

SpikeDroidDB – информационная система для аннотации морфометрических характеристик колоса пшеницы

М.А. Генаев¹✉, Е.Г. Комышев¹, Фу Хао^{2,3}, В.С. Коваль¹, Н.П. Гончаров^{1,4}, Д.А. Афонников^{1,2}

¹ Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия

³ Хэйлунцзянский университет, Харбин, Китай

⁴ Новосибирский государственный аграрный университет, Новосибирск, Россия

Структура колоса – один из важнейших признаков злаков, связанный с такими их хозяйственно ценными качествами, как продуктивность, устойчивость к факторам внешней среды и вредителям, легкость обмолота. Колосья различаются по форме, размерам, плотности, остистости, цвету и т.д. Оценка характеристик колоса выполняется экспертом на основании визуального анализа и требует существенных затрат времени. Эффективность фенотипирования колосьев можно повысить за счет внедрения компьютерных технологий, организации хранения информации в базах данных, использования алгоритмов машинного обучения для анализа полученной информации. В настоящей работе представлен новый подход для сбора, хранения и анализа информации о морфометрических характеристиках колоса пшеницы. Разработано несколько протоколов получения цифровых изображений колоса. Создана компьютерная информационная система SpikeDroidDB, которая позволяет хранить цифровые изображения колоса, аннотировать их фенотипические характеристики (всего 14 признаков), предоставляет гибкую систему запросов для доступа к данным. В системе SpikeDroidDB для растений взаимосвязанным образом описываются генотип, фенотип, место и условия выращивания. Web-интерфейс системы SpikeDroidDB доступен по адресу <http://spikedroid.biores.cytogen.ru/> и позволяет работать с системой как со стационарных компьютеров, так и с мобильных устройств. С использованием SpikeDroidDB произведена оцифровка и аннотация коллекции колосьев гибридов F₂ от скрещивания австралийского сорта *Triticum yunnanense*. Проведен анализ изменчивости колосьев по форме, длине и ширине.

Ключевые слова: пшеница; характеристики колоса; фенотипирование; аннотация; интеграция данных; базы данных.

SpikeDroidDB: an information system for annotation of morphometric characteristics of wheat spike

М.А. Генаев¹✉, Е.Г. Комышев¹, Фу Хао^{2,3}, В.С. Коваль¹, Н.П. Гончаров^{1,4}, Д.А. Афонников^{1,2}

¹ Institute of Cytology and Genetics SB RAS, Novosibirsk, Russia

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

³ Heilongjiang University, Harbin, China

⁴ Novosibirsk State Agrarian University, Novosibirsk, Russia

The structure of the ear is one of the most important features of cereals associated with such agronomically important traits as productivity, resistance to environmental factors and pests, threshability. Ears differ in shape, size, density, awnedness, color, etc. Analysis of the ear traits requires visual inspection, manual measurements and is very time-consuming. The effectiveness of ears' phenotyping can be improved by the introduction of an automated image processing technology, storage of information in databases, use of machine learning algorithms to analyze this information. This paper presents a new approach for collecting, storing and analyzing of information about morphometric characteristics of ears of wheat. Two protocols for obtaining digital images of the ear have been developed. The computer-aided information system SpikeDroidDB has been developed, which allows you to store digital images of the ear, annotate their phenotypic features (14 features, including plant variety description, links to parent genotypes, generation, planting number, ear morphology description). The interface provides a flexible query system to access the data. SpikeDroidDB represents an interconnected representation between genotype, phenotype, location, and growing conditions. The web interface of SpikeDroidDB is available at <http://spikedroid.biores.cytogen.ru/> and allows you to work with the system as with desktop computers or mobile devices. We used SpikeDroidDB for the digitization and annotation of a collection of ears of F₂ hybrids from crosses between the Australian cultivar of common wheat Triple Dirk and accession KU506 of Chinese wheat *Triticum yunnanense*. This experiment includes analysis of 104 plants, 230 spike images. The analysis of the variability of ears in form, length, and other traits allowed determination of the type of their genetic control: compactness is controlled by two recessive genes, awn type and hairi-

ness at the site of attachment of the spikelet to the axis is controlled by single dominant gene type, hairiness on the axis of the spike is controlled by two dominant genes.

Key words: wheat; spike characteristics; phenotyping; annotation; data integration.

КАК ЦИТИРОВАТЬ ЭТУ СТАТЬЮ:

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

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

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 Journal of Genetics and Breeding. 2018;22(1):132-140. DOI 10.18699/VJ18.340 (in Russian)

Одни из важнейших хозяйственно ценных признаков злаков – характеристики колоса, которые тесно связаны с продуктивностью растения. Для селекционеров и генетиков имеют большое значение такие параметры, как число зерен в колосе, масса 1000 зерен и др. (Гончаров, 2012). Форма зерновки тоже является полезным селекционным признаком, поскольку наравне с размером и выравненностью определяет рыночную стоимость зерна. Существенное влияние на урожайность растений оказывают и характеристики формы колоса (Dobrovolskaya et al., 2015), к которым относятся тип колоса, его длина и профиль, число колосков в колосе. Важны для селекционеров также остистость – безостость колосьев, число плодородных и стерильных колосков (озерненность), ломкость колоса, свойства колосковой чешуи и др. (Konopratskaia et al., 2016).

Параметры зерновок и колоса контролируются множеством генов, тесно связанных с архитектурой соцветия злаков (Sreenivasulu, Schnurbusch, 2012). Идентификация многих генов является сложной задачей (Dobrovolskaya et al., 2015). Часто для этого используют поиск локусов количественных признаков (quantitative trait loci – QTL) (Boden et al., 2015), требующий анализа большого количества растений при поиске ассоциаций между фенотипом и наборами генетических маркеров. Ранее были идентифицированы некоторые основные QTL и гены, ассоциированные с деструкцией и обуславливающие морфологию зерновок пшеницы, ячменя (*Hordeum vulgare* L.) и риса (*Oryza sativa* L.) (Jantasuriyarat et al., 2004; Nalam et al., 2007). Это локус Q (признак «спельтоидность» – spelt factor), локализованный на длинном плече хромосомы 5A, локус Tg (признак «жесткая чешуя» – tenacious glume), локализованный на коротком плече хромосомы 2D, и локус Sog (признак «мягкая чешуя» – soft glume), локализованный на хромосоме 2A (Sood et al., 2009; Amagai et al., 2017). Многие вопросы, касающиеся генетики признаков, обуславливающих структуру колоса, таких как число, размер и форма зерен, включая их варибельность и функциональное влияние на фенотип, для большинства видов пшеницы в настоящее время не изучены.

Для идентификации генов, которые могут быть ассоциированы с признаками зерновки и колоса, важным направлением является анализ вариаций указанных признаков в специально собранных коллекциях растений (Гончаров, 2012; Youssef et al., 2017). Например, в работе (Boden et al., 2015) для идентификации локусов, ассоциированных

со структурой колоса, было проанализировано более 13 тыс. колосьев. Сложность подобных исследований обусловлена необходимостью получения больших массивов фенотипических данных, включающих в себя промеры тысяч растений. Такой анализ обычно проводится экспертом визуально, что весьма трудоемко, особенно если требуется исследовать детали строения колоса или формы зерновок. Альтернативой этому трудоемкому анализу является использование новых технологий высокопроизводительного фенотипирования, основанных на методе компьютерного анализа цифровых изображений (Strange et al., 2015). Такие технологии обеспечивают высокую степень автоматизации сбора информации о фенотипе, ее хранение в базах данных, интеграцию с данными о генотипе и параметрах окружающей среды (Генаев и др., 2012), создают основу для интеллектуального анализа полученной информации.

В основе технологий высокопроизводительного фенотипирования лежит разработка протоколов получения цифровых изображений, которые служат исходными данными при применении методов автоматического фенотипирования (Afonnikov et al., 2016). При разработке автоматических методов фенотипирования важной задачей является экспертная оценка фенотипических характеристик растений для их дальнейшего использования в обучении и верификации компьютерных алгоритмов. Эта задача особенно актуальна при фенотипировании колоса, поскольку множество морфологических признаков колоса принято оценивать качественно, а не количественно. Например, по данным портала <http://www.cropontology.org/> большинство признаков колоса пшеницы не имеют количественной оценки. К таким признакам относятся форма, в том числе плотность колоса, цвет колоса (колосковых чешуй), опушение колосковых чешуй, тип остистости, цвет остей, форма колоса, ломкоколосость и др. В связи с этим применение подходов цифрового анализа изображений для описания формы зерна и колоса, а также их сопоставление с оценками признаков колоса, выполненных экспертами-селекционерами, представляется актуальной задачей, которая позволит существенно ускорить процесс получения данных за счет автоматизации и увеличить точность оценки фенотипических параметров зерна и колоса, устранив субъективизм и неточность измерений, присущих человеку.

В настоящей работе рассматривается компьютерная информационная система SpikeDroidDB, которая позволяет

Table 1. Description of ear phenotypes

Attribute	Data type	Brief description	Ontology term CropOntology.org
Spike number	int	Spike number in the plant, number one being assigned to the main ear	
Spike length	real	Spike length, cm	CO_321:0000056
Spike front width	real	Spike front width, cm	
Spike side width	real	Spike side width, cm	
Spikelet count	int	Number of spikelets	CO_321:0000058
Density index	real	Spikelet density $D = [(A-1) \times 10]/B$, where (A-1) is the number of spikelets in the spike without including the top spikelet; B, rachis length, cm	CO_321:0000055
Spike color	set	Spike color: red, black, or white	
Hairiness on spike scales	bool	Pubescence on spike scales: present or absent (binary character)	
Hairiness on the axis of the spike	bool	Rachis pubescence: present or absent (binary character)	
Hairiness at the site of attachment of the spikelet to the awn	bool	Pubescence at the joint the spikelet and the rachis: present or absent (binary character)	
Awn type	set	Awnedness: awnless, awned (awns longer or as long as the spike), short-awned (awns shorter than the spike), half-awned (upward awns are longer than downward)	CO_321:0000027
Awn color	set	Awn color: red, white, black, purple, amber, or mixed	CO_321:0000960
Spike threshability	bool	Spike fragility	CO_321:0000659
Shape type	set	Spike shape: speltoid, normal, or compact	

хранить цифровые изображения колоса, аннотировать их фенотипические характеристики (всего 14 признаков), предоставляет гибкую систему запросов для доступа к данным. В системе SpikeDroidDB для растений взаимосвязанным образом описаны генотип, фенотип, место и условия выращивания. Предложено несколько стандартизованных проколов получения цифровых изображений колоса. С использованием SpikeDroidDB произведена оцифровка и аннотация коллекции колосьев гибридов F_2 от скрещивания австралийского сорта мягкой пшеницы Triple Dirk с образцом KU506 китайской пшеницы *Triticum yunnanense*. Проведен анализ изменчивости колосьев по форме, длине и ширине.

Материалы и методы

Модель данных

Характеристики колоса, которые мы использовали для описания его фенотипа, приведены в табл. 1. Логическая модель данных включает таблицу «растение», связанную с тремя блоками информации – коллекцией, окружающей средой и фенотипом колоса. Текущая версия базы данных содержит пять таблиц и четыре отношения между ними (рис. 1).

Таблица Plant (растение) включает описание сорта (образца) растения или линии, ссылки на родительские растения, поколение и посевной номер каждого проанализированного растения. Растение связано с таблицами Collection

(коллекция), Environment (место произрастания) и Spike (описание колоса). Для коллекции указывается ее держатель и аффилиация (описание). Окружающая среда в текущей версии базы данных (БД) описывается местом произрастания, содержит геоданные и дату вегетации. Фенотип колоса описывается набором из 14 признаков, представленных в табл. 1. Мы проанализировали онтологию пшеницы портала CropOntology.org и выполнили привязку признаков, содержащихся в нашей базе данных, с признаками онтологии CropOntology.org в тех случаях, где это представлялось возможным.

Методика съемки колосьев пшеницы

В системе SpikeDroidDB с каждым колосом можно соотнести несколько изображений. Для каждого изображения указывается протокол, с помощью которого оно было получено. Для съемки мы использовали два протокола получения цифровых изображений зрелых колосьев. Нами был выбран синий фон, как наиболее контрастный к цвету колосьев и позволяющий легко отделить объект от фона. Для оценки масштаба и калибровки цвета использовали маркер X-Rite Mini ColorChecker Classic (<http://xritephoto.com/colorchecker-targets>), который находился в области кадра. Съемка колосьев проводилась в двух вариантах: в первом колос располагался вертикально перед синим фоном, второй вариант съемки предусматривает горизонтальное положение колосьев на стекле над синим фоном.

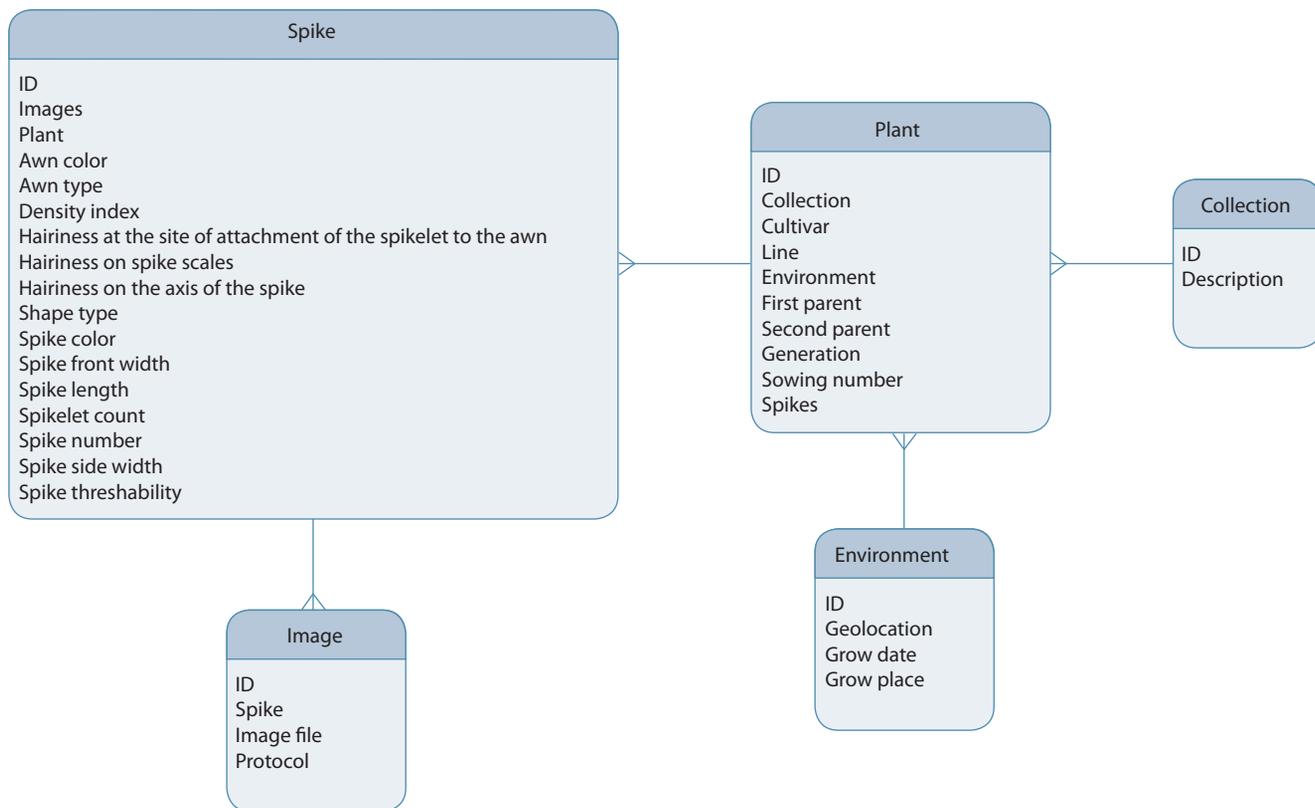


Fig. 1. Relational data model in SpikeDroidDB database.

Протокол 1. Колос находится вертикально перед синим фоном. Опорой колоса и маркера ColorChecker служат прищепки, которые помещаются на штатив. С помощью данного метода, вращая колос относительно его оси, можно производить съемку колоса в четырех или более проекциях. Использовались два импульсных источника света Falcon TE-300 (мощность вспышки выставлена в положение 2.5), в качестве модификаторов света были взяты софтбоксы Falcon 60 × 60 см; камера Canon 350D, объектив EF-S 18–55 мм f/3.5-5.6. Параметры съемки: выдержка 1/160, диафрагма 11, ISO 100, фокусное расстояние 55 мм, съемка в RAW-формат; баланс белого устанавливался при проявке RAW-файла по белому фону ColorChecker. Расстояние от объекта до фона 60 см, до источников света 100 см, до фотоаппарата 120 см. Фотоаппарат, закрепленный на штативе, объект и источники света были расположены на одной высоте, комфортной для работы фотографа. Схема размещения камеры и источников света относительно объекта и изображение, полученное в результате выполнения протокола, приведены на рис. 2.

Протокол 2. Колос лежит на стекле просветного столика, который располагается на столе с поверхностью синего цвета (фон). Фотокамера фиксируется на стойке типа «журавль» над стеклом. С помощью этого метода можно производить съемку лицевой проекции колоса. Для освещения использовали два импульсных источника света Falcon TE-300 (мощность вспышки выставлена в положение 1.0 и 1.4), в качестве модификаторов – софтбоксы Falcon 60 × 60 см; камера Canon 600D, объектив EF-S 28–135 мм f/3.5–5.6. Параметры съемки: выдержка 1/160,

диафрагма 10, ISO 200, фокусное расстояние 112 мм, съемка в RAW-формат; баланс белого устанавливался при проявке RAW-файла по белому фону ColorChecker. Расстояние от фотоаппарата до объекта 70 см, от источников света до объекта 60 см, высота стола 60 см, высота просветного столика со стеклом (расстояние от объекта до синего фона) 20 см. Схема размещения камеры и источников света относительно объекта и изображение, полученное в результате выполнения протокола, приведены на рис. 3.

Протокол 2, в отличие от протокола 1, позволяет избавиться от прищепок для фиксации колоса. В дополнение к этому, благодаря расположению стекла на определенной высоте над поверхностью фона, удается избежать теней под объектом. Однако протокол 2 не позволяет фиксировать колос под произвольным углом вращения вокруг своей оси при съемке.

Технологии реализации системы SpikeDroidDB

Система SpikeDroidDB была разработана на основе системы управления контентом Drupal 8 (<https://www.drupal.org/8>). В качестве хранилища данных используется реляционная база под управлением MySQL СУБД, которая развернута на сервере баз данных ЦКП «Биоинформатика» под управлением CentOS Linux.

Для разработки SpikeDroidDB мы использовали следующие модули Drupal 8: Conditional fields – позволяет задавать правила появления/сокрытия полей в зависимости от установленных условий; Display suit – расширяет возможности представлений материалов контента Drupal;

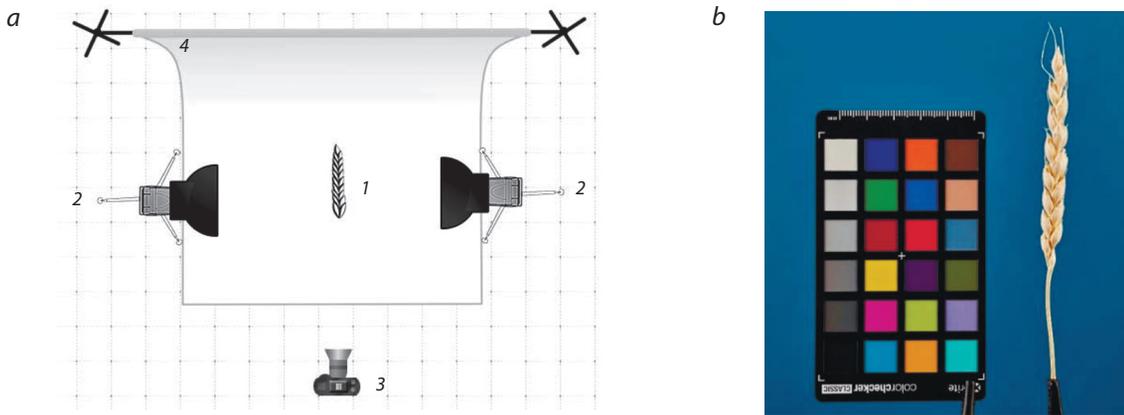


Fig. 2. Method of wheat ear photography in which the ear is placed vertically against a blue background.

(a) Location of the camera and lamps relative to the subject: 1, ear; 2, lamps; 3, camera; 4, paper background. (b) An image obtained by this method.

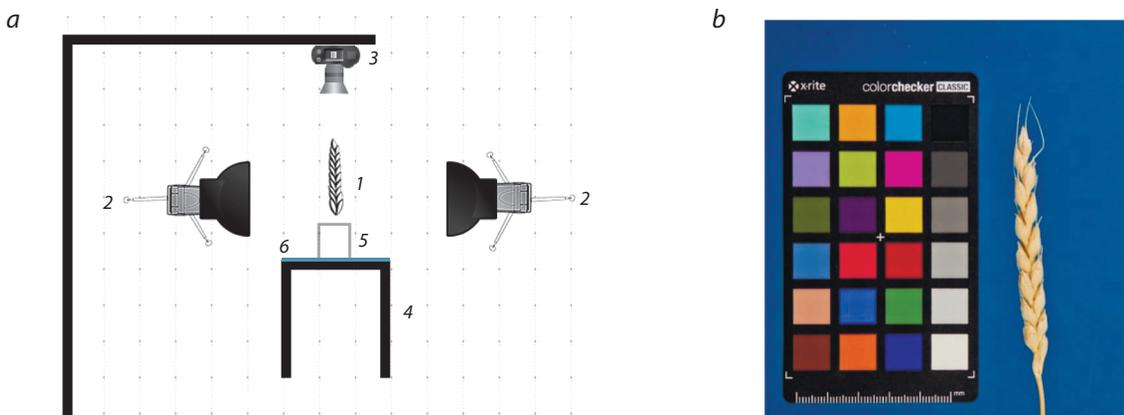


Fig. 3. Method of wheat ear photography in which the ear is placed vertically against a blue background.

(a) Location of the camera and lamps relative to the subject: 1, ear; 2, lamps; 3, camera fixed on a stand; 4, stage; 5, light table; 6, background. (b) An image obtained by this method.

Field_group – дает возможность группировать поля для управления ими как единым целым; Geolocation – добавляет новый тип полей-геолокаций, что позволяет использовать Google Places API; Charts – модуль для создания диаграмм и графиков.

Web-интерфейс системы SpikeDroidDB разработан при помощи технологии адаптивной верстки, что обеспечивает возможность работы системы с различных типов устройств: мобильных телефонов, персональных или планшетных компьютеров.

Растительный материал

В работе использованы межвидовые гибриды гексаплоидных пшениц. Форму колоса изучали у растений F_2 гибридов от скрещивания австралийского сорта мягкой пшеницы Triple Dirk с образцом KU506 китайской пшеницы *Triticum yunnanense* (син. *Triticum spelta* ssp. *yunnanense* (King ex S.L. Chen) N.P. Gontsch.). Растения выращивали при индивидуальной изоляции в гидропонной теплице при стандартных условиях влажности, температуры и освещения. Анализ структуры колоса (длина, шири-

на, остистость–безостость) проводили согласно стандартной методике. Плотность колоса определяли по формуле $D = [(A-1) \times 10]/B$, где $(A-1)$ – число колосков в колосе без верхушечного колоска; B – длина (см) стержня колоса (Фляксбергер, 1935).

Результаты и обсуждение

Модуль интерфейса системы SpikeDroidDB

Главная страница системы SpikeDroidDB расположена по адресу <http://spikedroid.biores.cytogen.ru/>. Она содержит краткую информацию о базе данных, ссылки для входа в систему или регистрации и ссылки на основные блоки информации в базе данных. Пользователь может получить доступ к базе, зарегистрировавшись на сайте. Зарегистрированный пользователь имеет возможность добавлять и аннотировать собственные растения. Для того чтобы просмотреть список растений, информация о которых доступна в базе, необходимо с главной страницы перейти по ссылке Plants. После этого осуществляется переход на страницу списка растений (рис. 4).

Plants

Sowing number: First parent:

Second parent: Generation: F

Apply

Sowing number	First parent	Second parent	Spikes	Generation	Environment	Collection	QR code
8798	TDB	KU506	0432012415	F2	Novosibirsk	Wheat ear collection of Goncharov N.P.	
8861	TDB	KU506	2542995528	F2	Novosibirsk	Wheat ear collection of Goncharov N.P.	
6450			4966434440	F1	Novosibirsk	Wheat ear collection of Goncharov N.P.	

Fig. 4. Visualization of the list of plants in the information system SpikeDroidDB.

На этой странице представлены сведения о растениях в виде таблицы, в колонках которой отображаются следующие параметры: посевной номер, данные о родителях, ссылка на информацию о колосьях, поколение, сведения о месте произрастания и коллекции растений. В крайней правой колонке для каждого растения приведена ссылка на его QR-код. QR-код является матричным (двумерным) штрих-кодом, который может быть сканирован камерой мобильного устройства. В нашей базе он присваивается каждому растению (см. рис. 4), может быть распечатан на бумаге и размещен на конверте с образцами колосьев. QR-код представляет собой закодированную интернет-ссылку на запись БД, соответствующую растению, и может быть прочитан с помощью мобильного устройства (Генаев и др., 2012). С помощью QR-кода интерфейс SpikeDroidDB на мобильном устройстве позволяет быстро пройти по ссылке к записи образца, хранящегося в конверте, и внести информацию об измеренных фенотипических параметрах растений в ходе эксперимента непосредственно в базу данных, минуя записи в полевых и лабораторных журналах.

На странице описания растения (рис. 5) отображается информация о генотипе растения, данные о месте

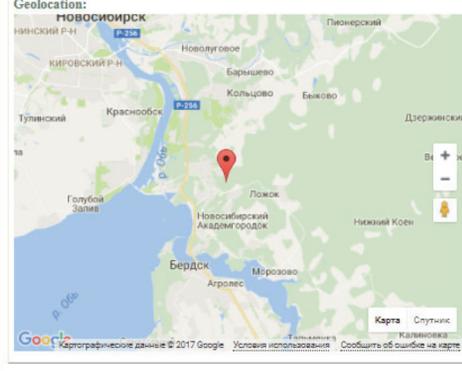
Sowing number: 8832	QR code
First parent*: Triple Dirk	
Second parent*: Triticum yunnanense	
Generation: F2	
Environment: Grow place: greenhouse	
Grow date: 2017-06-01T19:00:00	
Geolocation: 	
Hybrid: Yes	
Collection: Wheat ear collection of Goncharov N.P.	
Spikes 5957041040	

Fig. 5. Description of a plant in the information system SpikeDroidDB.

Plant: 8739	
Spike number: 1	<p>Images</p> 
Spike length: 7.00cm	
Spike front width: 1.10cm	
Spikelet count: 22	
Density index: 30.00	
Spike color: White	
Awn type: awnletted (short)	
Awn color: White	
Shape type: compact	
Hairiness at the site of attachment of the spikelet to the awn: Yes	
Hairiness on spike scales: Yes	
Hairiness on the axis of the spike: No	

Fig. 6. Description of an ear phenotype in the information system SpikeDroidDB.

произрастания (показаны с помощью метки на карте). Приводятся ссылки на описание фенотипа колоса и коллекции и QR-код для доступа к странице растения. В будущем мы планируем расширить описание окружающей среды, добавив фенологические данные и данные об условиях выращивания растений.

На странице описания фенотипа колоса отображаются характеристики колоса (рис. 6). Список всех возможных характеристик перечислен выше (см. табл. 1). С каждым колосом можно соотнести набор изображений. Для каждого изображения указывается протокол, с помощью которого оно было получено.

Информационное содержание SpikeDroidDB

Текущая версия базы данных содержит описание коллекции колосьев гибридов F_2 от скрещивания австралийского сорта мягкой пшеницы Triple Dirk с образцом KU506 китайской пшеницы *Triticum yunnanense* и их родительских форм. Коллекция включает в себя 104 растения, для которых получено 230 изображений колосьев. Аннотирование колосьев осуществлялось экспертом по списку морфологических характеристик, приведенных в табл. 1.

Результаты разделения колосьев по некоторым признакам представлены в табл. 2. Видно, что доля растений с

компактным колосом во втором поколении существенно меньше (6%), чем двух других типов колосьев (34% для нормального и 60% для спельтоидного колоса). Проанализировав данные табл. 2, можно определить тип наследования имеющихся в БД признаков. При этом можно сделать вывод, что компактная форма колоса контролируется дигенно двумя рецессивными генами ($\chi^2_{1;15} = 0.04$), безостость и опушение на месте прикрепления колоса к оси – моногенно по доминантному типу ($\chi^2_{3;1}$ равны 0.21 и 0.82 соответственно), опушение на оси колоса контролируется двумя доминантными генами ($\chi^2_{15;1} = 3.32$).

На рис. 7 показано рассеяние колосьев гибридов F_2 различной формы по длине и ширине. Ширина спельтоидных колосьев, как правило, составляет менее 1 см, а компактных, наоборот, превышает 1 см. Нормальный тип колоса демонстрирует высокое разнообразие как по длине (от 6 до 11 см), так и по ширине (от 0.7 до 1.5 см).

Гистограмма распределения колосьев по плотности D (см. Материалы и методы) для F_2 гибридов от скрещивания австралийского сорта мягкой пшеницы Triple Dirk с образцом KU506 китайской пшеницы *T. yunnanense* представлена на рис. 8. Средние значения этого признака для F_2 гибридов составили 22.43 дм^{-1} , для родителей Triple Dirk и KU506 – 20.40 и 29.66 дм^{-1} соответственно.

Table 2. Sorting of ears of F₂ hybrids from the crossing of the Australian soft wheat variety Triple Dirk to the KU506 accession of Chinese wheat *T. yunnanense* by various characters

Character	Character value	Number of spikes
Spike shape	Compact	6
	Normal	35
	Speltoid	63
Awn condition	Awnless	80
	Short-awned	24
Hairiness on spike scales	Present	68
	Absent	36
Hairiness on the axis of the spike	Present	93
	Absent	11
Hairiness at the site of attachment of the spikelet to the axis	Present	74
	Absent	30

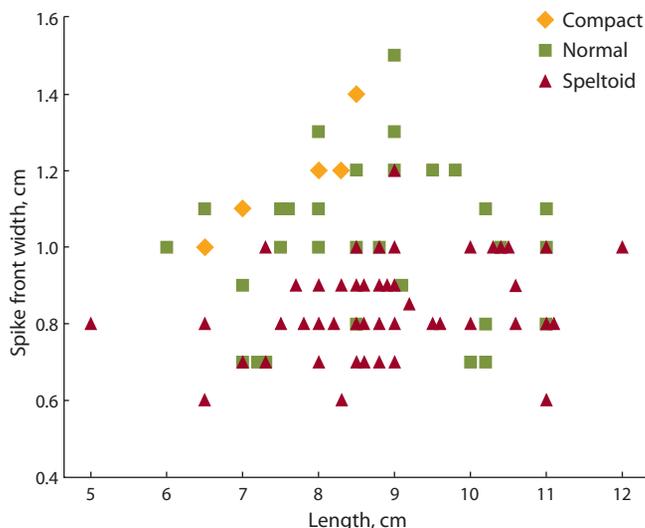


Fig. 7. Ear width– length scatterplot of F₂ hybrids from the crossing of the Australian soft wheat variety Triple Dirk to the KU506 accession of Chinese wheat *T. yunnanense*. The legend shows symbolic designations of ear types.

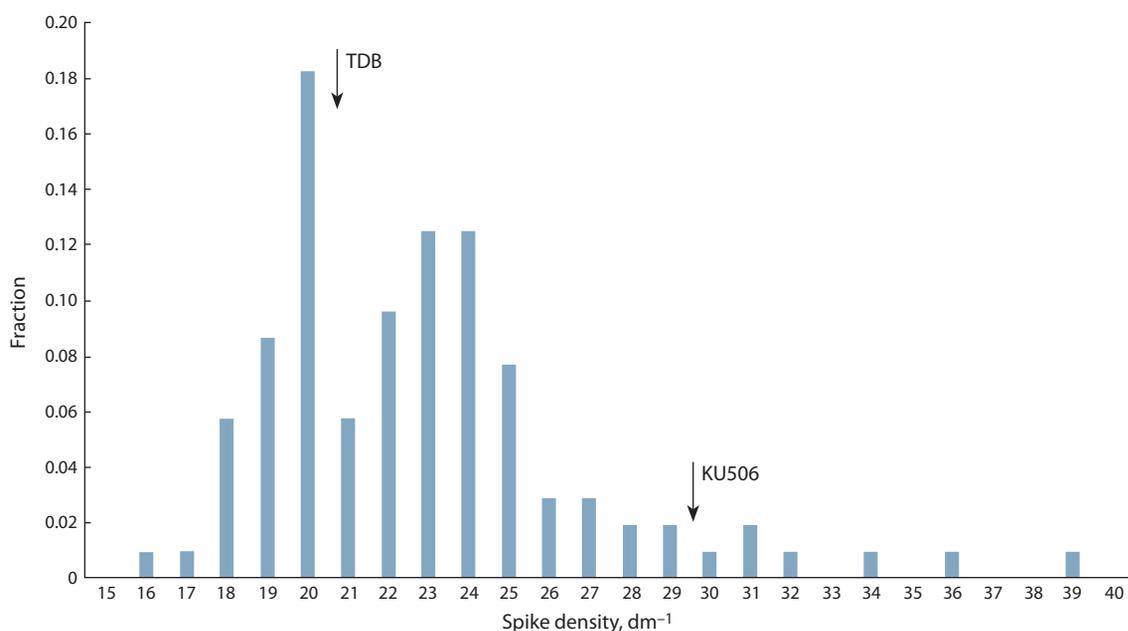


Fig. 8. Ear density (D) distribution of ears of F₂ hybrids from the crossing of the Australian soft wheat variety Triple Dirk to the KU506 accession of Chinese wheat *T. yunnanense*. Arrows indicate the mean values of this trait for parental genotypes.

На гистограмме хорошо заметны два больших пика, один из которых соответствует низкой плотности колоса (20 дм⁻¹), а другой – более высокой (23.5 дм⁻¹). Это свидетельствует о расщеплении популяции F₂ по плотности колоса на две группы.

Заклучение

Настоящая работа демонстрирует полезность компьютерных подходов для сбора, хранения, идентификации и классификации информации, связанной с признаками структуры колоса пшеницы, которые интересуют исследователей при работе с зерновыми злаками, что, как известно, очень трудно сделать «вручную».

Предлагаемая методика, реализованная в виде информационной системы SpikeDroidDB, несомненно, будет полезным инструментом как при всестороннем анализе коммерческих сортов, определенных образцов и селекционного материала разного уровня селектуемости, так и при проведении генетического анализа в гибридных популяциях. Гибридная комбинация, используемая в этом исследовании в качестве модельной, позволила оценить возможности предлагаемой системы и отработать оптимальные режи-

мы фотосъемки. Ее дальнейшие испытания должны быть проведены с акцентом на сбор новых данных без «ручного труда» исследователей, обогащение базы данных новой точной информацией и возможность ее использования более широким кругом исследователей.

Acknowledgments

The development of the SpikeDroidDB database structure and interface and of protocols for obtaining digital images of ears were supported by the Russian Science Foundation, project 17-74-10148. The database was implemented on the equipment of the Bioinformatics Shared Access Center with the support of State Budgeted Project 0324-2018-0017.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- 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.
- Amagai Y., Burdenyuk-Tarasevych L.A., Goncharov N.P., Watanabe N. Microsatellite mapping of the loci for false glume and semi-compact spike in *Triticum* L. *Genet. Resour. Crop Evol.* 2017;64:2105-2115. DOI 10.1007/s10722-017-0500-x.
- Boden S.A., Cavanagh C., Cullis B.R., Ramm K., Greenwood J., Finnegan E.J., Trevaskis B., Swain S.M. *Ppd-1* is a key regulator of inflorescence architecture and paired spikelet development in wheat. *Nature Plants.* 2015;1:14016. DOI 10.1038/nplants.2014.16.
- Dobrovolskaya O., Pont C., Sibout R., Martnek P., Badaeva E., Murat F., Chosson A., Watanabe N., Prat E., Gautier N., Gautier V., Poncet C., Orlov Yu., Krasnikov A., Berges H., Salona E., Laikova L., Salse J. FRIZZY PANICLE drives supernumerary spikelets in bread wheat. *Plant Physiol.* 2015;167(1):189-199. DOI 10.1104/pp.114.250043.
- Fljaksberger K.A. Wheats – Genus *Triticum* L. pr. p. *Kulturnaya flora SSSR. T. 1. Khlebnnye zlaki.* [Cultural flora of the USSR. Vol 1. Cereals.]. Moscow; Leningrad: Sel'hozgiz Publ., 1935;19-434. (in Russian)
- Genaev M.A., Doroshkov A.V., Pshenichnikova T.A., Morozova E.V., Simonov A.V., Afonnikov D.A. Informational support of the breeding experiment in wheat in the WheatPGE system. *Matematicheskaya biologiya i bioinformatika = Mathematical Biology and Bioinformatics.* 2012;7(2):410-424. (in Russian)
- Goncharov N.P. *Sravnitel'naya genetika pshenits i ikh sorodichey* [Comparative genetics of wheat and their relatives]. Novosibirsk: "Geo" Publ., 2012;523. (in Russian)
- Jantasuriyarat C., Vales M.I., Watson C., Riera-Lizarazu O. Identification and mapping of genetic loci affecting the free-threshing habit and spike compactness in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Theor. Appl. Genet.* 2004;108(2):261-273. DOI 10.1007/s00122-003-1432-8.
- Konopatskaia I., Vavilova V., Blinov A., Goncharov N.P. Spike morphology genes in wheat species (*Triticum* L.). *Proc. Latv. Acad. Sci. Sect. B.* 2016;70(6):345-355. DOI 10.1515/prolas-2016-0053.
- Nalam V.J., Vales M.I., Watson C., Johnson E.B., Riera-Lizarazu O. Map-based analysis of genetic loci on chromosome 2D that affect glume tenacity and threshability, components of the free-threshing habit in common wheat (*Triticum aestivum* L.). *Theor. Appl. Genet.* 2007;116(1):135-145. DOI 10.1007/s00122-007-0653-7.
- Sood S., Kuraparthi V., Bai G., Gill B.S. The major threshability genes soft glume (*sog*) and tenacious glume (*Tg*), of diploid and polyploid wheat, trace their origin to independent mutations at non-orthologous loci. *Theor. Appl. Genet.* 2009;119(2):341-351. DOI 10.1007/s00122-009-1043-0.
- Sreenivasulu N., Schnurbusch T. A genetic playground for enhancing grain number in cereals. *Trends Plant Sci.* 2012;17(2):91-101. DOI 10.1016/j.tplants.2011.11.003.
- Strange H., Zwigelaar R., Sturrock C., Mooney S.J., Doonan J.H. Automatic estimation of wheat grain morphometry from computed tomography data. *Funct. Plant Biol.* 2015;42(5):452-459. DOI 10.1071/FP14068.
- Youssef H.M., Mascher M., Ayoub M.A., Stein N., Kilian B., Schnurbusch T. Natural diversity of inflorescence architecture traces cryptic domestication genes in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Genet. Resour. Crop Evol.* 2017;64(5):843-853. DOI 10.1007/s10722-017-0504-6.