

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

M.A. Genaev¹✉, E.G. Komyshev¹, Fu Hao^{2,3}, V.S. Koval¹, N.P. Goncharov^{1,4}, D.A. Afonnikov^{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 Selekcii = 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 плодоносных 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 domestikацией 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

Таблица 1. Описание фенотипа колоса

Наименование атрибута	Тип данных	Краткое описание	Термин онтологии CropOntology.org
Spike number	int	Номер колоса в растении, первый номер присваивается главному колосу	
Spike length	real	Длина колоса, единица измерения – см	CO_321:0000056
Spike front width	real	Ширина лицевой стороны колоса, единица измерения – см	
Spike side width	real	Ширина боковой стороны колоса, единица измерения – см	
Spikelet count	int	Количество колосков, единица измерения – штука	CO_321:0000058
Density index	real	Плотность колосков. $D = [(A-1) \times 10]/B$, где (A-1) – число колосков в колосе без верхушечного колоска; B – длина стержня колоса, см	CO_321:0000055
Spike color	set	Цвет колоса: красный/черный/белый	
Hairiness on spike scales	bool	Опушение на колосковых чешуях: есть/нет (выбор из двух вариантов)	
Hairiness on the axis of the spike	bool	Опушение на оси колоса: есть/нет (выбор из двух вариантов)	
Hairiness at the site of attachment of the spikelet to the awn	bool	Опушение на месте прикрепления колоска к оси: есть/нет (выбор из двух вариантов)	
Awn type	set	Тип остей: безостый, остистый (длина остей длиннее или равна длине колоса), короткоостистый (длина остей короче, чем длина колоса), полустистый (вверх длина остей длиннее, чем вниз)	CO_321:0000027
Awn color	set	Цвет остей: красный/белый/черный/фиолетовый/янтарный/смешанный	CO_321:0000960
Spike threshability	bool	Ломкоколосость	CO_321:0000659
Shape type	set	Форма колоса: спельта/норма/компактная	

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 располагается вертикально перед синим фоном, второй вариант съемки предусматривает горизонтальное положение колосьев на стекле над синим фоном.

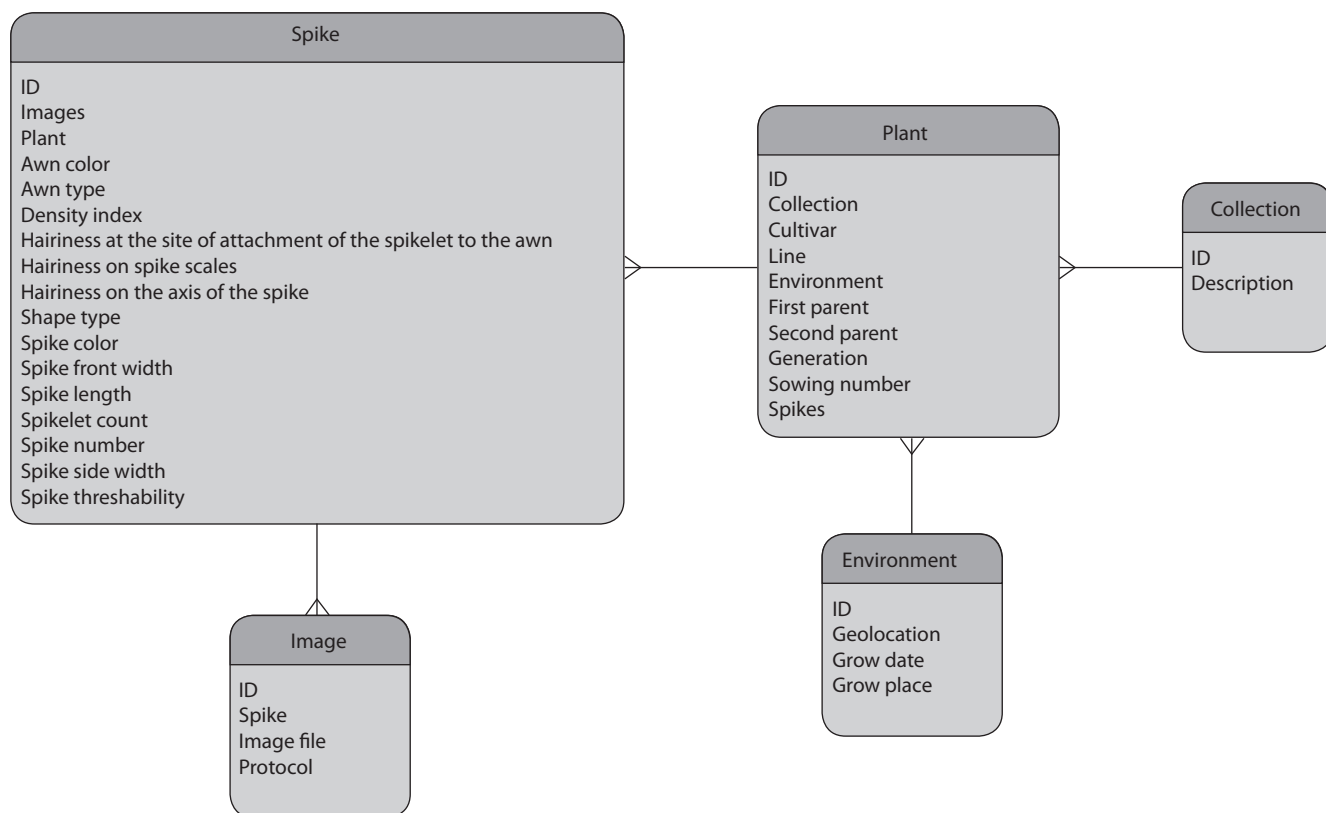


Рис. 1. Реляционная модель данных в базе SpikeDroidDB.

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, удастся 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 suite – расширяет возможности представлений материалов контента Drupal;

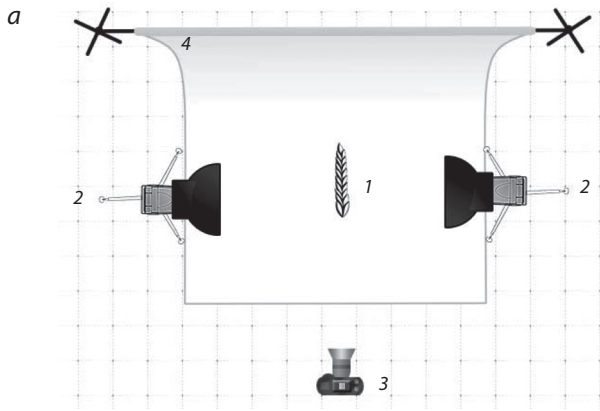


Рис. 2. Методика съемки колосьев пшеницы, при которой колос располагается вертикально перед синим фоном.

a – схема размещения камеры и источников света относительно объекта съемки (1 – колос, 2 – источники света, 3 – камера, 4 – бумажный фон); *б* – изображение, полученное в результате выполнения протокола.

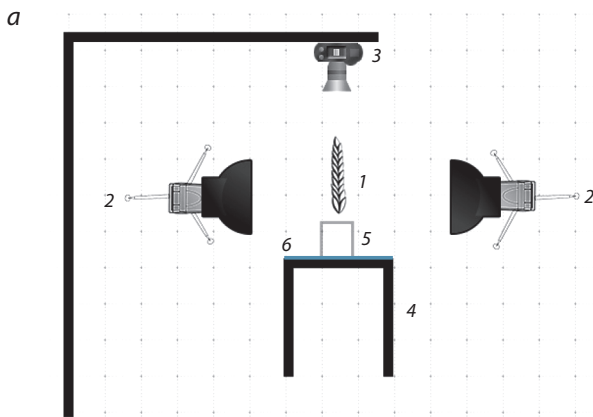


Рис. 3. Методика съемки колосьев пшеницы, при которой колос располагается горизонтально на стекле над синим фоном.

a – схема размещения камеры и источников света относительно объекта съемки (1 – колос, 2 – источники света, 3 – камера, зафиксированная на стойке типа «журавль», 4 – предметный стол, 5 – просветной стол, 6 – фон); *б* – изображение, полученное в результате выполнения протокола.

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 F₂ 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




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.	

Рис. 4. Визуализация списка растений в информационной системе 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


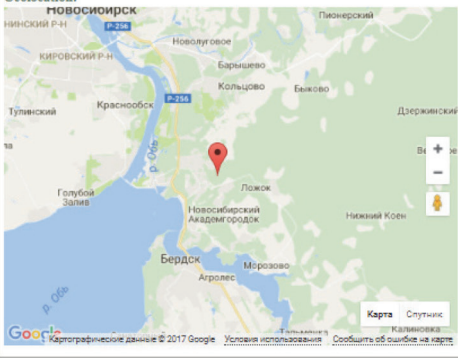
Sowing number: 8832	QR code
First parent*: Triple Dirk	
Second parent*: Triticum yunnanense	
Generation: F2	
Environment: Grow place: greenhouse	
Grow date: 2017-06-01T19:00:00	
Geolocation: 	
Hybrid: Yes	
Collection: Wheat ear collection of Goncharov N.P.	
Spikes 5957041040	

Рис. 5. Страница описания растения в информационной системе 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	

Рис. 6. Страница описания фенотипа колоса в информационной системе 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

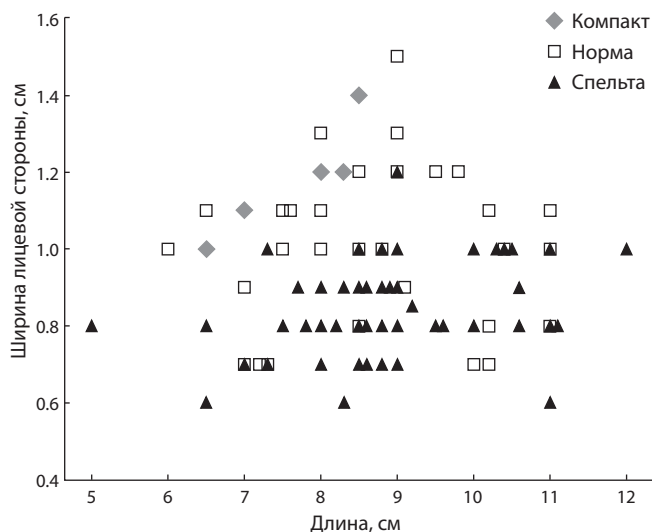
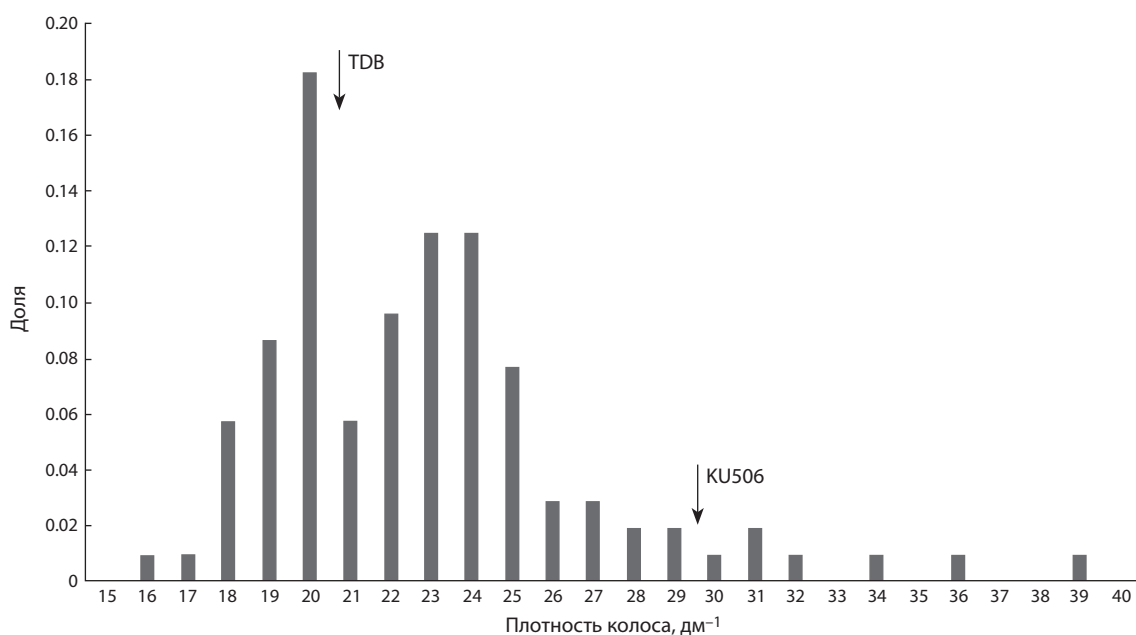
компактным колосом во втором поколении существенно меньше (6%), чем двух других типов колосьев (34% для нормального и 60% для спельтоидного колоса). Проанализировав данные табл. 2, можно определить тип наследования имеющихся в БД признаков. При этом можно сделать вывод, что компактная форма колоса контролируется 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.

Таблица 2. Разделение колосьев F₂ гибридов от скрещивания австралийского сорта мягкой пшеницы Triple Dirk с образцом KU506 китайской пшеницы *T. yunnanense* по ряду признаков

Признак	Значение признака	Кол-во колосьев
Форма колоса	Компакт	6
	Норма	35
	Спельта	63
Остистость	Безостый	80
	Короткоостистый	24
Опушение колосовой чешуи	Присутствует	68
	Отсутствует	36
Опушение на оси колоса	Присутствует	93
	Отсутствует	11
Опушение на месте прикрепления колоса к оси	Присутствует	74
	Отсутствует	30

**Рис. 7.** Распределение гибридов F₂ от скрещивания австралийского сорта мягкой пшеницы Triple Dirk с образцом KU506 китайской пшеницы *T. yunnanense* по длине и ширине колоса.**Рис. 8.** Распределение колосьев F₂ гибридов от скрещивания австралийского сорта мягкой пшеницы Triple Dirk с образцом KU506 китайской пшеницы *T. yunnanense* по плотности колоса (*D*).

Стрелками указаны средние значения этого признака для родительских генотипов.

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.

Заключение

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 трудоемко делать «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.

Благодарности

Разработка структуры базы данных и интерфейса системы SpikeDroidDB, протоколы получения цифровых изображений колоса выполнены в рамках проекта РНФ 17-74-10148. Для реализации БД использованы вычислительные ресурсы ЦКП «Биоинформатика» (при поддержке бюджетного проекта № 0324-2018-0017).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Генаев М.А., Дорошков А.В., Пшеничникова Т.А., Морозова Е.В., Симонов А.В., Афонников Д.А. Информационная поддержка селекционно-генетического эксперимента у пшеницы в системе WheatPGE. *Мат. биология и биоинформатика*. 2012;7(2): 410-424.
- Гончаров Н.П. Сравнительная генетика пшениц и их сородичей. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2012.
- Фляксберггер К.А. Пшеница – род *Triticum* L. рг. р. Хлебные злаки. Культурная флора СССР. Т. 1. М.; Л.: Сельхозгиз, 1935;19-434.
- 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.
- 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., Kuruparth 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., Zwiggelaar 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.