

doi 10.18699/vjgb-26-37

Описание морфологических характеристик колосьев пшеницы в базе данных SpikeDroidDB в виде цифрового паспорта

Е.Г. Комышев^{1,2}, Ю.В. Кручинина ^{1,2}, В.С. Коваль^{1,2}, А.А. Потешкина^{1,3}, Н.В. Петраш ^{1,3},В.В. Пискарев ^{1,3}, Н.П. Гончаров¹, Д.А. Афонников ^{1,2} ¹ Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия² Курчатовский геномный центр ИЦиГ СО РАН, Новосибирск, Россия³ Сибирский научно-исследовательский институт растениеводства и селекции – филиал Федерального исследовательского центра Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, р. п. Краснообск, Новосибирская область, Россия ada@bionet.nsc.ru

Аннотация. При анализе структуры урожая пшеницы неоднократно показано, что его выраженность зависит от продуктивности колоса. Основные характеристики колоса, которые связаны с продуктивностью, это прежде всего масса 1000 зерен, число зерен и колосков в колосе, его размеры, наличие/отсутствие остей и другие. В современных генетических исследованиях для идентификации локусов, контролирующих признаки продуктивности колоса, требуется морфометрия сотен и тысяч колосьев. С другой стороны, современные коллекции генетических ресурсов содержат тысячи образцов, которые также требуют своего детального описания. Все это обуславливает необходимость развития цифровых технологий описания признака колоса пшеницы, которые могут быть достигнуты на основе методов анализа изображений. Эти методы позволяют автоматически получать значения набора признаков, которые могут служить основой формирования цифровых коллекций растений. В настоящей работе предложено цифровое описание колоса пшеницы на основе характеристик, полученных как вручную, так и на основе анализа цифровых изображений, а также характеристик растений, у которых был взят колос. Эти данные положены в основу обновленной версии базы данных SpikeDroidDB (<http://spikedroid.bioeres.cyto-gen.ru/>). Цифровое описание колоса состоит из двух блоков. Блок загружаемых данных содержит описание растения и включает 5 таблиц: коллекция, сортообразец (год выращивания (вегетация), посевной номер, таксономическую информацию и др.), место выращивания, характеристики колоса растений, оцененные экспертом вручную (длину, ширину фронтальной и боковой проекций, тип и цвет колоса и др.). Блок извлекаемых характеристик включает признаки колоса, полученные в результате цифрового фенотипирования, и состоит из шести таблиц: характеристики контура колоса на изображении; характеристики модели четырехугольников, компоненты цвета колоса, доминантные цвета колоса, текстурные характеристики колоса на изображении. Было проведено выделение наиболее наглядных и информативных характеристик колоса, которые позволили сформировать цифровой паспорт колоса, включающий признаки размера, формы и цвета, определенные на основе анализа цифровых изображений. Проведено сравнение признаков, формирующих цифровой паспорт, у двух видов пшеницы, *T. aethiopicum* и *T. carthlicum*. Показано, что признаки цифрового паспорта позволяют наглядно представить модель колоса, а также выявить достоверно различающиеся параметры (цвет колоса и остей, округлость фронтальной проекции колоса). В интерфейс базы данных также добавлена возможность пакетной загрузки данных о характеристиках растения и колоса, а также их изображений.

Ключевые слова: пшеница; колос; морфометрия; цифровое фенотипирование; база данных; коллекция

Для цитирования: Комышев Е.Г., Кручинина Ю.В., Коваль В.С., Потешкина А.А., Петраш Н.В., Пискарев В.В., Гончаров Н.П., Афонников Д.А. Описание морфологических характеристик колосьев пшеницы в базе данных SpikeDroidDB в виде цифрового паспорта. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2026;30(2):330-338. doi 10.18699/vjgb-26-37

Финансирование. Работа поддержана грантом РФФИ № 23-14-00150.

Благодарности. Размещение сайта базы данных и обработка изображений выполнены с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «Биоинформатика» при поддержке бюджетного проекта FWNR-2026-0023.

Description of morphological characteristics of wheat spike as a digital certificate in the SpikeDroidDB database

Е.Г. Komyshev^{1,2}, Yu.V. Kruchinina ^{1,2}, V.S. Koval^{1,2}, A.A. Poteshkina^{1,3}, N.V. Petrash ^{1,3},V.V. Piskarev ^{1,3}, N.P. Goncharov¹, D.A. Afonnikov ^{1,2} ¹ Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia² Kurchatov Genomic Center of ICG SB RAS, Novosibirsk, Russia³ Siberian Research Institute of Plant Production and Breeding – Branch of the Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoobsk, Novosibirsk region, Russia ada@bionet.nsc.ru

Abstract. It has been repeatedly shown that spike productivity is the main component of wheat yield. The main spike parameters related to productivity are size, the number of grains and spikelets per spike, and the presence or absence of awns. In modern genetic research, morphometric analysis of hundreds and thousands of spikes is required to determine the loci that control spike productivity traits. On the other hand, thousands of accessions in modern collections of wheat genetic resources need detailed description. These considerations motivate the development of digital technologies for describing spike traits in wheat, which can be achieved through image analysis methods. These methods allow for automated acquisition of trait values that can serve as the basis for digital plant collections. Here we propose an extended set of spike characteristics obtained both manually and through digital image analysis and present plant characterization. These data form the basis of the updated version of the SpikeDroidDB database (<http://spikedroid.biores.cytogen.ru/>). The digital description of the spike consists of two blocks. The block of uploaded data includes a description of the plant and contains five tables: collection; variety sample (year of cultivation (vegetation), sowing identifier, taxonomic information, etc.), planting site, and characteristics of the spike determined manually (length, width of frontal and lateral views, type and color of the spike, etc.) The block of extracted features includes spike characteristics obtained by digital phenotyping and contains six tables: characteristics of the spike outline in the image; characteristics of the quadrangle model, values of the color components of the spike, dominant colors of the spike, and texture characteristics of the spike in the image. The most illustrative and significant features of the spike have been identified, allowing for the formation of the spike digital certificate, which includes size, shape, and color features derived from the digital images. The features forming the digital certificate have been compared between two wheat species, *T. aestivum* and *T. carthlicum*. It is shown that the features of the digital certificate allow for a clear representation of the spike model and the identification of distinct parameters: colors of the spike and awns and roundness of the frontal view of the spike. The database interface has been supplemented with the ability to upload data on plant and spike characteristics, as well as their images, in the batch mode.

Key words: wheat; spike; morphometry; digital phenotyping; database; collection

For citation: Komyshev E.G., Kruchinina Yu.V., Koval V.S., Poteshkina A.A., Petrash N.V., Piskarev V.V., Goncharov N.P., Afonnikov D.A. Description of morphological characteristics of wheat spike as a digital certificate in the SpikeDroidDB database. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov J Genet Breed.* 2026;30(2):330-338. doi 10.18699/vjgb-26-37

Введение

При анализе структуры урожая пшеницы неоднократно показано, что его выраженность зависит от продуктивности колоса (Моисеева, 2017; Романов, Пимонов, 2018; Демина, 2022; Шуклина и др., 2022). Наиболее значимы для урожайности такие его характеристики, как число колосков и зерен, размеры и степень компактности. При обработке пшеницы также важны наличие или отсутствие остей, пленчатость, окраска колоса и т. д. Изучение генов, которые контролируют эти признаки, находится в фокусе интереса генетиков и селекционеров (Guo et al., 2018; Garland-Campbell, 2022). В таких исследованиях значима оценка разнообразия признаков колосьев для большого количества образцов, что позволяет проводить поиск ассоциаций между вариациями характеристик колоса и нуклеотидными заменами в геноме пшеницы (Wu et al., 2012; Xu et al., 2024).

Изучение разнообразия пшеницы и ее сородичей также опирается на идентификацию различных признаков колоса, прежде всего таких, которые позволяют установить таксономическую принадлежность растения, провести классификацию биологического материала (Spagnoletti Zeuli, Qualset, 1987; Al Khanjari et al., 2008; Гончаров, 2009) и апробацию семеноводческих посевов (Методика..., 2019). К признакам такого типа относятся форма колоса (Kopratskaia et al., 2016), опушенность колоса (Goncharov et al., 2007) и наличие/отсутствие остей (Смоленская и др., 2022), цвет колоса и остей (Ляпунова, 2017; Смоленская и др., 2022), компактоидность (Vavilova et al., 2017). Эти морфологические признаки используются генетиками и селекционерами при анализе коллекций пшениц и в селекционных программах, а их оценка требует больших

трудозатрат, поскольку объемы анализируемого материала могут составлять сотни и тысячи образцов (Пакуль, Шерина, 2009; Пискарев и др., 2018; Зуев и др., 2019).

Для повышения эффективности определения признаков растений в современной генетике и селекции используют технологии фенотипирования на основе анализа цифровых изображений, которые позволяют автоматизировать процесс фенотипирования, снижая трудозатраты и позволяя получать оценки признаков растений для тысяч образцов (Афонников и др., 2016; Meraf et al., 2024), в том числе и с использованием методов машинного обучения (Murphy et al., 2024). Для колосьев пшеницы методы фенотипирования, основанные на анализе цифровых изображений, в последнее время также активно разрабатываются. Они позволяют оценивать прежде всего морфологические характеристики, такие как длина и ширина, плотность колоса (Genaev et al., 2019). Изображения на основе рентгеновской томографии позволяют детально описать трехмерную структуру колоса вплоть до каждого зерна (Ling et al., 2023). Использование методов машинного обучения позволяет автоматически определить число (Генаев и др., 2026) и форму (Niu et al., 2024) колосков в колосе, оценить наличие/отсутствие опушения колоса (колосковой чешуи) (Artemenko et al., 2024).

Цифровое фенотипирование позволяет изучать количество характеристик растений гораздо большее, чем раньше мог исследовать селекционер (Афонников и др., 2016). Некоторые из этих характеристик имеют прямую связь с урожайностью, например, длина колоса или число колосков в колосе (Моисеева, 2017; Романов, Пимонов, 2018; Демина, 2022; Шуклина и др., 2022). Часть характеристик связана с ней косвенно, например, массу зерна можно

оценить по площади его проекции на изображении. Часть полученных цифровых характеристик трудно интерпретировать с точки зрения агробиологии, однако они могут быть эффективно использованы для решения задач классификации колосьев методом машинного обучения (Bi et al., 2010). Выбор цифровых характеристик растений важен при создании цифровых коллекций – баз данных, которые описывают их фенотип (Conejo-Rodríguez et al., 2024). С одной стороны, они должны быть привычны селекционеру, работающему с этой базой данных (Методика..., 2019), с другой, достаточно представительны, чтобы на их основе можно было бы решать и задачи классификации образцов.

Ранее нами была разработана база данных SpikeDroidDB, в которой хранится информация об образцах колоса пшеницы, включая описание признаков, оцененных экспертом вручную (Генаев и др., 2018). В настоящей работе показаны расширение и систематизация набора цифровых признаков для описания колосьев в этой базе данных, таких как параметры модели четырехугольников (Genaev et al., 2019), а также характеристики цвета колоса и остей. Интерфейс базы дополнен возможностью пакетной загрузки информации, включающей характеристики образцов пшеницы, оцененные экспертом, и изображения колосьев. Это позволило расширить количество описаний образцов колосьев в БД до более чем 1700 штук.

Материалы и методы

Растительный материал. База данных была дополнена описаниями образцов колосьев растений из коллекции сортов мягкой пшеницы «Сибирский генофонд» СибНИИРС/ИЦиГ СО РАН (Пискарев и др., 2018), выращенных в 2019–2020 гг. на экспериментальных полях СибНИИРС (п. Краснообск, Новосибирская обл.).

Цифровое фенотипирование. Для получения изображений колосьев использовали протокол «на прищепке», описанный ранее (Генаев и др., 2018; Genaev et al., 2019). Колос размещался на прищепке вертикально на фоне листа синей бумаги. Съемка проводилась цифровой камерой Canon 350D, объектив EF-S 18-55mm f/3.5-5.6. Для оценки масштаба и калибровки цвета был использован цветовой маркер X-Rite Mini ColorChecker Classic, который располагался в области кадра. Колосья снимали в четырех проекциях: фронтальной (наиболее широкой), обратной к ней и двух боковых. Для получения цифровых характеристик колоса изображения колосьев сегментировали методом глубокого машинного обучения (Artemenko et al., 2024) на фон, цветовую палитру, тело колоса и ости. Размеченное изображение подавалось на вход программе WERecognizer (Genaev et al., 2019) для расчета морфометрических и цветовых характеристик колосьев. Морфологические характеристики колоса включали: набор признаков для модели четырехугольников, симметризованной относительно оси колоса (Komyshev et al., 2024) (рис. 1); набор признаков контура тела колоса на изображении: длину, периметр, площадь, округлость, закругленность, целостность, шероховатость, площадь остей. Всего проанализированы 19 морфологических признаков колоса и остей.

Для колоса и его остей рассчитывали ряд цифровых характеристик цвета. За основу взят метод, использованный ранее для анализа зерен (Afonnikov et al., 2022). Для всех пикселей тела колоса оценивали средние значения компонент цвета в четырех цифровых пространствах RGB, Lab, HSV и YCrCb (Комышев и др., 2020), всего 12 характеристик. Дополнительно выявляли три доминантных цвета и соответствующие значения их компонент. Доминантные цвета определяются как центры кластеров в пространстве компонент RGB, полученных в результате метода k -средних, $k = 3$ (Afonnikov et al., 2022). Они характеризуют три наибольшие группы пикселей колоса, однородные по цвету и достаточно полно описывают неоднородность окраски биологических объектов на изображении. Как правило, первый кластер (доминантный цвет) имеет значения компонент, близкие к средним на изображении колоса. Аналогично рассчитывали цветовые характеристики для пикселей остей.

Дополнительно рассчитывали текстурные признаки области колоса на изображении. Эти признаки характеризуют неоднородность структуры объекта на изображении, которая может возникать из-за неравномерной окраски или структуры поверхности колосковой чешуи, например опушения. Отличительной чертой простой текстуры является регулярность, повторяемые или частично воспроизводимые элементы на некоторой поверхности или объекте. Рассчитывали два типа структурных признаков, основанных на матрице совпадения уровней серого (GLCM, Grey Level Co-occurrence Matrix, 10 характеристик) и матрице длин серий уровней серого (GLRM, Gray Level Run-length Matrix, 6 характеристик) (Комышев и др., 2020).

Структура БД SpikeDroid. Описанные выше признаки колоса, которые получены в результате анализа цифровых изображений, в совокупности с их характеристиками, которые определяет эксперт, и параметрами растения, хранятся в обновленной версии БД SpikeDroid, логическая структура которой представлена на рис. 2.

Структура обновленной версии БД включает два блока данных. Блок загружаемых данных включает 5 таблиц и описывает коллекцию и растение, колос которого был проанализирован. Таблица описания коллекции (Collection) содержит текстовое поле с названием коллекции, а также поле описания коллекции. Таблица растения (Plant) включает 20 полей. К ним относятся год выращивания (вегетация), посевной номер, номер каталога в коллекции, номер репродукции, аллель Q гена (Vavilova et al., 2020), информация о родительских растениях, таксономическая информация и информация о месте происхождения сорта/линии. Таблица с описанием места выращивания растения (Environment) содержит информацию о времени и месте выращивания, включая адрес организации-оригинатора. Таблица с описанием характеристик колоса (Spike), определенных экспертом вручную, включает столбцы: номер колоса у растения, длину, ширину фронтальной и боковой проекций, тип колоса, цвет колоса, количество колосков, цвет и тип остей, характеристики опушения колоса (колосковой чешуи), признаки ломкоколосости и осыпания зерна, тип присоединения остей. Помимо вышеперечис-



Рис. 1. Морфометрические характеристики колоса: *а* – изображение колоса, расположенного вертикально на прищепке, фронтальная проекция; *б* – результаты сегментации изображения на тело колоса (светло-зеленый цвет), ости (желтый цвет) и фон (синий цвет). Ось колоса показана розовой линией; *в* – модель четырехугольников для колоса; *б, в* – обозначения признаков представлены согласно табл. S1.

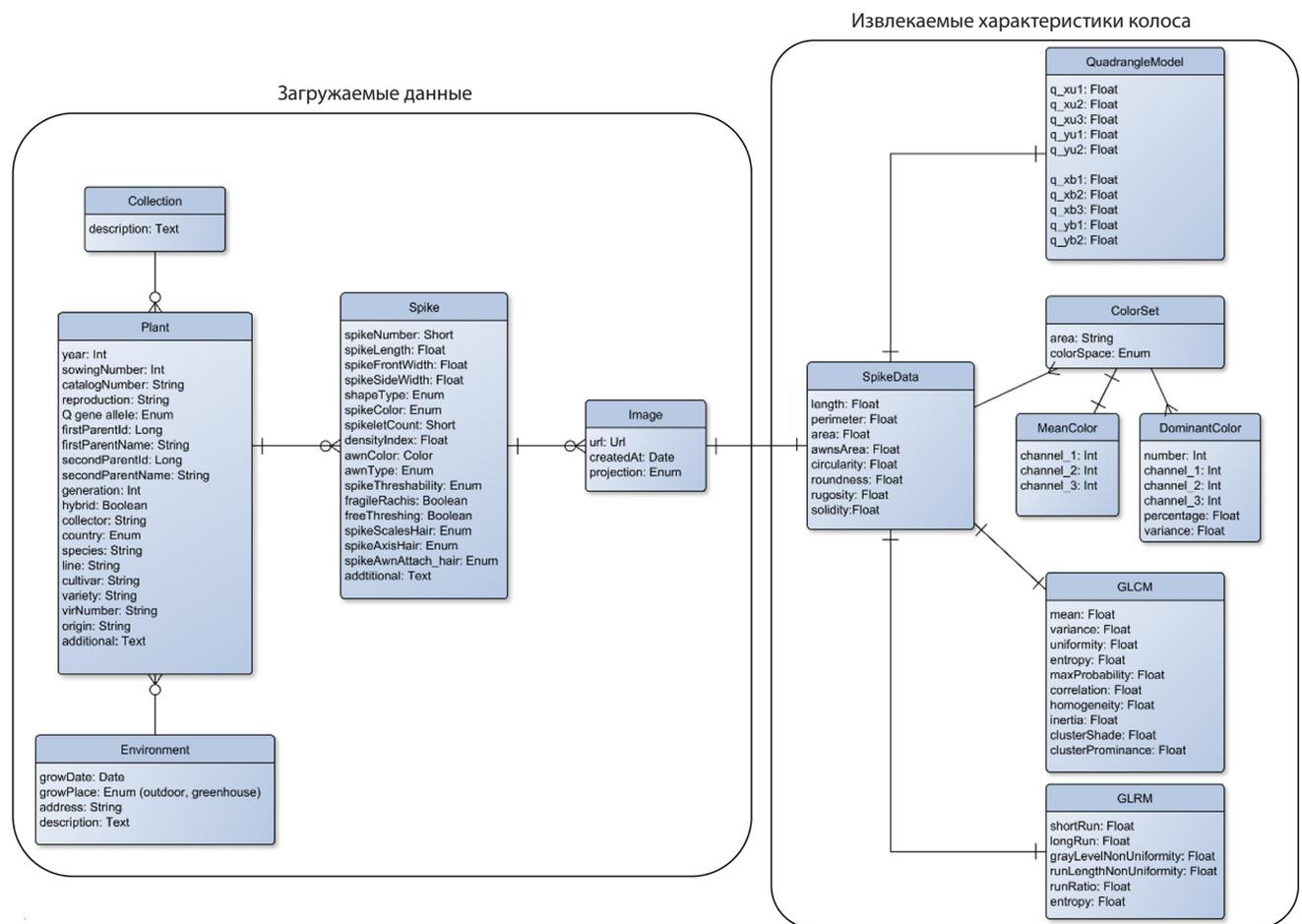


Рис. 2. Логическая структура обновленной версии БД SpikeDroidDB. Справа – блок данных, который вводит пользователь. Слева – блок данных, полученных в результате цифрового фенотипирования изображения.

ленного, этот блок содержит информацию об изображении колоса (Image), для которого приводят номер проекции, дату получения и ссылку на файл изображения.

Блок извлекаемых характеристик включает признаки колоса, полученные в результате цифрового фенотипирования (см. выше). Он включает 7 таблиц: характеристики контура колоса на изображении (SpikeData); характеристики модели четырехугольников (QuadrangleModel), цвет колоса (MeanColor), доминантные цвета колоса (DominantColor), параметры текстуры для матриц GLCM и GLRM для различных цветовых пространств, описанных в таблице ColorSet.

Цифровой паспорт колоса. Среди большого количества характеристик формы и цвета колоса, представленных в БД SpikeDroid (см. выше), можно выделить ряд ключевых, которые могут быть использованы для достоверной оценки сходства/различий формы и размера колоса, а также его цвета. С другой стороны, такие характеристики могут быть использованы для наглядной визуализации сходства или различий колосьев разных образцов из коллекции растений. Ранее мы показали, что цифровые характеристики упрощенной геометрической модели колоса на основе четырехугольников, характеристики контура колоса на изображении могут быть использованы для поиска как межвидовых, так и внутривидовых различий колосьев (Komyshev et al., 2024). Они позволяют классифицировать растения на виды с высокой точностью. Эти признаки были взяты нами за основу при формировании цифрового паспорта колоса: наиболее наглядных признаков формы/размера/цвета колоса, полученных на основе анализа цифровых изображений, достаточных для решения задач классификации. Они были дополнены характеристиками цвета колоса и остей. Список характеристик, формирующих цифровой паспорт, приведен в Приложении¹. Для одного изображения колоса он включает: 11 параметров модели четырехугольников (Komyshev et al., 2024), 7 признаков контура колоса (Genaev et al., 2019), 3 параметра цвета колоса (средние компонент R, G, B пикселей тела колоса) и 3 параметра цвета остей (средние компонент R, G, B пикселей остей).

Для большинства колосьев в базе данных хранится как минимум 4 проекции колосьев, поэтому для каждого колоса цифровой паспорт включает усредненные данные характеристик для фронтальной/обратной стороны колоса и боковых характеристик. В случае если для колоса на изображении представлена только одна проекция, как правило, это фронтальная проекция по протоколу «на столе» (Генаев и др., 2018), паспорт содержит только характеристики, полученные на основе одного изображения.

Реализация БД. База данных реализована на основе системы управления контентом Drupal (<https://www.drupal.org>). В качестве хранилища данных используют реляционную базу данных под управлением MySQL СУБД, которая развернута на сервере баз данных ЦКП «Биоинформатика» под управлением CentOS Linux.

¹ Табл. S1 и S2 Приложения см. по адресу:
<https://vavilovj-icg.ru/download/pict-2026-30/appx19.pdf>

Результаты

Пример визуализации колосьев на основе характеристик, представленных в цифровом паспорте, показан на рис. 3 для двух видов пшеницы из коллекции Н.П. Гончарова: *Triticum aethiopicum* Jacubz. (номер каталога ВИР к-19301/2, 6 растений) и *T. carthlicum* Nevski (номер каталога ВИР к-32496, 12 растений).

Рисунок демонстрирует близость двух видов пшениц по длине колоса. Однако форма колоса несколько различается. У *T. aethiopicum* форма во фронтальной проекции выглядит более округлой, а у *T. carthlicum* более вытянутой. Хорошо заметны различия по размеру и количеству остей у двух видов на изображении: у *T. aethiopicum* остей меньше и они более короткие, чем у *T. carthlicum*. Цвет колосьев и остей колосьев также различается: у *T. aethiopicum* колосья и ости светлее, а у *T. carthlicum* темнее.

Мы провели тест на достоверность различий между средними значениями параметров цифрового паспорта колосьев двух видов. Достоверные различия для фронтальной и боковой проекций обнаружены для пяти признаков формы (все они связаны с характеристиками контура, но не модели) и всеми характеристиками цвета – как колосьев, так и остей. Результаты для них приведены в табл. S2. Они хорошо согласуются с визуальной оценкой (см. рис. 3). Для фронтальной проекции значимые различия обнаружены для признаков площади остей (c_{S_a}), округлости (c_{Ci}), закругленности (c_{Ro}), целостности (c_{So}). Для боковой проекции наблюдаются достоверные различия только по площади остей. Достоверные различия для всех компонент цвета наблюдаются для обеих проекций колоса и остей. Таким образом, признаки, формирующие цифровой паспорт колоса, позволяют наглядно отразить сходства и различия характеристик колосьев для двух видов пшениц, а также определить, какие из них достоверно различаются.

Возможность загрузки данных сразу для множества колосьев облегчает пользователю работу с базой данных. Интерфейс пользователя для импорта данных в этом случае представлен на рис. 4. Он показывает пошаговую реализацию загрузки множества изображений и описания колосьев к ним.

В качестве примера на рис. 5 приведена статистика загруженных данных образцов «Сибирской коллекции пшениц», выращенных в 2019 г. Всего было выращено и проанализировано 696 образцов. Их распределение по странам происхождения, т. е. странам, откуда получен конкретный сортообразец, 10 наиболее представленных в проанализированной коллекции, и разновидностям, наиболее представленным в анализируемом материале, показано на рис. 5.

Обсуждение

Развитие современных методов фенотипирования колоса позволяет оцифровать его характеристики для последующего компьютерного анализа. Ранее мы показали, что цифровые характеристики формы и размера колоса коррелируют с эквивалентными им по биологическому

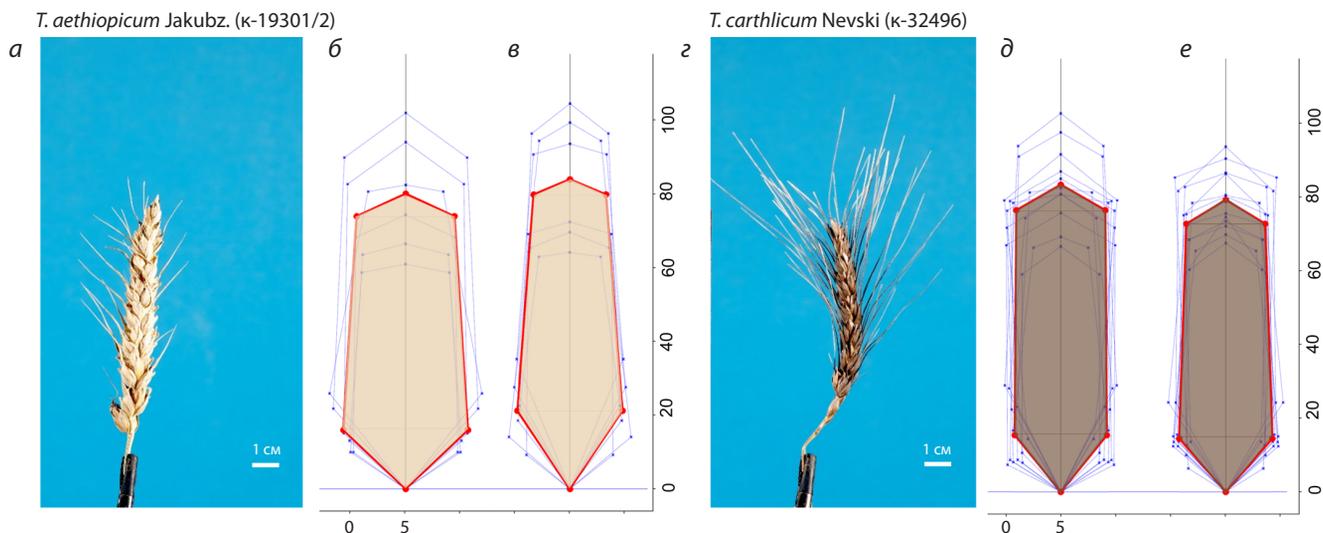


Рис. 3. Представление в графическом виде параметров цифрового паспорта для двух видов пшениц *T. aethiopicum* Jacubz. (а–в) и *T. carthlicum* Nevski (г–е). Цифровые изображения колосьев показаны на панелях а, г; модели колосьев для фронтальной проекции показаны на панелях б, д; модели колосьев для боковых проекций показаны на панелях в, е. Синими тонкими линиями показаны геометрические модели колосьев для индивидуальных растений, красными жирными линиями – многоугольники моделей для средних значений параметров колоса. Цвет заливки красных многоугольников соответствует усредненному цвету пикселей контура колоса. Масштабы длины (в мм) по осям X и Y для моделей колосьев отличаются в 5 раз для более наглядного отображения особенности формы колосьев.

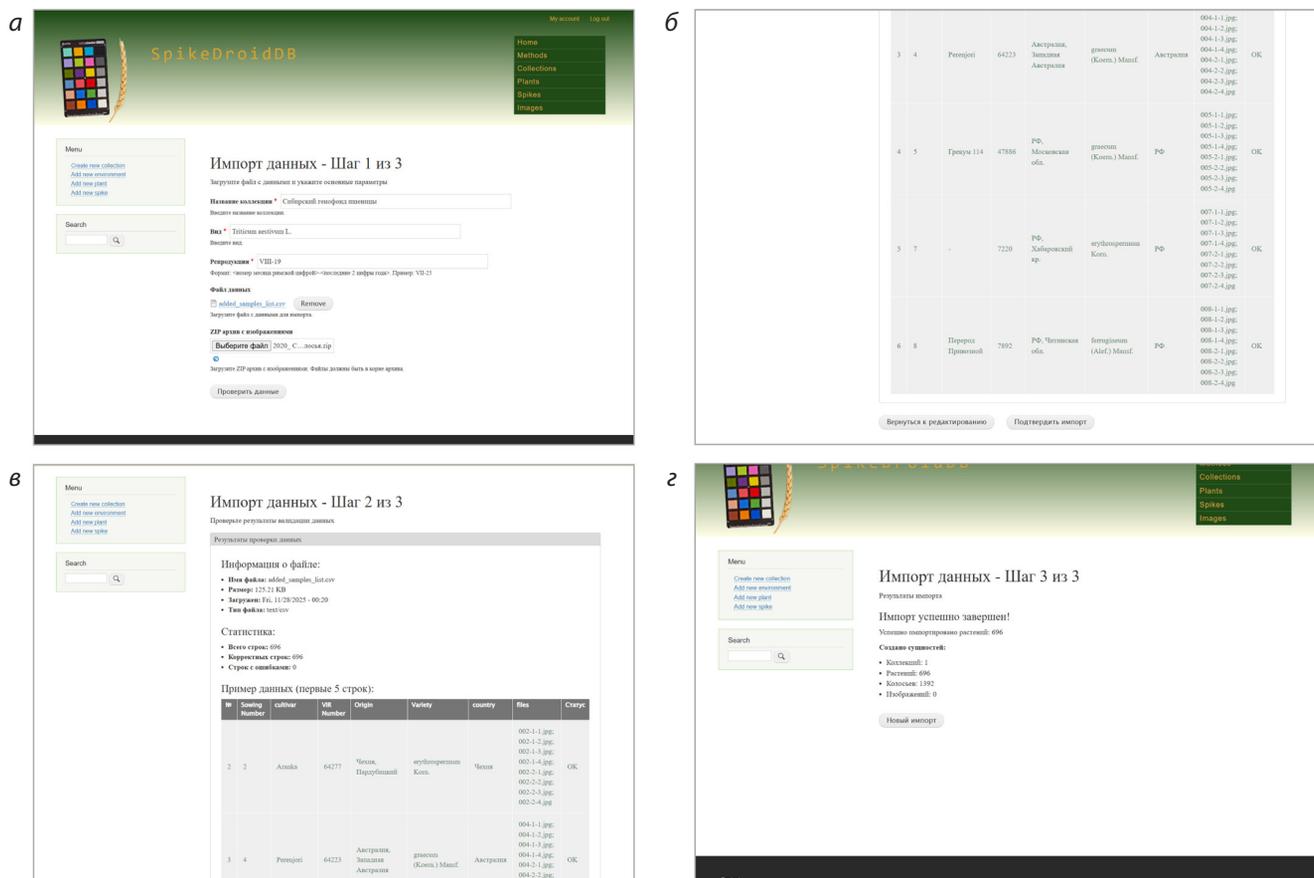


Рис. 4. Визуализация интерфейса пользователя при выполнении основных шагов пакетной загрузки данных о колосьях и их изображениях в БД SpikeDroidDB: а – ввод основных характеристик пакета данных: вид пшеницы, номер репродукции, поле для ввода файла с описанием коллекции; б – визуализация списка загруженных данных; в – визуализация информации о загружаемых данных; г – завершение импорта данных.



Рис. 5. Статистика образцов мягкой пшеницы (репродукция 2019 г.) в БД SpikeDroidDB, распределение образцов по странам (а) и разновидностям (б).

смыслу характеристиками, полученными вручную (Komyshev et al., 2024). В этой же работе было показано, что совместное использование цифровых и классических характеристик позволяет классифицировать растения на виды с высокой точностью. Более того, такое представление позволяет выявлять признаки, которые достоверно различаются у разных образцов одного и того же вида (Komyshev et al., 2024). Все это демонстрирует, что использование как классических, так и цифровых признаков колоса может быть полезным генетикам и селекционерам для описания характеристик колоса. Мы учли это при создании цифрового паспорта колоса, который включает описание характеристик растений, места их произрастания, признаков колосьев, полученных на основе оценок эксперта, а также цифровых характеристик, полученных на основе анализа изображений. Такое представление позволяет более полно описать свойства колоса. К цифровым характеристикам колоса относятся параметры модели четырехугольников, свойства контура колоса на изображении, набор характеристик цвета и текстуры. Таким образом, цифровые параметры фенотипа совместно с наборами классических признаков позволяют более точно описывать растения, классифицировать их (Conejo-Rodríguez et al., 2024).

Цифровое представление фенотипических характеристик растений является важным шагом для развития современных коллекций генетических ресурсов растений (Thormann et al., 2012; Heberling, 2022). С одной стороны, это позволяет быстро оценить огромное разнообразие фенотипических признаков растений в коллекции. С другой, цифровые данные коллекций могут быть более эффективно использованы в селекционных программах (Dirta et al., 2023). Это демонстрирует преимущество цифрового описания свойств коллекций генбанков и рабочих коллекций селекционеров для селекционно-генетических исследований. Дальнейшее развитие методов фенотипирования, выбор наиболее важных цифровых характеристик даст возможность более полного понимания проявления фенотипических признаков, следовательно, может повысить эффективность идентификации генов, которые их контролируют.

Заключение

В результате проведенного исследования разработана комплексная система цифрового описания колоса пшеницы, объединяющая как традиционные методы ручной оценки, так и современные технологии цифрового фенотипирования. Результатом стало обновление структуры БД SpikeDroidDB для комплексного представления свойств колоса. Обновленная структура включает два основных блока данных. Блок загружаемых данных содержит фундаментальную информацию о коллекции и характеристиках конкретного сортообразца, представленную в пяти взаимосвязанных таблицах. Особое внимание уделено агробиологической и таксономической информации, условиям выращивания и базовым характеристикам колоса, определяемым экспертом вручную. Блок извлекаемых характеристик представляет собой расширенный набор параметров, полученных посредством цифрового анализа изображений. Он включает шесть категорий данных: характеристики контура колоса, параметры модели четырехугольников, цветовые характеристики (включая доминантные цвета), а также текстурные особенности. Важным функциональным дополнением стала реализация возможности пакетной загрузки данных, существенно упрощающая процесс внесения информации о растениях, загрузку их изображений, а также последующую статистическую обработку.

Выделены наиболее наглядные и информативные характеристики колоса, которые позволили сформировать цифровой паспорт колоса, включающий признаки размера, формы и цвета, оцененные на основе анализа цифровых изображений. Проведено сравнение признаков, формирующих цифровой паспорт у двух видов пшеницы, *T. aethiopicum* и *T. carthlicum*. Показано, что признаки цифрового паспорта позволяют наглядно представить модель колоса, а также определить достоверно различающиеся параметры: цвет колоса и остей, округлость фронтальной проекции колоса. Таким образом, повышается эффективность описания признаков колоса для современных исследований в области селекции и генетики, которая позволяет осуществлять комплексный анализ морфологических характеристик растений.

Список литературы / References

- Афонников Д.А., Генаев М.А., Дорoshkov А.В., Комышев Е.Г., Пшенникова Т.А. Методы высокопроизводительного фенотипирования растений для массовых селекционно-генетических экспериментов. *Генетика*. 2016;52(7):788-803. doi 10.7868/S001667581607002X
[Afonnikov D.A., Genaev M.A., Doroshkov A.V., Komyshev E.G., Pshenichnikova T.A. Methods of high-throughput plant phenotyping for large-scale breeding and genetic experiments. *Russ J Genet*. 2016;52(7):688-701. doi 10.1134/S1022795416070024]
- Генаев М.А., Комышев Е.Г., Фу Хао, Коваль В.С., Гончаров Н.П., Афонников Д.А. SpikeDroidDB – информационная система для аннотации морфометрических характеристик колоса пшеницы. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2018;22(1):132-140. doi 10.18699/VJ18.340
[Genaev M.A., Komyshev E.G., Fu Hao, Koval V.S., Goncharov N.P., Afonnikov D.A. SpikeDroidDB: an information system for annotation of morphometric characteristics of wheat spike. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov J Genet Breed*. 2018; 22(1):132-140. doi 10.18699/VJ18.340 (in Russian)]
- Генаев М.А., Бусов И.Д., Кручинина Ю.В., Коваль В.С., Гончаров Н.П. Детекция колосков в колосе пшеницы на RGB-изображениях с использованием глубокого машинного обучения. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2026;30(1):27-35. doi 10.18699/vjgb-26-09
[Genaev M.A., Busov I.D., Kruchinina Yu.V., Koval V.S., Goncharov N.P. Wheat spikelet detection on RGB images using deep machine learning. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov J Genet Breed*. 2026;30(1):27-35. doi 10.18699/vjgb-26-09]
- Гончаров Н.П. Определитель разновидностей мягкой и твердой пшениц. Новосибирск: СО РАН, 2009
[Goncharov N.P. Manual book of common and durum wheat varieties. Novosibirsk: SB RAS Publ. House, 2009 (in Russian)]
- Демина И.Ф. Адаптивность сортов и линий яровой пшеницы по урожайности и элементам ее структуры в условиях лесостепи Среднего Поволжья. *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2022;65(5):530-534. doi 10.55186/25876740_2022_65_5_530
[Demina I.F. Adaptability of spring wheat varieties and lines in terms of productivity and elements of its structure under forest-steppe conditions of the Middle Volga region. *Mezhdunarodnyy Sel'skokhozyajstvennyy Zhurnal = International Agricultural Journal*. 2022; 65(5):530-534. doi 10.55186/25876740_2022_65_5_530 (in Russian)]
- Зуев Е.В., Брыкова А.Н., Кудрявцева Е.Ю. Результаты анализа паспортной базы данных «Местные сорта яровой мягкой пшеницы в коллекции ВИР». *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2019;180(1):7-11. doi 10.30901/2227-8834-2019-1-7-11
[Zuev E.V., Brykova A.N., Kudryavtseva E.Yu. Results of analyzing the passport database 'Spring bread wheat landraces in the VIR collection'. *Proc Appl Bot Genet Breed*. 2019;180(1):7-11. doi 10.30901/2227-8834-2019-1-7-11 (in Russian)]
- Комышев Е.Г., Генаев М.А., Афонников Д.А. Анализ цветковых и текстурных характеристик зерен злаков на цифровых изображениях. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2020;24(4):340-347. doi 10.18699/VJ20.626
[Komyshev E.G., Genaev M.A., Afonnikov D.A. Analysis of color and texture characteristics of cereals on digital images. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov J Genet Breed*. 2020;24(4):340-347. doi 10.18699/VJ20.626]
- Ляпунова О.А. Внутривидовая классификация пшеницы твердой: новые ботанические разновидности и формы. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2017;21(2):152-157. doi 10.18699/VJ17.233
[Lyapunova O.A. Intraspecific classification of durum wheat: new botanical varieties and forms. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov J Genet Breed*. 2017;21(2):152-157. doi 10.18699/VJ17.233 (in Russian)]
- Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Вып. 1. Общая часть. М.: 2019. (Минсельхоз России. ФГБУ «Госсорткомиссия»). URL https://gossortrf.ru/upload/2019/08/metodica_1.pdf (Дата обр. 04.12.2025)
[Methodology of State Variety Testing of Agricultural Crops. Issue 1. General Part. Moscow: 2019. (Ministry of Agriculture of the Russian Federation. Federal State Budgetary Institution «Gossortkomissiya»). URL https://gossortrf.ru/upload/2019/08/metodica_1.pdf (Accepted 04.12.2025) (in Russian)]
- Моисеева К.В. Продуктивность сортов озимой пшеницы. *Аграрный вестник Урала*. 2017;(9):30-34
[Moiseeva K.V. The productivity of winter wheat varieties. *Agrar Bull Urals*. 2017;(9):30-34 (in Russian)]
- Пакуль В.П., Шерина А.Н. Сравнительное изучение образцов яровой пшеницы коллекции ВИР по комплексу агробиологических свойств и признаков. *Достижения науки и техники АПК*. 2009;9:7-8
[Pakul' V.P., Sherina A.N. Comparative study of spring wheat samples from the VIR collection according to the complex of agrobiological properties and characteristics. *Dostizheniya Nauki i Tekhniki APK = Achievements of Science and Technology of AIC*. 2009;9:7-8 (in Russian)]
- Пискарев В.В., Зуев Е.В., Брыкова А.Н. Исходный материал для селекции яровой мягкой пшеницы в условиях Новосибирской области. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2018;22(7):784-794. doi 10.18699/VJ18.422
[Piskarev V.V., Zuev E.V., Brykova A.N. Sources for the breeding of soft spring wheat in the conditions of Novosibirsk region. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov J Genet Breed*. 2018; 22(7):784-794. doi 10.18699/VJ18.422 (in Russian)]
- Романов Б.В., Пиманов К.И. Феномогеномика продукционных признаков видов пшеницы. Персиановский, 2018
[Romanov B.V., Pimanov K.I. Phenogenomics of production traits of wheat varieties. Persianovsky, 2018 (in Russian)]
- Смоленская С.Э., Ефимов В.М., Кручинина Ю.В., Немцев Б.Ф., Чепурнов Г.Ю., Овчинникова Е.С., Белан И.А., Зуев Е.В., Чжоу Чэньси, Пискарев В.В., Гончаров Н.П. Скороспелость и морфотип сортов мягкой пшеницы Западной и Восточной Сибири. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2022;26(7):662-674. doi 10.18699/VJGB-22-81
[Smolenskaya S.E., Efimov V.M., Kruchinina Yu.V., Nemtsev B.F., Chepurnov G.Yu., Ovchinnikova E.S., Belan I.A., Zuev E.V., Zhou Chenxi, Piskarev V.V., Goncharov N.P. Earliness and morphotypes of common wheat cultivars of Western and Eastern Siberia. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov J Genet Breed*. 2022;26(7):662-674. doi 10.18699/VJGB-22-81]
- Щукина О.А., Завгородний С.В., Аленичева А.Д., Иванова Л.П., Квитко В.Е., Пыльнев В.В., Упельник В.П. Связь элементов структуры колоса с продуктивностью растений образцов × *Triticum cziczinii* Tzvel. *Известия ТСХА*. 2022;(5):57-69. doi 10.26897/0021-342X-2022-5-57-69
[Shchuklina O.A., Zavgorodnyy S.V., Alenicheva A.D., Ivanova L.P., Kvitko V.E., Pylnev V.V., Upelniek V.P. Relationship between spike structure elements and plant productivity of × *Triticum cziczinii* Tzvel samples. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2022; (5):57-69. doi 10.26897/0021-342X-2022-5-57-69 (in Russian)]
- Afonnikov D.A., Komyshev E.G., Efimov V.M., Genaev M.A., Koval V.S., Gierke P.U., Börner A. Relationship between the characteristics of bread wheat grains, storage time and germination. *Plants*. 2022;11(1):35. doi 10.3390/plants11010035
- Al Khanjari S., Filatenko A.A., Hammer K., Buerkert A. Morphological spike diversity of Omani wheat. *Genet Resour Crop Evol*. 2008; 55(8):1185-1195. doi 10.1007/s10722-008-9319-9
- Artemenko N.V., Genaev M.A., Epifanov R.U., Komyshev E.G., Kruchinina Y.V., Koval V.S., Goncharov N.P., Afonnikov D.A. Image-based classification of wheat spikes by glume pubescence using convolutional neural networks. *Front Plant Sci*. 2024;14:1336192. doi 10.3389/fpls.2023.1336192

- Bi K., Jiang P., Lei L., Shi B., Wang C. Non-destructive measurement of wheat spike characteristics based on morphological image processing. *Trans Chin Soc Agric Eng.* 2010;26(12):212-216. doi 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.12.036
- Conejo-Rodriguez D.F., Gonzalez-Guzman J.J., Ramirez-Gil J.G., Wenzl P., Urban M.O. Digital descriptors sharpen classical descriptors, for improving genebank accession management: A case study on *Arachis* spp. and *Phaseolus* spp. *PLoS One.* 2024;19(5):e0302158. doi 10.1371/journal.pone.0302158
- Dipta B., Sood S., Devi R., Bhardwaj V., Mangal V., Thakur A.K., Kumar V., Pandey N.K., Rathore A., Singh A.K. Digitalization of potato breeding program: Improving data collection and management. *Heliyon.* 2023;20(9(1):e12974. doi 10.1016/j.heliyon.2023.e12974
- Garland-Campbell K.A. Club Wheat – A review of club wheat history, improvement, and spike characteristics in wheat. *Plant Breed Rev.* 2022;46:421-465. doi 10.1002/9781119874157.ch7
- Genaev M.A., Komyshev E.G., Kruchinina Y.V., Goncharov N.P., Afonnikov D.A., Smirnov N.V. Morphometry of the wheat spike by analyzing 2D images. *Agronomy.* 2019;9(7):390. doi 10.3390/agronomy9070390
- Goncharov N.P., Bannikova S.V., Kawahara T. Wheat artificial amphiploids involving *Triticum timopheevii* genome: their studies, preservation and reproduction. *Genet Resour Crop Evol.* 2007;54(7):1507-1516. doi 10.1007/s10722-006-9141-1
- Guo Z., Zhao Y., Röder M.S., Reif J.C., Ganai M.W., Chen D., Schnurbusch T. Manipulation and prediction of spike morphology traits for the improvement of grain yield in wheat. *Sci Rep.* 2018;8(1):14435. doi 10.1038/s41598-018-31977-3
- Heberling J.M. Herbaria as big data sources of plant traits. *Int J Plant Sci.* 2022;183(2):87-118. doi 10.1086/717623
- Komyshev E.G., Genaev M.A., Kruchinina Yu.V., Koval V.S., Goncharov N.P., Afonnikov D.A. Evaluation of the spike diversity of seven hexaploid wheat species and an artificial amphidiploid using a quadrangle model obtained from 2D images. *Plants.* 2024;13(19):2736. doi 10.3390/plants13192736
- Konopatskaia I., Vavilova V., Blinov A., Goncharov N.P. Spike morphology genes in wheat species (*Triticum* L.). *Proc Latv Acad Sci B Nat Exact Appl Sci.* 2016;70(6):345-355. doi 10.1515/prolas-2016-0053
- Ling Y., Zhao Q., Liu W., Wei K., Bao R., Song W., Nie X. Detection and characterization of spike architecture based on deep learning and X-ray computed tomography in barley. *Plant Methods.* 2023;19(1):115. doi 10.1186/s13007-023-01096-w
- Meraj T., Sharif M.I., Raza M., Alabrah A., Kadry S., Gandomi A.H. Computer vision-based plants phenotyping: A comprehensive survey. *iScience.* 2024;27(1):108709. doi 10.1016/j.isci.2023.108709
- Murphy K.M., Ludwig E., Gutierrez J., Gehan M.A. Deep learning in image-based plant phenotyping. *Annu Rev Plant Biol.* 2024;75(1):771-795. doi 10.1146/annurev-arplant-070523-042828
- Niu Z., Liang N., He Y., Xu C., Sun S., Zhou Z., Qiu Z. A novel method for wheat spike phenotyping based on instance segmentation and classification. *Appl Sci.* 2024;14:6031. doi 10.3390/app14146031
- Spagnoletti Zeuli P.S., Qualset C.O. Geographical diversity for quantitative spike characters in a world collection of durum wheat. *Crop Sci.* 1987;27(2):235-241. doi 10.2135/cropsci1987.0011183X002700020022x
- Thormann I., Gaisberger H., Mattei F., Snook L., Arnaud E. Digitization and online availability of original collecting mission data to improve data quality and enhance the conservation and use of plant genetic resources. *Genet Resour Crop Evol.* 2012;59(5):635-644. doi 10.1007/s10722-012-9804-z
- Vavilova V., Konopatskaia I., Kuznetsova A.E., Blinov A., Goncharov N.P. Genomic characterization of *DEP1* gene in wheats with normal and compact spike shape. *BMC Genetics.* 2017;18(Suppl. 1):106. doi 10.1186/s12863-017-0583-6
- Vavilova V., Konopatskaia I., Blinov A., Kondratenko E.Ya., Kruchinina Y.V., Goncharov N.P. Genetic variability of spelt factor gene in *Triticum* and *Aegilops* species. *BMC Plant Biol.* 2020;20(Suppl. 1):310. doi 10.1186/s12870-020-02536-8
- Wu X., Chang X., Jing R. Genetic insight into yield-associated traits of wheat grown in multiple rain-fed environments. *PLoS One.* 2012;7(2):e31249. doi 10.1371/journal.pone.0031249
- Xu H., Wang Z., Wang F., Hu X., Ma C., Jiang H., Xie C., Gao Y., Ding G., Zhao C., Qin R., Cui D., Sun H., Cui F., Wu Y. Genome-wide association study and genomic selection of spike-related traits in bread wheat. *Theor Appl Genet.* 2024;137(6):131. doi 10.1007/s00122-024-04640-x

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 30.11.2025. После доработки 15.01.2026. Принята к публикации 15.01.2026.