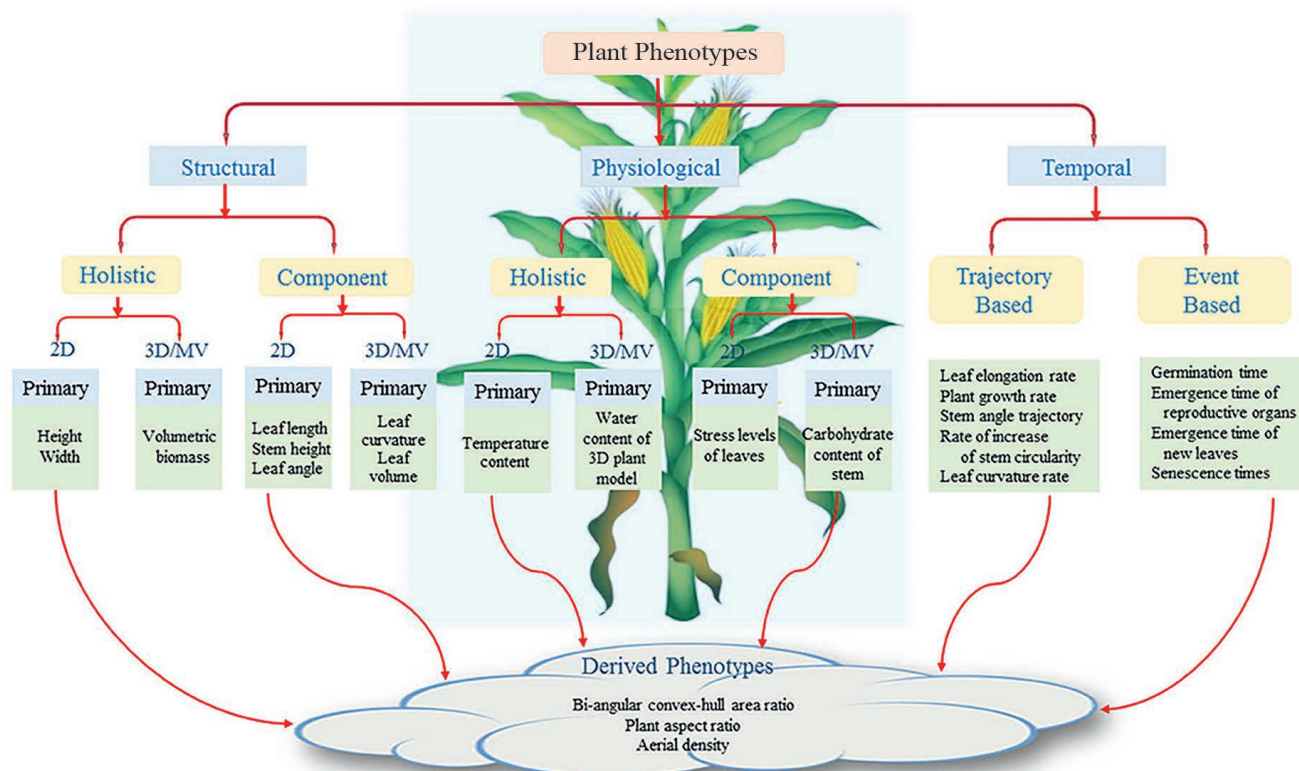


Рис. 2. Основные направления в феномных исследованиях растений (адаптировано из [3])

Fig. 2. Main directions in plant phenomic research (adapted from [3])

Структурная феномика – это раздел феномики, в котором задается определение количественных и качественных характеристик элементов растительного организма, а также изучаются направленности их взаимодействия.

Основные задачи структурной феномики: определение количества структурных элементов растения; анализ содержания компонентов в различных частях растения; изучение взаимодействия между элементами растительной модели; оценка пространственной организации растительных систем.

К ключевым параметрам исследования растений в рамках структурной феномики относятся:

- морфологические характеристики (форма и размеры органов – геометрия листьев, параметры стеблей, характеристики корневой системы, размеры цветков и плодов; количественные показатели – число листьев, количество корней, плотность трихом, число плодов);
- параметры роста и развития (динамика развития – скорость роста органов, сроки наступления фаз развития, продолжительность этапов онтогенеза; пространственная организация – угол наклона побегов, расположение листьев, структура ветвления, архитектура корневой системы);
- характеристики биомассы (масса органов – общая биомасса растения, масса отдельных органов, соотношение надземной и подземной частей; объемные показатели – объем корневой системы, объем листовой поверхности, плотность расположения органов);

– микроструктурные параметры (клеточный уровень – размер клеток, плотность тканей, структура эпидермы; тканевые характеристики – распределение тканей, толщина слоев, особенности строения);
– качественные характеристики (морфологические признаки – тип опушения, характер жилкования, структура поверхности; визуальные параметры – окраска органов, степень развития, характер повреждений);
– параметры продуктивности (урожайные характеристики – масса семян, количество плодов, размер зерен; показатели качества – содержание полезных веществ, структура урожая, однородность плодов).

Структурная феномика позволяет решать такие важные прикладные задачи, как оценка морфологических характеристик растений, анализ структурных изменений при стрессовых воздействиях, создание цифровых моделей растительных организмов.

Оценка морфологических характеристик растений представляет собой комплексное исследование, направленное на изучение внешних форм и структур растительных организмов [4–9]. Это фундаментальное направление в ботанике, которое позволяет получить полное представление о строении и развитии растений. В процессе оценки исследуются различные аспекты растительного организма: от таких общих характеристик, как жизненная форма и продолжительность жизни, до мельчайших деталей строения отдельных органов. Особое внимание уделяется анализу корневой системы, стеблей, листьев и репродуктивных органов. При проведении оценки учитываются как качественные, так и количественные показатели. К качественным характеристикам относятся тип опушения, характер жилкования, форма листьев и цветков, количественные показатели включают размеры органов, плотность их расположения и общее количество частей растения. Результаты оценки морфологических характеристик используются при селекционной работе для создания новых сортов растений, в систематике – для классификации видов, в экологическом мониторинге – для оценки состояния популяций, а также при контроле качества посадочного материала. Важно отметить, что оценка морфологических характеристик позволяет не только описать текущее состояние растения, но и проследить его развитие как в индивидуальном (онтогенез), так и в эволюционно-историческом (филогенез) аспекте.

Анализ структурных изменений у растений при стрессовых воздействиях представляет собой комплексное исследование того, как растения реагируют на неблагоприятные факторы окружающей среды на клеточном и тканевом уровнях [6; 10–18]. При воздействии стресса в растительном организме происходят значительные структурные перестройки. В первую очередь страдает мембранная система клеток: нарушается целостность мембран, изменяется их проницаемость, что приводит к нарушению клеточного гомеостаза. Эти изменения сопровождаются перестройкой липидного состава и белкового комплекса мембран. На уровне целого растения структурные изменения проявляются в нарушении роста и развития – деформация органов, изменение размеров клеток, нарушение процессов деления и дифференциации тканей. При длительном стрессе возможно отмирание отдельных частей растения. Важно отметить, что реакция растений на стресс носит двухсторонний характер: с одной стороны, происходит повреждение структур, с другой – активируются защитные механизмы, направленные на восстановление повреждений. При этом у устойчивых растений все системы регуляции работают согласованно, что позволяет им сохранять жизнеспособность в неблагоприятных условиях. Изучение структурных изменений при стрессе помогает понять механизмы адаптации растений и разработать методы повышения их устойчивости к неблагоприятным факторам среды.

Создание цифровых моделей растительных организмов с использованием феномики представляет собой передовой метод исследования растений, основанный на преобразовании реальных биологических объектов в их виртуальные аналоги [19]. В основе этого процесса лежит комплексное использование различных датчиков и сенсоров, которые собирают информацию о растении в режиме реального времени. Современные технологии позволяют создавать как двумерные, так и трехмерные модели растений, причем последние дают более полную картину благодаря сохранению всех пространственных характеристик оригинала (рис. 3).

Процесс моделирования начинается со сбора первичных данных с помощью различных сенсоров. Полученные изображения проходят предварительную обработку, включающую улучшение качества, фильтрацию шумов и коррекцию искажений. На следующем этапе происходит построение модели растения, на основе которой измеряются и анализируются различные параметры. Особое значение в создании цифровых моделей имеет использование методов машинного обучения и искусственного интеллекта. Современные алгоритмы способны не только точно воспроизводить внешний вид растения, но и анализировать его внутренние характеристики, включая структуру корневой системы, состояние тканей и процессы роста. Цифровые модели позволяют отслеживать развитие растений в динамике, прогнозировать их рост и реакцию на различные условия окружающей среды. Важным преимуществом такого подхода является возможность получения объективных и точных данных без субъективной оценки исследователя. Цифровые модели помогают анализировать множество параметров одновременно, включая размеры органов, форму листьев, углы наклона, объемы тканей и другие характеристики.

Использование структурной феномики в научных исследованиях дает следующие преимущества: высокая точность измерений, объективность получаемых данных (минимизация влияния человеческого фактора), возможность автоматизации процессов анализа, стандартизация условий исследования, возможность обработки больших массивов данных.

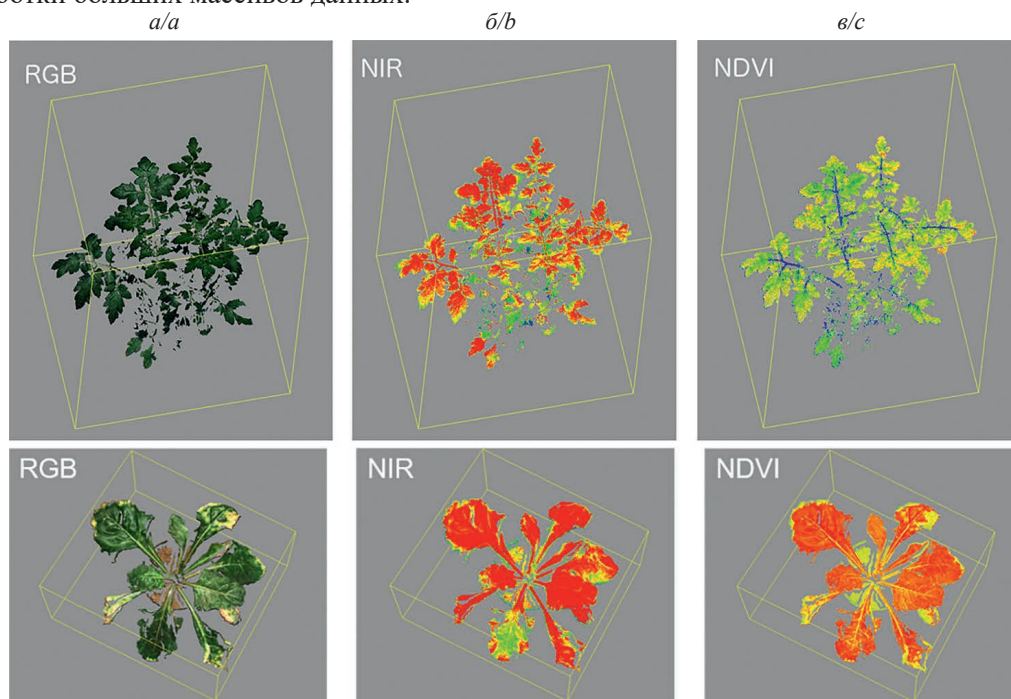


Рис. 3. 3D модель растений, построенная с использованием мультиспектрального сканера PlantEye F600 (Phenospex, Нидерланды): а) RGB (Red, Green, Blue) – аддитивная цветовая модель на основании трех спектров красный, зеленый, синий; б) NIR (Near-Infrared) – ближний инфракрасный спектральный диапазон; в) NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – нормализованный относительный индекс растительности

Fig. 3. 3D model of plants constructed using the PlantEye F600 multispectral scanner (Phenospex, Netherlands): а) RGB (Red, Green, Blue) is an additive color model based on three spectra: red, green, and blue; б) NIR (Near-Infrared) is a near-infrared spectral range; в) NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) is a normalized relative vegetation index

Функциональная феномика – это направление в изучении растений, которое фокусируется на исследовании особенностей реакций растительных систем организма на различные воздействия внешней среды.

Основные задачи функциональной феномики: изучение физиологических реакций растений, анализ адаптационных механизмов, оценка стрессоустойчивости, исследование фотосинтетической активности, мониторинг водного обмена.

К ключевым параметрам исследования растений в рамках функциональной феномики относятся:

- фотосинтетическая активность (показатели фотосинтеза – интенсивность флуоресценции хлорофилла, эффективность использования света, скорость фотосинтетического процесса, содержание фотосинтетических пигментов; биохимические маркеры – концентрация хлорофилла, активность ферментов, содержание углеводов);

- водный режим (параметры транспирации – интенсивность испарения, устьичная проводимость, водный потенциал, скорость потери воды; показатели водного статуса – насыщение тканей водой, содержание влаги, распределение воды в тканях);

- метаболическая активность (энергетический обмен – скорость дыхания, производство АТФ, энергетический баланс; биосинтетические процессы – синтез белков, накопление липидов, образование углеводов);

- стрессовые реакции (абиотические факторы – реакция на засуху, ответ на засоление, адаптация к температурным стрессам; биотические факторы – устойчивость к патогенам, реакция на вредителей, иммунный ответ);

- регуляторные процессы (гормональная регуляция – баланс фитогормонов, регуляция роста, контроль развития; сигнальные пути – передача сигналов стресса, регуляция фотосинтеза, контроль роста);

- продукционный процесс (показатели эффективности – чистая продуктивность фотосинтеза, коэффициент использования света, продуктивность транспирации; параметры формирования урожая – накопление биомассы, формирование плодов, развитие семян);

– физиологические индикаторы (температурный режим – температура поверхности, теплоотдача, терморегуляция; газообмен – интенсивность дыхания, обмен CO_2 , поглощение O_2).

Функциональная феномика имеет важное практическое применение в селекции растений (отбор устойчивых форм), агротехнологии (оптимизация условий выращивания), защите растений (раннее выявление стрессовых состояний), биотехнологии (создание новых форм растений), экологическом мониторинге (оценка состояния растительных популяций).

Функциональная феномика в селекции растений представляет собой современный высокотехнологичный подход к отбору наиболее устойчивых форм растений, основанный на комплексном автоматизированном анализе их фенотипических характеристик. Этот метод позволяет объективно оценивать реакцию растений на различные стрессовые факторы, включая засуху, болезни и вредителей [6; 10–18; 20]. Благодаря применению искусственного интеллекта и алгоритмов машинного обучения возможно создавать цифровые модели растений и прогнозировать их развитие в различных условиях, что позволяет значительно ускорить процесс создания новых сортов с заданными характеристиками устойчивости, минимизировать влияние человеческого фактора и оптимизировать использование ресурсов при селекции. Такой подход к селекции помогает не только выявлять растения с желаемыми характеристиками на ранних стадиях развития, но и формировать популяции с повышенной устойчивостью к различным неблагоприятным факторам среды, что особенно важно для современного сельского хозяйства.

Функциональная феномика в агротехнологиях представляет собой инновационный подход к оптимизации условий выращивания сельскохозяйственных культур, основанный на непрерывном мониторинге и анализе их физиологического состояния [21]. Этот метод позволяет в режиме реального времени отслеживать реакцию растений на различные факторы окружающей среды и корректировать условия их выращивания для достижения максимальной продуктивности. В процессе оптимизации условий выращивания происходит измерение таких показателей, как интенсивность фотосинтеза, водный статус растений, содержание пигментов, скорость роста и развития. Используя системы компьютерного зрения, гиперспектральную съемку и датчики различных параметров, исследователи получают детальную информацию о состоянии каждой культуры и могут своевременно вносить необходимые коррективы в агротехнические мероприятия. Применение функциональной феномики позволяет создавать оптимальные условия для роста растений путем точной настройки режимов полива, освещения, температуры и питания. Благодаря анализу больших данных и машинному обучению системы могут прогнозировать потребности растений в ресурсах и автоматически регулировать параметры среды, что значительно повышает эффективность использования воды, удобрений и энергии. Такой подход к оптимизации выращивания культур не только увеличивает урожайность и качество продукции, но и способствует рациональному использованию природных ресурсов, снижению негативного воздействия на окружающую среду и формированию более устойчивых агроэкосистем. Интеграция функциональной феномики в агротехнологии открывает новые возможности для развития точного земледелия и создания интеллектуальных систем управления сельскохозяйственными культурами.

Функциональная феномика в защите растений представляет собой передовой метод раннего обнаружения стрессовых состояний растений, основанный на непрерывном мониторинге их физиологических показателей [22; 23]. Этот подход позволяет выявлять начальные признаки заболеваний и стрессовых реакций задолго до появления видимых симптомов, что существенно повышает эффективность защитных мероприятий. В основе метода лежит комплексное фенотипирование растений, включающее измерение флуоресценции хлорофилла, температурного режима, содержания пигментов и других биохимических показателей. Особое значение имеет способность феномических систем выявлять патологические изменения на клеточном уровне, что позволяет оперативно реагировать на появление болезней и вредителей. Например, изменения в флуоресценции хлорофилла могут свидетельствовать о начале развития заболевания еще до того, как появятся видимые признаки поражения. Применение функциональной феномики в защите растений позволяет не только своевременно диагностировать проблемы, но и прогнозировать их развитие, что дает возможность применять защитные меры точно и целенаправленно. Это существенно снижает затраты на пестициды и другие средства защиты, минимизирует негативное воздействие на окружающую среду и повышает экологическую безопасность сельскохозяйственного производства. Интеграция феномических технологий в системы защиты растений открывает новые перспективы для развития точного земледелия и создания интеллектуальных систем управления фитосанитарным состоянием посевов.

Функциональная феномика в биотехнологии позволяет исследователям детально изучать реакции растительных систем на различные воздействия и выявлять наиболее перспективные линии для дальнейшей модификации [24]. Благодаря интеграции феномики с методами клеточной инженерии и геной модификации можно целенаправленно создавать растения с заданными свойствами, например, разрабатывать культуры с повышенной устойчивостью к стрессовым факторам, улучшенными показателями продуктивности или особыми биохимическими характеристиками [25]. Применение функциональной

феномики в биотехнологии позволяет значительно ускорить процесс создания новых форм растений за счет автоматизированного анализа больших массивов данных и использования алгоритмов машинного обучения. Это дает возможность прогнозировать развитие растений и отбирать наиболее перспективные образцы для дальнейших исследований. Такой подход открывает новые перспективы для развития биотехнологии растений, позволяя создавать культуры с улучшенными характеристиками и адаптивными способностями, что особенно важно в условиях меняющегося климата и растущих требований к сельскохозяйственной продукции.

Сравнительная феномика – это направление в изучении растений, которое занимается оценкой биологической и эволюционной близости различных растительных организмов.

Основные задачи сравнительной феномики: оценка эволюционной близости растительных видов; изучение адаптационных особенностей; сравнительный анализ фенотипических характеристик; выявление общих и отличительных черт в развитии растений.

К ключевым параметрам исследования растений в рамках сравнительной феномики относятся:

- морфолого-анатомические параметры (структурные особенности – форма и размеры органов, анатомическое строение, тканевая организация, особенности развития; морфологические признаки – тип роста, характер ветвления, структура листа, особенности цветка);
- экологические характеристики (адаптационные признаки – устойчивость к стрессам, экологическая пластичность, приспособительные механизмы, сезонная динамика; экологические особенности – требования к среде, конкурентная способность, взаимодействие с симбионтами, реакция на антропогенные факторы);
- продукционные показатели (урожайные характеристики – продуктивность, качество продукции, стабильность урожая; биометрические параметры – биомасса, урожайность, выход товарной продукции);
- эволюционные характеристики (филогенетические маркеры – эволюционная близость, конвергентные признаки, адаптивная радиация; онтогенетические особенности – развитие, рост, созревание, продолжительность жизни).

Инструментальные методы исследования в феномике представляют собой комплекс современных высокотехнологичных подходов к изучению фенотипа растений. В основе феномных исследований лежат передовые технологии получения и анализа изображений, включая цифровую фотографию в видимом спектре, которая позволяет оценивать форму, размеры и динамику роста растений. Особое место занимает флуоресцентная съемка, помогающая выявлять патологические состояния и изучать процессы фотосинтеза. Для получения полной картины состояния растений применяются мульти- и гиперспектральные методы, позволяющие измерять пространственно-временные показатели роста, оценивать биомассу и фотосинтетическую активность (рис. 4).

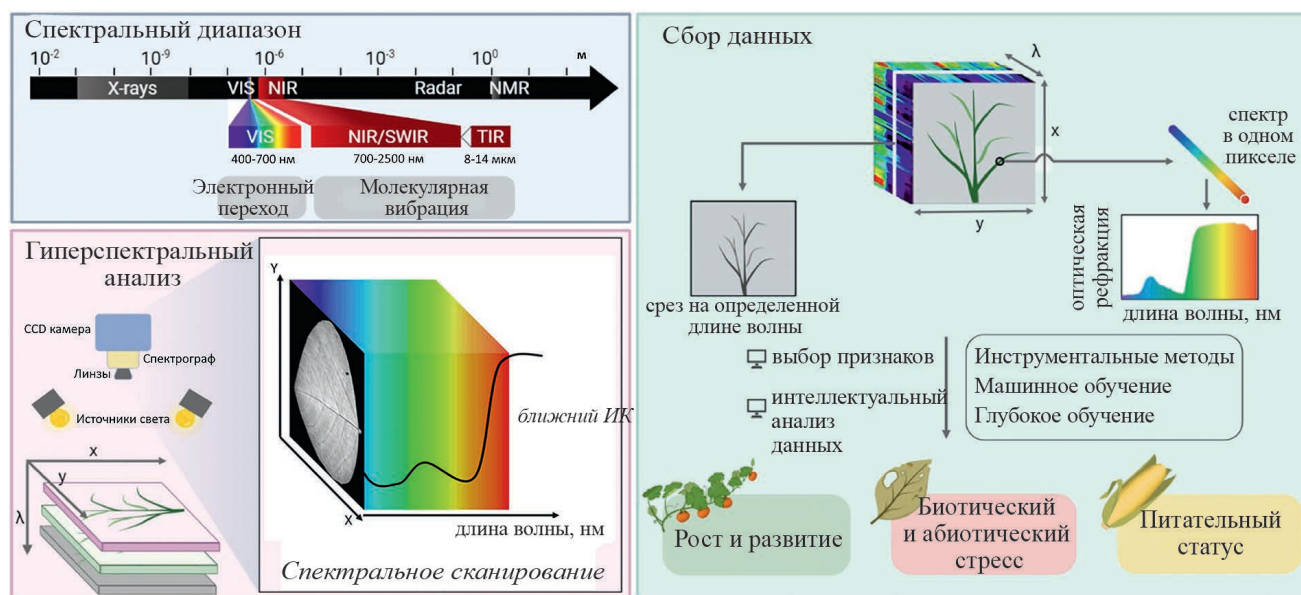


Рис. 4. Принцип гиперспектрального анализа (адаптировано из [26]): разделение света происходит через специальные призмы, которые раскладывают падающий свет на спектр; регистрация данных осуществляется с помощью высокочувствительных детекторов, фиксирующих интенсивность излучения в каждом спектральном диапазоне. Формирование изображения происходит путем объединения множества узкополосных снимков в единый трехмерный массив данных

Fig. 4. Principle of hyperspectral analysis (adapted from [26]): light is separated through special prisms, which disperse the incident light into a spectrum; data is recorded using highly sensitive detectors that record the radiation intensity in each spectral range. Image formation occurs by combining multiple narrowband images into a single three-dimensional data array

Тепловизионная диагностика дает информацию о температурном режиме растений и процессах испарения воды. Современные методы феномики включают также томографические исследования (компьютерную, магнитно-резонансную и позитронно-эмиссионную томографию), которые позволяют неинвазивно изучать как видимые, так и скрытые структуры организма. 3D-сканирование и лазерная съемка помогают создавать объемные модели растений (см. рис. 3).

Информационные технологии в феномике играют важную роль – алгоритмы компьютерного зрения и методы машинного обучения позволяют обрабатывать огромные массивы данных, получаемых при исследованиях. Это дает возможность проводить точный анализ фенотипических характеристик, выявлять закономерности развития и реакции организмов на различные воздействия среды.

Нейронные сети в феномике растений представляют собой современный подход к автоматизированному анализу биологических объектов, основанный на методах машинного обучения. Нейронная сеть базируется на больших наборах данных (big data), формируя иерархию признаков и отсеивая несущественные детали.

Принцип работы сверточной нейронной сети (convolutional neural network, CNN), наиболее часто используемой в феномных исследованиях, основан на последовательной обработке данных через несколько взаимосвязанных слоев (рис. 5). В начале процесса сеть получает изображение, которое преобразуется в числовой формат. Сверточный слой становится первым этапом обработки – специальные фильтры (ядра) сканируют изображение, выделяя базовые элементы: линии, углы, края. Фильтры перемещаются по изображению, выполняя математические операции и создавая карты признаков, которые отражают наличие определенных паттернов. После сверточного слоя данные проходят через слой объединения (pooling), который уменьшает размерность карты признаков, сохраняя при этом наиболее важные характеристики. Это позволяет снизить вычислительную нагрузку и повысить эффективность обработки. Далее информация поступает в полносвязные слои, где происходит финальная классификация объектов.

Важным элементом работы CNN является процесс обучения, во время которого параметры фильтров настраиваются таким образом, чтобы максимально точно выделять значимые признаки. При этом сеть способна распознавать объекты независимо от их положения на изображении благодаря механизму инвариантности. В процессе обработки сеть постепенно переходит от выявления простых паттернов к распознаванию все более сложных структур, что позволяет ей эффективно классифицировать изображения и решать различные задачи компьютерного зрения.

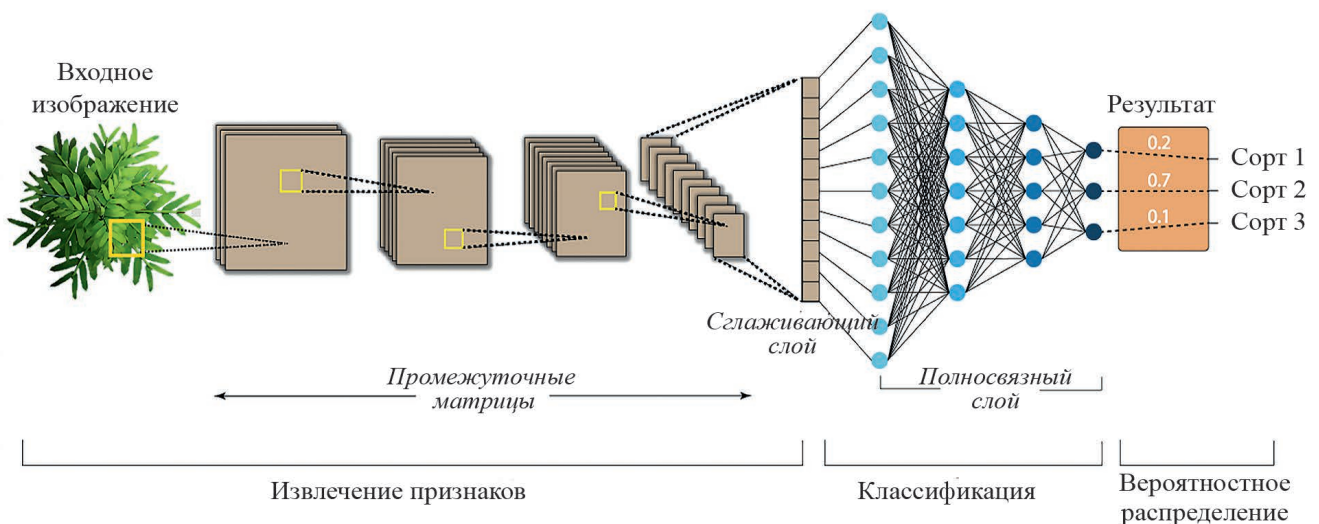


Рис. 5. Принцип функционирования сверточной нейронной сети (convolutional neural network, CNN)

Fig. 5. The operating principle of a convolutional neural network (CNN)

Практическое применение нейронных сетей охватывает широкий спектр задач: от микроскопического анализа до масштабных полевых исследований. Они используются для оценки посевного материала, мониторинга цветения, анализа вегетативных органов, селекционной работы и выявления генетических различий между сортами растений [27–29]. Современные системы на базе нейронных сетей способны проводить количественный анализ площади листьев [30–32], оценивать архитектуру корневой системы [33; 34], выявлять закономерности изменения флуоресценции хлорофилла [35], анализировать взаимосвязь между ростом и накоплением биомассы [27; 30; 36], диагностировать патологические состояния [22; 23].

Такой подход значительно повышает эффективность фенотипирования, минимизирует субъективность оценок и позволяет обрабатывать данные в режиме реального времени, что особенно важно для селекционных программ и мониторинга состояния сельскохозяйственных культур.

В совокупности инструментальные и информационные технологии позволяют получать высокоточную, объективную и автоматизированную оценку как внешних, так и внутренних характеристик растений, что значительно превосходит возможности классических методов исследования. У исследователя возникает возможность объединить достижения феномики и геномного анализа для интенсификации своего научного поиска и решения актуальных задач. При этом результаты феномного анализа позволяют детальнее изучить те характеристики растений, которые не удалось объяснить с учетом собственных генетических исследований. Все это приведет к поиску и выявлению новых закономерностей в исследовании растений, а не к простому повторению и перепроверке существующих фактов. В совокупности использование результатов феномики и геномики позволяет проводить исследования на качественно новом научном уровне.

Использование феномики в агроэкологии. В результате внедрения феномических подходов в практику прецизионной селекции растений в агроэкологии были достигнуты существенные научные и практические результаты. Значительно повысилась резистентность растительных организмов к комплексу биотических и абиотических стрессовых факторов, что обусловлено углубленным пониманием механизмов адаптации растений на молекулярно-генетическом уровне. Параллельно с этим наблюдается существенное улучшение количественных и качественных показателей продуктивности, в частности, отмечено значительное повышение урожайности и улучшение характеристик зерновой продукции. Особого внимания заслуживает оптимизация метаболических процессов, связанных с ассимиляцией питательных веществ, что способствует более эффективному использованию агрохимических ресурсов и снижению антропогенной нагрузки на экосистемы. Существенным достижением является разработка и внедрение методов создания адаптивных сортов, способных противостоять климатическим изменениям и экстремальным погодным условиям.

Конвергенция феномических, геномных и биоинформатических подходов создала прочную основу для конструирования растительных форм с улучшенными агрономическими характеристиками, что открывает новые перспективы в развитии современной селекции растений и агроэкологии.

Пшеница. Исследование Singh B., et al. (2023) по прогнозированию биомассы пшеницы позволило создать модели для неинвазивной оценки биомассы и площади листьев с точностью около 90 % [30]. Это дало возможность идентифицировать новые гены, отвечающие за производство биомассы, и улучшить сельскохозяйственные культуры. В исследовании Silva P., et al. (2022) проводился анализ с применением современных методов высокопроизводительного фенотипирования для определения резистентности пшеницы к вирусу желтой карликовости ячменя [20]. В ходе пяти полевых сезонов было проведено фенотипирование более 100 линий пшеницы, что позволило выявить новый геномный участок на хромосоме 5AS, связанный с устойчивостью к болезни, и определить эффективность геномного отбора для прогнозирования устойчивости к патогену, а также установить влияние инсектицидной обработки на развитие заболевания. Исследование Guo H., et al. (2021) корневой системы пшеницы позволило выявить особенности корней и геномные области, которые могут быть использованы для выведения более эффективных сортов [37]. Исследование Montesinos-López O. A., et al. (2024) по улучшению прогнозирования урожайности пшеницы показало значительное улучшение точности прогнозов (до 49,19 %) при интеграции феномных и экологических данных [38]. В исследовании Togninalli M., et al. (2023) по мультимодальному глубокому обучению создана модель машинного обучения, объединяющая генотип и фенотип, что позволило достичь коэффициента корреляции 0,754 при прогнозировании урожайности пшеницы [39].

Ячмень. В работе Hansen P. B., et al. (2022) применялась установка RadiMax для изучения ярового ячменя [10]. Исследование позволило интегрировать мультимные данные (феномные, геномные, транскриптомные и данные метилирования ДНК) и улучшить прогнозирование сложных признаков (урожайность зерна, масса тысячи зерен, содержание белка, поглощение азота, точность прогнозирования при условиях водного стресса). Данное исследование демонстрирует успешное применение методов цифрового фенотипирования для улучшения характеристик ячменя, включая устойчивость к болезням и агрономические признаки. Особенно важным является то, что использование феномики позволило значительно повысить точность прогнозирования селекционных результатов и ускорить процесс создания новых сортов ячменя.

Кукуруза. Исследование York L. M. (2018) посвящено фенотипированию корневых систем сельскохозяйственных культур, в частности кукурузы, пшеницы и сои [40]. В работе описывается методология изучения верхушечной части корневой системы, которая может служить основой для геномных исследований. Результаты Zhou N., et al. (2018) фокусируется на применении краудсорсинга для анализа изображений растений в контексте феномики [4], в частности, изучалась задача сегментации изображений кукурузных метелок. В статье de Sousa C. A. F., et al. (2017) описывается методика дискриминации генотипов кукурузы по их реакции на засуху с помощью флуоресцентной визуализации хлорофилла [11].

Авторы разработали протокол, который позволяет быстро и эффективно оценивать фотохимические процессы в растениях. Этот метод оказался столь же надежным, как и традиционный газообмен, но при этом не требует ежедневной калибровки оборудования и адаптации растений к темноте. Авторы заявляют, что методика применима как в контролируемых, так и в полевых условиях при полном солнечном освещении.

Тритикале. В исследовании Hura T., et al. (2016) показаны различия в механизмах адаптации двух сортов тритикале к засухе [12]. Полукарликовый сорт «Woltario» и длинностебельный «Moderato» продемонстрировали разные стратегии использования углеводов, что позволило выделить более эффективные пути накопления защитных соединений. В еще одной работе этого же автора были представлены результаты картирования количественных признаков у тритикале при засухе [13]: выявлены локусы, отвечающие за накопление фенольных соединений в клеточной стенке и активность фотосинтетического аппарата. Дополнительно авторами выявлена связь между типом скручиваемости флаговых листьев и накоплением фенольных соединений [5]. Обнаруженный новый тип нескручивающихся листьев с высоким содержанием фенолов демонстрирует эффективные механизмы защиты от потери воды и светового повреждения, что представляет интерес для селекции.

Картофель. Исследование Tiwari J. K., et al. (2022) демонстрирует использование феномики в комбинации с другими омиксными технологиями (геномика, транскриптомика) для улучшения устойчивости картофеля к биотическим и абиотическим стрессам [14]. В работе Ortiz R. (2023) описывается применение высокопроизводительной феномики для оценки селекционных признаков картофеля [41]. Исследование подчеркивает важность интеграции феномических данных с методами машинного обучения для эффективного управления большими наборами данных в селекции. В исследовании Rigoulot S. B., et al. (2021) представлена инновационная платформа для дистанционной визуализации трансгенных растений картофеля с использованием флуоресцентных белков [42]. Метод позволяет проводить быстрый скрининг растений в полевых условиях, что значительно ускоряет процесс селекции.

Лен. В обзорной статье Yadav B., et al. описывается текущее состояние исследований в области феномики льна [43]. В работе отмечается, что феномика находится на начальных этапах развития применительно к льну, однако уже сейчас она используется совместно с другими омиксными технологиями для изучения механизмов устойчивости льна к абиотическим стрессам, выявления генетических маркеров важных хозяйственно ценных признаков, проведения комплексного анализа взаимодействия генетических и экологических факторов, а также для улучшения качества масла и волокна.

Рапс. В работе Yang Z., et al. (2022) описано создание мультиомической базы данных BnIR, которая интегрирует данные феномики с другими омиксными технологиями в исследовании рапса [44]. BnIR позволяет анализировать ассоциации «ген-фенотип» и выявлять гены-кандидаты для селекции. В исследовании Zhang G., et al. (2023) с помощью высокопроизводительного фенотипирования выявлено 928 фенотипических признаков, связанных с солеустойчивостью рапса [15]. Картированы локусы количественных признаков и идентифицированы 234 гена-кандидата, включая *BnCKX5* и *BnERF3*, которые регулируют устойчивость к солевому стрессу. В исследовании Zhou T., et al. (2021) с использованием комплексного феномного анализа выявлены транспортеры *BnaC2.NKT1;1* и *BnaC5.NHX2*, регулирующие компартментацию натрия, что важно для создания сортов с повышенной устойчивостью к засолению [16]. Также разработаны неинвазивные феномные методы исследования для оценки параметров фотосинтеза и объема цветков как маркеров стрессоустойчивости, коррелирующие с урожайностью семян и устойчивости рапса к жаре и засухе [6].

Томат. В работе Sorrentino M., et al. (2022) феномика использовалась в комбинации с метаболомикой для изучения реакции томатов на солевой стресс [17]. Выявлены ключевые параметры флуоресценции хлорофилла и антистрессовые метаболиты (4-гидроксикумарин и витамин K1), которые могут быть использованы для отбора устойчивых форм. Nankar A. N., et al. (2020) провели работу по комплексной оценке фенотипического разнообразия томатов [7]. Исследованы 47 морфометрических признаков растений и плодов, что позволило выявить значительные вариации по вегетативным признакам и характеристикам плодов, важным для селекции. Gascuel Q., et al. (2017) использовали феномику как часть мультиомического подхода для улучшения качества плодов томатов [45]. Работа фокусируется на выявлении генетических маркеров, связанных с потребительскими характеристиками. Singh A. K., et al. (2022) изучали механизмы термоустойчивости томатов с использованием феномических подходов для оценки реакции растений на тепловой стресс [18].

Перец. Ortega-Albero N., et al. (2024) исследовали генетическое разнообразие сортов перца с Балеарских островов [8]. В работе также проводилось комплексное фенотипирование растений, включающее анализ растений, листьев, цветов, плодов, пыльцы и семян. Результаты позволили выявить значительное морфологическое разнообразие и могут служить основой для создания новых сортов. В работе Silvar C., et al. (2022) дана оценка фенотипического разнообразия перцев Пиренейского полуострова [46], выявлены ключевые признаки (размеры и форма плодов), которые могут быть использованы в селекции. García-

González C. A. и Silvar C. (2020) изучали взаимосвязь между фенотипическими и химическими характеристиками сортов перца из Эквадора [25]. Исследование демонстрирует, что существует обратная зависимость между размером плодов перца и содержанием в них полезных веществ: крупные плоды содержат меньше нутрицевтических соединений. Полученные результаты указывают на то, что параметры размера, формы плодов и биохимический состав находились под значительным давлением искусственного отбора, что важно учитывать при дальнейшей селекционной работе с культурой перца. Tripodi P. и Greco B. (2018) провели масштабное исследование фенотипического разнообразия коллекции из 307 образцов перца [9]. Работа включала анализ 54 характеристик растений, листьев, цветов и плодов. Результаты помогли выявить закономерности в процессе одомашнивания и отбора, что важно для дальнейшей селекционной работы.

Заключение

Высокопроизводительное цифровое фенотипирование растений с использованием мульти- и гиперспектральных систем – современная постгеномная технология XXI в. на стыке физиологии, генетики, биоинформатики с применением алгоритмов искусственного интеллекта. Данная технология становится ключевым инструментом современной агроэкологии, обеспечивая получение комплексной информации о растениях и их взаимодействии с окружающей средой на различных уровнях организации.

Преимуществами цифровой феномики растений в агроэкологии являются объективность данных за счет минимизации человеческого фактора в измерениях, высокая точность измерений по причине использования современных технологий (мульти- и гиперспектральные анализаторы), автоматизация процессов анализа, комплексный анализ (оценка множества параметров одновременно) и прогностическая ценность, поскольку на основании множества переменных с использованием нейронных сетей у исследователей имеется возможность моделирования реакций растений на влияние абиотических и биотических факторов.

Создание виртуальных моделей растений открывает новые перспективы для изучения механизмов развития растительных организмов, разработки новых методов селекции и оптимизации условий выращивания сельскохозяйственных культур. Использование феномики в оптимизации условий выращивания открывает новые перспективы для развития точного земледелия и создания умных агропромышленных комплексов, способных автоматически подстраиваться под потребности растений и изменяющиеся внешние условия. Применение феномики в селекции позволяет значительно ускорить процесс создания новых сортов и сделать его более точным. Это направление развития сельского хозяйства имеет огромный потенциал для повышения продуктивности растениеводства и обеспечения продовольственной безопасности. В совокупности, использование цифровой феномики в селекции открывает широкие возможности для создания растений с улучшенными характеристиками: повышенной урожайностью, устойчивостью к болезням, засухоустойчивостью, улучшенными вкусовыми качествами и др.

К перспективным векторам развития феномного анализа можно отнести разработки в технологическом аспекте – совершенствование аппаратной базы и программного обеспечения; в междисциплинарном направлении – интеграция с генетикой, геномикой, биохимией, экологией и др. (объединение результатов геномных и феномных исследований синергично повысят эффективность исследований); в формировании новых направлений – создание цифровых моделей растений, разработка систем прогнозирования, интеграция с системами точного земледелия, развитие методов прецизионной селекции. Экономические перспективы использования феномики в научных исследованиях будут заключаться в снижении затрат на исследования, оптимизации использования ресурсов и сокращении времени селекции. К социальным аспектам можно отнести подготовку специалистов нового поколения и развитие образовательных программ с разработкой учебных материалов, а также обеспечение продовольственной безопасности и сохранение природных ресурсов.

Таким образом, высокопроизводительное цифровое фенотипирование (феномика) растений, объединяющее мульти- и гиперспектральные технологии с искусственным интеллектом, становится фундаментальной технологией XXI в., обеспечивающей революционный прорыв в агроэкологии и селекции за счет повышения точности исследований, оптимизации агротехнологий и ускорения создания новых сортов с улучшенными характеристиками.

Библиографические ссылки / References

1. Awada L, Phillips PWB, Bodan AM. The evolution of plant phenomics: global insights, trends, and collaborations (2000–2021). *Frontiers in Plant Science*. 2024;15:1410738. DOI: 10.3389/fpls.2024.1410738.
2. Yu Y, Cheng Q, Wang F, Zhu Y, Shang X, Jones A, He H, Song Y. Crop/Plant Modeling Supports Plant Breeding: I. Optimization of Environmental Factors in Accelerating Crop Growth and Development for Speed Breeding. *Plant Phenomics*. 2023;5:0099. DOI: 10.34133/plantphenomics.0099.

3. Das Choudhury S, Samal A, Awada T. Leveraging Image Analysis for High-Throughput Plant Phenotyping. *Frontiers in Plant Science*. 2019;10:508. DOI: 10.3389/fpls.2019.00508.
4. Zhou N, Siegel ZD, Zarecor S, Lee N, Campbell DA, Andorf CM, Nettleton D, Lawrence-Dill CJ, Ganapathysubramanian B, Kelly JW, Friedberg I. Crowdsourcing image analysis for plant phenomics to generate ground truth data for machine learning. *PLOS Computational Biology*. 2018;14(7):e1006337. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1006337.
5. Hura T, Hura K, Ostrowska A, Urban K. Non-rolling flag leaves use an effective mechanism to reduce water loss and light-induced damage under drought stress. *Annals of Botany*. 2022; 130(3):393–408. DOI: 10.1093/aob/mcac035.
6. Chen S, Guo Y, Sirault X, Stefanova K, Saradadevi R, Turner NC, Nelson MN, Furbank RT, Siddique KHM, Cowling WA. Nondestructive Phenomic Tools for the Prediction of Heat and Drought Tolerance at Anthesis in Brassica Species. *Plant Phenomics*. 2019;2019:3264872. DOI: 10.34133/2019/3264872.
7. Nankar AN, Tringovska I, Grozeva S, Ganeva D, Kostova D. Tomato Phenotypic Diversity Determined by Combined Approaches of Conventional and High-Throughput Tomato Analyzer Phenotyping. *Plants (Basel)*. 2020;9(2):197. DOI: 10.3390/plants9020197.
8. Ortega-Albero N, Barchi L, Fita A, Díaz M, Martínez F, Luna-Prohens JM, Rodríguez-Burruezo A. Genetic diversity, population structure, and phylogeny of insular Spanish pepper landraces (*Capsicum annuum* L.) through phenotyping and genotyping-by-sequencing. *Frontiers in Plant Science*. 2024;15:1435427. DOI: 10.3389/fpls.2024.1435427.
9. Tripodi P, Greco B. Large Scale Phenotyping Provides Insight into the Diversity of Vegetative and Reproductive Organs in a Wide Collection of Wild and Domesticated Peppers (*Capsicum* spp.). *Plants*. 2018;7(4):103. DOI: 10.3390/plants7040103.
10. Hansen PB, Ruud AK, de los Campos G, Malinowska M, Nagy I, Svane SF, Thorup-Kristensen K, Jensen JD, Krusell L, Asp T. Integration of DNA Methylation and Transcriptome Data Improves Complex Trait Prediction in *Hordeum vulgare*. *Plants*. 2022;11(17):2190. DOI: 10.3390/plants11172190.
11. de Sousa CAF, de Paiva DS, Casari RADCN, de Oliveira NG, Molinari HBC, Kobayashi AK, Magalhães PC, Gomide RL, Souza MT Jr. A procedure for maize genotypes discrimination to drought by chlorophyll fluorescence imaging rapid light curves. *Plant Methods*. 2017;13:61. DOI: 10.1186/s13007-017-0209-z.
12. Hura T, Dziurka M, Hura K, Ostrowska A, Dziurka K. Different allocation of carbohydrates and phenolics in dehydrated leaves of triticale. *Journal of Plant Physiology*. 2016;202:1–9. DOI: 10.1016/j.jplph.2016.06.018.
13. Hura T, Tyrka M, Hura K, Ostrowska A, Dziurka K. QTLs for cell wall-bound phenolics in relation to the photosynthetic apparatus activity and leaf water status under drought stress at different growth stages of triticale. *Molecular Genetics and Genomics*. 2017;292:415–433. DOI: 10.1007/s00438-016-1276-y.
14. Tiwari JK, Buckseth T, Zinta R, Bhatia N, Dalamu D, Naik S, Poonia AK, Kardile HB, Challam C, Singh RK, Luthra SK, Kumar V, Kumar M. Germplasm, Breeding, and Genomics in Potato Improvement of Biotic and Abiotic Stresses Tolerance. *Frontiers in Plant Science*. 2022;13:805671. DOI: 10.3389/fpls.2022.805671.
15. Zhang G, Zhou J, Peng Y, Tan Z, Zhang Y, Zhao H, Liu D, Liu X, Li L, Yu L, Jin C, Fang S, Shi J, Geng Z, Yang S, Chen G, Liu K, Yang Q, Feng H, Guo L, Yang W. High-throughput phenotyping-based quantitative trait loci mapping reveals the genetic architecture of the salt stress tolerance of *Brassica napus*. *Plant, Cell & Environment*. 2023;46(2):549–566. DOI: 10.1111/pce.14485.
16. Zhou T, Yue CP, Liu Y, Zhang TY, Huang JY, Hua YP. Multiomics reveal pivotal roles of sodium translocation and compartmentation in regulating salinity resistance in allotetraploid rapeseed. *Journal of Experimental Botany*. 2021;72(15):5687–5708. DOI: 10.1093/jxb/erab215.
17. Sorrentino M, Panzarová K, Spyroglou I, Spíchal L, Buffagni V, Ganugi P, Rouphael Y, Colla G, Lucini L, De Diego N. Integration of Phenomics and Metabolomics Datasets Reveals Different Mode of Action of Biostimulants Based on Protein Hydrolysates in *Lactuca sativa* L. and *Solanum lycopersicum* L. Under Salinity. *Frontiers in Plant Science*. 2022;12:808711. DOI: 10.3389/fpls.2021.808711.
18. Singh AK, Mishra P, Kashyap SP, Karkute SG, Singh PM, Rai N, Bahadur A, Behera TK. Molecular insights into mechanisms underlying thermo-tolerance in tomato. *Frontiers in Plant Science*. 2022;13:1040532. DOI: 10.3389/fpls.2022.1040532.
19. PlantEye F600 Multispectral 3D scanner for plant phenotyping [Internet, cited 2025 August 22]. Phenospex. Smart Plant Analysis. Available from: <https://phenospex.com/products/plant-phenotyping/planteye-f600-multispectral-3d-scanner-for-plants/#parameters>.
20. Silva P, Evers B, Kieffaber A, Wang X, Brown R, Gao L, Fritz A, Crain J, Poland J. Applied phenomics and genomics for improving barley yellow dwarf resistance in winter wheat. *G3 (Bethesda)*. 2022;12(7):jkac064. DOI: 10.1093/g3journal/jkac064.
21. Shakshi, Srivastava RP, Yadav S, Singh MK. Integrating Genomics and Phenomics in Agricultural Breeding: A Comprehensive Review. *Asian Research Journal of Agriculture*. 2024;17(4):116–125. DOI: 10.9734/arja/2024/v17i4506.
22. Toda Y, Okura F. How Convolutional Neural Networks Diagnose Plant Disease. *Plant Phenomics*. 2019;2019:9237136. DOI: 10.34133/2019/9237136.
23. Lee SH, Goëau H, Bonnet P, Joly A. Attention-Based Recurrent Neural Network for Plant Disease Classification. *Frontiers in Plant Science*. 2020;11:601250. DOI: 10.3389/fpls.2020.601250.
24. Dwivedi SL, Goldman I, Ceccarelli S, Ortiz R. Chapter Three – Advanced analytics, phenomics and biotechnology approaches to enhance genetic gains in plant breeding. *Advances in Agronomy*. 2020;162:89–142. DOI: 10.1016/bs.agron.2020.02.002.
25. García-González CA, Silvar C. Phytochemical Assessment of Native Ecuadorian Peppers (*Capsicum* spp.) and Correlation Analysis to Fruit Phenomics. *Plants*. 2020;9(8):986. DOI: 10.3390/plants9080986.
26. Sun D, Xu Y, Cen H. Optical sensors: deciphering plant phenomics in breeding factories. *Trends in Plant Science*. 2022;27(2):209–210. DOI: 10.1016/j.tplants.2021.06.012.
27. Jiang Y, Li C. Convolutional Neural Networks for Image-Based High-Throughput Plant Phenotyping: A Review. *Plant Phenomics*. 2020;2020:4152816. DOI: 10.34133/2020/4152816.
28. Kaya C. Optimizing Crop Production With Plant Phenomics Through High-Throughput Phenotyping and AI in Controlled Environments. *Food and Energy Security*. 2025;14:e70050. DOI: 10.1002/fes3.70050.
29. Murphy KM, Ludwig E, Gutierrez J, Gehan MA. Deep Learning in Image-Based Plant Phenotyping. *Annual Review of Plant Biology*. 2024;75(1):771–795. DOI: 10.1146/annurev-arplant-070523-042828.
30. Singh B, Kumar S, Elangovan A, Vasht D, Arya S, Duc NT, Swami P, Pawar GS, Raju D, Krishna H, Sathee L, Dalal M, Sahoo RN, Chinnusamy V. Phenomics based prediction of plant biomass and leaf area in wheat using machine learning approaches. *Frontiers in Plant Science*. 2023;14:1214801. DOI: 10.3389/fpls.2023.1214801.
31. Kolhar S, Jagtap J. Phenomics for Komatsuna plant growth tracking using deep learning approach. *Expert Systems with Applications*. 2023;215:119368. DOI: 10.1016/j.eswa.2022.119368.

32. Jurado-Ruiz F, Nguyen TP, Peller J, Aranzana MJ, Polder G, Aarts MGM. LeTra: a leaf tracking workflow based on convolutional neural networks and intersection over union. *Plant Methods*. 2024;20(1):11. DOI: 10.1186/s13007-024-01138-x.
33. Xu Z, York LM, Seethepalli A, Bucciarelli B, Cheng H, Samac DA. Objective Phenotyping of Root System Architecture Using Image Augmentation and Machine Learning in Alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Plant Phenomics*. 2022;2022:9879610. DOI: 10.34133/2022/9879610.
34. Teramoto S, Uga Y. Convolutional neural networks combined with conventional filtering to semantically segment plant roots in rapidly scanned X-ray computed tomography volumes with high noise levels. *Plant Methods*. 2024;20(1):73. DOI: 10.1186/s13007-024-01208-0.
35. Zhang C, Zhou L, Xiao Q, Bai X, Wu B, Wu N, Zhao Y, Wang J, Feng L. End-to-End Fusion of Hyperspectral and Chlorophyll Fluorescence Imaging to Identify Rice Stresses. *Plant Phenomics*. 2022;2022:9851096. DOI: 10.34133/2022/9851096.
36. Okada M, Barras C, Toda Y, Hamazaki K, Ohmori Y, Yamasaki Y, Takahashi H, Takanashi H, Tsuda M, Hirai MY, Tsujimoto H, Kaga A, Nakazono M, Fujiwara T, Iwata H. High-Throughput Phenotyping of Soybean Biomass: Conventional Trait Estimation and Novel Latent Feature Extraction Using UAV Remote Sensing and Deep Learning Models. *Plant Phenomics*. 2024;6:0244. DOI: 10.34133/plantphenomics.0244.
37. Guo H, Ayalew H, Seethepalli A, Dhakal K, Griffiths M, Ma XF, York LM. Functional phenomics and genetics of the root economics space in winter wheat using high-throughput phenotyping of respiration and architecture. *New Phytologist*. 2021;232(1):98–112. DOI: 10.1111/nph.17329.
38. Montesinos-López OA, Herr AW, Crossa J, Montesinos-López A, Carter AH. Enhancing winter wheat prediction with genomics, phenomics and environmental data. *BMC Genomics*. 2024;25(1):544. DOI: 10.1186/s12864-024-10438-4.
39. Togninalli M, Wang X, Kucera T, Shrestha S, Juliana P, Mondal S, Pinto F, Govindan V, Crespo-Herrera L, Huerta-Espino J, Singh RP, Borgwardt K, Poland J. Multi-modal deep learning improves grain yield prediction in wheat breeding by fusing genomics and phenomics. *Bioinformatics*. 2023;39(6):btad336. DOI: 10.1093/bioinformatics/btad336.
40. York LM. Phenotyping Crop Root Crowns: General Guidance and Specific Protocols for Maize, Wheat, and Soybean. *Methods in Molecular Biology*. 2018;1761:23–32. DOI: 10.1007/978-1-4939-7747-5_2.
41. Ortiz R. Challenges for crop improvement. *Emerging Topics in Life Sciences*. 2023;7(2):197–205. DOI: 10.1042/ETLS20230106.
42. Rigoulot SB, Schimel TM, Lee JH, Sears RG, Brabazon H, Layton JS, Li L, Meier KA, Poindexter MR, Schmid MJ, Seaberry EM, Brabazon JW, Madajian JA, Finander MJ, DiBenedetto J, Occhialini A, Lenaghan SC, Stewart CN Jr. Imaging of multiple fluorescent proteins in canopies enables synthetic biology in plants. *Plant Biotechnology Journal*. 2021;19(4):830–843. DOI: 10.1111/pbi.13510.
43. Yadav B, Kaur V, Narayan OP, Yadav SK, Kumar A, Wankhede DP. Integrated omics approaches for flax improvement under abiotic and biotic stress: Current status and future prospects. *Frontiers in Plant Science*. 2022;13:931275. DOI: 10.3389/fpls.2022.931275.
44. Yang Z, Wang S, Wei L, Huang Y, Liu D, Jia Y, Luo C, Lin Y, Liang C, Hu Y, Dai C, Guo L, Zhou Y, Yang QY. BnIR: A multi-omics database with various tools for Brassica napus research and breeding. *Molecular Plant*. 2023;16(4):775–789. DOI: 10.1016/j.molp.2023.03.007.
45. Gascuel Q, Doretto G, Monforte AJ, Fortes AM, Granell A. Use of Natural Diversity and Biotechnology to Increase the Quality and Nutritional Content of Tomato and Grape. *Frontiers in Plant Science*. 2017;8:652. DOI: 10.3389/fpls.2017.00652.
46. Silvar C, Rocha F, Barata AM. Tracing Back the History of Pepper (*Capsicum annum*) in the Iberian Peninsula from a Phenomics Point of View. *Plants (Basel)*. 2022;11(22):3075. DOI: 10.3390/plants11223075.

Статья поступила в редколлегию 24.09.2025.
Received by editorial board 24.09.2025.