

Анализ цветowych и текстурных характеристик зерен злаков на цифровых изображениях

Е.Г. Комышев^{1, 2}✉, М.А. Генаев^{1, 2, 3}, Д.А. Афонников^{1, 2, 3}

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

² Курчатовский геномный центр Федерального исследовательского центра Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

³ Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия

✉ e-mail: komyshev@bionet.nsc.ru

Аннотация. Цвет оболочки зерен злаков – важный признак, характеризующий содержащиеся в ней пигменты и метаболиты. Оболочка зерна служит основным барьером между зерном и внешней средой, поэтому с ее характеристиками связан ряд важных биологических функций: поглощение влаги, жизнеспособность зерна, устойчивость к предуборочному прорастанию. Наличие пигментов в оболочке влияет на различные технологические свойства зерна. Цветовые характеристики, как и внешний вид оболочки, зерна, – важный индикатор заболеваний растений. Цвет зерна давно используется в систематике пшеницы для описания ее ботанических разновидностей, и для некоторых систем это одна из основных характеристик. Генетический контроль формирования окраски зерен и других органов растений осуществляется генами, кодирующими ферменты, вовлеченные в биосинтез пигментов, и регуляторными генами. Для ряда пигментов эти гены исследованы достаточно хорошо, однако для некоторых пигментов, например меланина, обуславливающего черную окраску зерен у ячменя, молекулярные механизмы биосинтеза еще слабо изучены. При исследовании механизмов генетического контроля окраски зерен селекционеры и генетики постоянно сталкиваются с необходимостью оценки цветowych характеристик их оболочки. К техническим средствам решения этой задачи относятся спектрофотометры, спектрометры, гиперспектральные камеры. Однако эти камеры дорогостоящие, в особенности с высоким разрешением, как пространственным, так и спектральным. Альтернативой является использование цифровых фотокамер, позволяющих получать высококачественные изображения с высоким пространственным и цветowym разрешением. В связи с этим в последнее время в области фенотипирования растений интенсивно развиваются методы оценки цветowych и текстурных характеристик зерен злаков, основанные на анализе двумерных изображений, полученных цифровыми камерами. Данный мини-обзор посвящен основным задачам, связанным с анализом цветowych и текстурных характеристик зерен злаков, методам их описания на основе цифровых изображений.

Ключевые слова: цвет; текстура; цифровые изображения; анализ изображений; зерна злаков.

Для цитирования: Комышев Е.Г., Генаев М.А., Афонников Д.А. Анализ цветowych и текстурных характеристик зерен злаков на цифровых изображениях. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2020;24(4):340-347. DOI 10.18699/VJ20.626

Analysis of color and texture characteristics of cereals on digital images

E.G. Komyshev^{1, 2}✉, M.A. Genaev^{1, 2, 3}, D.A. Afonnikov^{1, 2, 3}

¹ Institute of Cytology and Genetics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

² Kurchatov Genomic Center of the Institute of Cytology and Genetics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

³ Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

✉ e-mail: komyshev@bionet.nsc.ru

Abstract. The color of the grain shell of cereals is an important feature that characterizes the pigments and metabolites contained in it. The grain shell is the main barrier between the grain and the environment, so its characteristics are associated with a number of important biological functions: moisture absorption, grain viability, resistance to pre-harvest germination. The presence of pigments in the shell affects various technological properties of the grain. Color characteristics, as well as the appearance of the grain shell are an important indicator of plant diseases. In addition, the color of the grains serves as a classifying feature of plants. Genetic control of the color formation of both grains and other plant organs is exerted by genes encoding enzymes involved in the biosynthesis of pigments, as well as regulatory genes. For a number of pigments, these genes are well understood, but for some pigments, such as melanin, which causes the black color of grains in barley, the molecular mechanisms of biosynthesis are still poorly understood. When studying the mechanisms of genetic control of grain color, breeders and

geneticists are constantly faced with the need to assess the color characteristics of their shell. The technical means of addressing this problem include spectrophotometers, spectrometers, hyperspectral cameras. However, these cameras are expensive, especially with high resolution, both spatial and spectral. An alternative is to use digital cameras that allow you to get high-quality images with high spatial and color resolution. In this regard, recently, in the field of plant phenotyping, methods for evaluating the color and texture characteristics of cereals based on the analysis of two-dimensional images obtained by digital cameras have been intensively developed. This mini-review is devoted to the main tasks related to the analysis of color and texture characteristics of cereals, and to methods of their description based on digital images.

Key words: color; texture; digital images; image analysis; cereal grains.

For citation: Komyshev E.G., Genaev M.A., Afonnikov D.A. Analysis of color and texture characteristics of cereals on digital images. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Selekcii* = *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2020;24(4):340-347. DOI 10.18699/VJ20.626

Введение

Цвет оболочки зерен злаков – важный признак, он характеризует пигменты и метаболиты, содержащиеся в ней. Фиолетовая и голубая окраска зерен определяется наличием антоцианов, желтоватый цвет может быть вызван присутствием каротиноидов. Окраска семян в красновато-коричневый или темно-коричневый цвет обусловлена наличием в их оболочке флавоноидов, таких как проантоцианидины и флорафены (Аджиева и др., 2015; Lachman et al., 2017). Взаимосвязь между окраской оболочки и содержанием этих веществ установлена экспериментально. Показаны значимые корреляционные зависимости между цветом оболочки зерна риса и ее антиоксидантными свойствами, а также содержанием фенолов и флавоноидов (Shen et al., 2009). Содержание фенолов, флавоноидов, антоцианов, β-каротиноидов, лютеинов значительно различается для зерен с разной окраской у кукурузы (Žilić et al., 2012). Флавоноиды, антоцианы и каротиноиды обладают рядом ценных свойств, являются антиоксидантами и влияют на пищевую ценность зерна. Добавление в муку отрубей пшеницы с пурпурным перикарпием или голубым алейроновым слоем позволяет улучшить качество хлебопекарной продукции за счет вкусовых, текстурных и цветовых характеристик (Macháľková et al., 2017). В связи с этим к сортам и линиям с разнообразной окраской зерен в последнее время выражен большой интерес со стороны пищевой индустрии (Хлесткина и др., 2016; Corrêa et al., 2019).

Оболочка зерна – это основной барьер между зерном и внешней средой, поэтому с ее характеристиками связан ряд важных биологических функций: поглощение влаги, жизнеспособность зерна, устойчивость к предуборочному прорастанию (Souza, Marcos-Filho, 2001). Наличие пигментов в оболочке влияет на различные технологические свойства зерна. Например, флорафены (конденсированные танины), придающие окраске перикарпия зерна красный цвет, положительно влияют на продолжительность состояния покоя зерна и препятствуют его предуборочному прорастанию (Flintham et al., 2002). Ввиду этого генотипы пшеницы с красной окраской зерен используются в селекции в качестве доноров генов устойчивости к предуборочному прорастанию зерна (Крупнов и др., 2012; Fakhongphan et al., 2016). У риса цвет оболочки зерен (интенсивность красной, зеленой и голубой компонент цвета) значимо связан с такими характеристиками качества, как прозрачность зерна и доля разрушенных зерен (Septiningsih et al., 2003).

Цветовые характеристики, как и внешний вид оболочки зерна, – также важный индикатор заболеваний растений. Например, заражение растений фузариозом выражается в виде розовой или синеватой окраски на оболочке зерна у пшеницы и ячменя (McMullen et al., 1997). Другое заболевание, черный зародыш пшеницы, характеризуется появлением черных пятен в области зародыша (Draz et al., 2016).

Цвет зерен может также быть классифицирующим признаком растений. Еще в 1885 г. F. Körnicke предложил использовать цвет зерна для описания ботанических разновидностей пшеницы (Körnicke, Werner, 1885). Во Всероссийском институте генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова используется система ботанических разновидностей для пшеницы (Дорофеев и др., 1979), в которой цвет зерна – одна из основных характеристик.

Генетический контроль формирования окраски как зерен, так и других органов растений осуществляется генами, кодирующими ферменты, вовлеченные в биосинтез пигментов, а также регуляторными генами (Хлесткина, 2014; Lachman et al., 2017; Шоева и др., 2018). Для ряда пигментов эти гены исследованы достаточно хорошо, вплоть до полной расшифровки их нуклеотидных последовательностей и расположения в геноме. Однако для некоторых пигментов, таких, например, как меланин, вызывающий черную окраску зерен ячменя, молекулярные механизмы биосинтеза еще полностью не известны (Glagoleva et al., 2017; Шоева и др., 2018).

При изучении механизмов генетического контроля окраски зерен селекционеры и генетики сталкиваются с необходимостью оценки цветовых характеристик их оболочки. К техническим средствам решения этой задачи относятся прежде всего спектрофотометры, позволяющие с высокой точностью характеризовать как цветовые, так и текстурные характеристики зерен. Они применяются давно и успешно, служат стандартами для оценки цвета биологических объектов (Black, Panozzo, 2004; Garg et al., 2016; Macháľková et al., 2017). Другим подходом является использование спектрометров, имеющих диапазон длин волн как в видимом, так и ближнем инфракрасном участках спектра (гиперспектральных камер видимого и ближнего инфракрасного диапазонов) (Black, Panozzo, 2004; ElMasry et al., 2019). Но это дорогостоящие камеры, особенно камеры с высоким разрешением, как пространственным, так и спектральным. Альтернатива – использование цифровых фотокамер, обеспечивающих высококачественные изображения с высоким пространственным и цветовым разрешением. Стоимость цифровых

фотокамер постоянно снижается, и в настоящее время они широкодоступны, а съемка даже на любительскую камеру позволяет делать снимки высокого разрешения и качества. В последнее время в области фенотипирования растений интенсивно развиваются методы оценки цветовых и текстурных характеристик зерен злаков, основанные на анализе двумерных изображений, полученных цифровыми камерами.

В настоящем мини-обзоре мы представим основные направления применения методов компьютерного анализа цветовых и текстурных характеристик зерен злаков, приведем примеры их практического использования.

Задачи, связанные с анализом цветовых и текстурных характеристик изображений зерен

Одно из актуальных направлений применения анализа изображений зерен – это классификация. Ее цели могут быть разными. Например, необходимо отнести растение по признакам цвета/текстуры его зерна к одному из нескольких возможных генотипов (Pourgeza et al., 2012; Olgun et al., 2016). В таких задачах часто к параметрам цвета и текстуры дополнительно используют характеристики размера и формы зерен (Majumdar, Jayas, 2000; Chaugule, Mali, 2014; Sabanci et al., 2016).

Похожая задача – сортировка зерен по качеству на основании цвета и текстуры (Pearson, 2010). Для массового анализа большого количества зерен разрабатываются сортеры, позволяющие отделить здоровые зерна от поврежденных и от различного мусора. Работам в области оценки качества зерен на основе анализа изображений, включая и гиперспектральные, посвящен обзор (Huang et al., 2015). В исследовании Z. Gong с коллегами (2015) представлены также инженерные подходы для решения задачи определения качества зерна.

Иногда рассматривают разделение зерен только по их типу окраски (красная или белая). Так, в работе (Ram et al., 2002) с помощью спектрофотометра и спектрометра построена процедура для определения цвета оболочки зерна у красnozерных и белозерных сортов пшеницы. T.N. McCaig с коллегами (1993) провели классификацию на красnozерные и белозерные сорта с помощью спектрометрических данных для 262 генотипов как мягкой, так и твердой пшеницы. На основе анализа цветовых характеристик определяются также зерна, пораженные патогенами (Ahmad et al., 1999; Goriewa-Duba et al., 2018) или механически (Delwiche et al., 2013). Необходимо отметить, что наравне с анализом изображений при решении указанных задач часто применяются методы машинного обучения и искусственного интеллекта (Patrício, Rieder, 2018).

Системы кодировки цвета

Цвет поверхности – характеристика ее спектральной отражательной способности, которая представляет собой результат действия многих факторов, таких как поглощение излучения от источника света на разных длинах волн, его отражение и рассеяние (Форсайт, Понс, 2004). Наиболее полно параметры отражения или поглощения излучения в разных интервалах длин волн могут быть оценены спектрометрами. В большинстве же обычных

цифровых камер используются матрицы, реагирующие на отраженное излучение в диапазоне видимых глазу длин волн (400–780 нм). Следует отметить, что восприятие цвета человеческим глазом имеет свои особенности, связанные со строением зрительного аппарата: между восприятием цвета поверхностью глазом и ее спектральной отражательной способностью не существует однозначного соответствия. Например, один и тот же оттенок серого цвета может быть воспроизведен отраженным излучением с совершенно различными интенсивностями для разных длин волн.

При изучении человеческого восприятия цвета было выяснено, что достаточно трех основных цветов – красного, зеленого и синего, – чтобы при их смешивании в различных пропорциях получить все остальные воспринимаемые человеком цвета (Форсайт, Понс, 2004). Этот вывод подтверждается строением человеческого глаза, так как человеческая сетчатка глаза имеет три вида рецепторов (колбочек), ответственных за цветное зрение.

Для цифрового представления цветов разработаны различные цветовые модели (цветовые пространства). Цветовая модель задает систему координат, в которой однозначно определяются цвета. Существует целый ряд различных цветовых моделей, которые были разработаны для наилучшего способа описания цвета в таких системах, как телевидение, фото- и видеокамеры, цветная печать. Из наиболее часто используемых в анализе цифровых изображений растений необходимо отметить следующие.

Цветовая модель RGB – наиболее известное цветовое пространство, в котором цвет кодируется относительной интенсивностью трех его компонент: красной (R), зеленой (G) и синей (B). Эти компоненты описываются целыми числами, чаще всего от 0 до 256. Чем больше значения, тем выше интенсивность цвета (яркость). Цвета с одинаковыми значениями компонент являются оттенками серого цвета. Такое представление используется в основном в мониторах и цифровых камерах.

Модель HSV (HSB) – цветовое пространство, предложенное в середине 1970-х гг. и использующее три компоненты цвета. Цветовой тон (Hue) варьирует от 0 до 360 и определяет цветность (значения, близкие к 0 или 360, соответствуют красному цвету, 60 – желтому, 120 – зеленому, 180 – голубому, 240 – синему, 300 – малиновому). Насыщенность (Saturation) имеет тем большие значения, чем насыщенней оттенок цвета, а малые значения параметра соответствуют оттенкам серого. Яркость (Value/Brightness) принимает меньшие значения для темных цветов, большие – для ярких. Один из недостатков цветовых моделей HSV и RGB заключается в том, что количество различимых глазом уровней насыщенности и оттенков в этих цветовых пространствах уменьшается при приближении яркости (V) к нулю.

Модель CIE L*a*b* – это предложенное в 1976 г. Международной комиссией по освещению (International Commission on Illumination, CIE) цветовое пространство, обеспечивающее однородное изменение цветов с точки зрения человеческого зрения. Это означает, что кратное увеличение или уменьшение интенсивности цветовых компонент воспринимается человеком соответствующе. К примеру, двукратное увеличение компоненты яркости будет воспри-

ниматься человеческим глазом как двукратное увеличение яркости пикселя. Как и в HSV, в CIE $L^*a^*b^*$ значение яркости (компонента L^*) отделено от хроматической составляющей цвета (Pathare et al., 2013). Параметр L^* является приблизительной оценкой яркости. Параметр a^* принимает положительные значения для красноватых цветов и отрицательные – для зеленоватых, тогда как параметр b^* принимает положительные значения для желтоватых цветов и отрицательные – для голубоватых. Цветовая модель CIE $L^*a^*b^*$ нашла широкое применение в программном обеспечении для обработки изображений и цветокоррекции. Эта модель используется для результатов оценки характеристик цвета в спектрофотометрах.

Существует также целый ряд других цветовых пространств, их описание и характеристики можно найти в специальной литературе по анализу изображений (Фисенко В.Т., Фисенко Т.Ю., 2008; Домасев, Гнатюк, 2009). Компоненты для одного и того же цвета в различных системах связаны правилами преобразования, поэтому, зная значения цветовых компонент цвета в одной системе, всегда можно вычислить значения компонент этого цвета в других цветовых пространствах. Например, из значений компонент RGB можно вычислить значения цветовых компонент HSV и наоборот. Все это позволяет в зависимости от задачи выбрать ту или иную модель представления цвета изображения.

В задачах компьютерного зрения и анализа цветовых характеристик наиболее интересны такие цветовые модели, как HSV и $L^*a^*b^*$, в которых цвета представлены с точки зрения таких же понятий, которыми оперирует человек при описании цвета – цветового тона, насыщенности, яркости (светлоты).

Анализ цветовых характеристик зерен

Изображения, используемые при анализе зерен, как правило, получены цифровыми камерами в модели RGB в результате съемки в лабораторных условиях при контролируемом освещении. Зерна на изображении обычно располагаются на контрастном фоне таким образом, что между ними отсутствует касание (Sabanci et al., 2017; Goriewa-Duba et al., 2018). Этот протокол дает возможность использовать для анализа характеристики не только цвета и текстуры, но также формы и размера зерен. В некоторых исследованиях изучаются объемные образцы, в которых зерна плотно касаются друг друга (Pourgeza et al., 2012; Olgun et al., 2016). В таких работах, как правило, отдельные зерна не распознаются, определяются текстурные и цветовые характеристики всего образца.

В случае анализа изображений отдельных зерен необходимо выделить их образы. Для этого производят предварительную обработку изображений (сглаживание, удаление шума, посторонних объектов), сегментацию для идентификации областей изображений, соответствующих зернам. Затем выполняется извлечение количественных признаков изображений для этих областей. Следует отметить, что при получении изображений достаточно трудно контролировать условия освещения, особенно если съемка происходит не в условиях фотолaborаторий (Berry et al., 2018). Поэтому при анализе цветовых характеристик

изображений полезно применять цветовую коррекцию на основе специальных цветовых шаблонов – карточек, имеющих ячейки с заранее заданными стандартными цветами (Berry et al., 2018; Genaev et al., 2019; Alemu et al., 2020).

На изображении области, соответствующие зернам, состоят из сотен пикселей, каждый из которых обладает своими характеристиками цвета в выбранном цветовом пространстве (например, тремя значениями компонент R, G, B). Поэтому для описания цвета этих объектов наиболее часто используются статистические характеристики цветовых компонент. Прежде всего рассчитываются гистограммы распределений пикселей по интенсивности для каждой из цветовых компонент, независимо от других компонент и расположения пикселей на изображении. На основе гистограмм рассчитываются такие параметры, как среднее, дисперсия, асимметрия и эксцесс распределения пикселей по интенсивности для каждой цветовой компоненты (Ahmad et al., 1999; Majumdar, Jayas, 2000). Эти величины в дальнейшем применяются для описания цветовых свойств зерен.

Так, T. Pearson и D. Brabec (2008) разработали систему машинного зрения для автоматизированной оценки и сортировки зерен пшеницы и других зерновых в режиме реального времени. Изображения с разрешением 640×480 пикселей были получены с помощью камеры и для анализа передавались на персональный компьютер, контролирующей работу воздушного клапана, посредством которого осуществлялась сортировка. Классификационными признаками выступали гистограммы интенсивности, среднее и стандартное отклонение интенсивностей каналов RGB (в общей сложности 198 признаков для каждого образа зерна). Для классификации применялся линейный дискриминантный анализ. Точность системы при сортировке красных и белых зерен твердой пшеницы составила от 94 до 99 %, в зависимости от сорта пшеницы, скорости подачи и количества классификационных признаков.

N.S. Visen с коллегами (2002) сравнили точность различных архитектур простых и специализированных нейронных сетей в задаче классификации зерновых. На вход нейронных сетей подавались значения морфологических и цветовых признаков зерен пшеницы, ячменя, овса и ржи, рассчитанные на основе цветных изображений, полученных цифровой камерой. В качестве цветовых признаков рассчитывались характеристики распределения уровней серого для пикселей: среднее, медиана, мода и стандартное отклонение. Наилучшая средняя точность для различных культур в 98 % была достигнута с использованием специализированных вероятностных нейронных сетей.

В работе K. Goriewa-Duba с коллегами (2018) для изучения формы и цвета зерен шести видов пшеницы были получены цифровые изображения с планшетного сканера. Ученые исследовали влияние заражения эндофитными грибами на цвет семенной оболочки, а также оценивали цветовые характеристики зерен для ряда генотипов пшеницы, отличающиеся высоким генетическим разнообразием. Обработку изображений проводили с помощью программы ImageJ. Определялись такие характеристики формы, как площадь, периметр, округлость, соотноше-

ние главных осей, округлость и ряд других параметров. Цветовые признаки включали средние значения каналов цветовой модели RGB, HSI, $L^*a^*b^*$. Анализ главных компонент, проведенный для зерен различных генотипов, показал, что цветовые признаки зерен вносят существенный вклад в первую главную компоненту дисперсии и относятся к важнейшим при классификации пшениц на разные генотипы.

A. Alemu с коллегами (2020) провели анализ полногеномных ассоциаций нуклеотидных замен (GWAS) в популяции 192 генотипов твердых пшениц *Triticum durum* из Эфиопии с характеристиками формы и цвета зерен. Параметрами формы являлись длина и ширина зерен, а цвета – средние значения компонент в системе кодировки $L^*a^*b^*$. Для цветовых признаков выявлено 11 локусов количественных признаков (QTL): 1 – для компоненты a^* (располагался на хромосоме 2A), 5 – для компоненты b^* (хромосомы 1B, 3A, 4B, 5A, 7B) и 5 – для компоненты L^* (хромосомы 1A, 2A, 7A и 7B).

Характеристики текстуры изображений в задаче анализа зерен

Текстура – составляющая изображения, отображающая визуальные свойства поверхностей или объектов (шероховатость, наличие регулярных узоров). Понятие текстуры сложно формализуется, так как оно в значительной степени зависит от масштаба и не имеет каких-либо ограничений паттернов, из которых состоит. Лист на изображении – это объект, а листья – уже текстура. Можно выделить простые текстуры, которые состоят из упорядоченных узоров или правильных элементов – текстонов (Форсайт, Понс, 2004). Отличительная черта простой текстуры – регулярность, повторяемые или частично воспроизводимые элементы на некоторой поверхности или объекте. Другие текстуры могут иметь значительно более сложную структуру.

Для описания текстуры изображения применяются более сложные подходы по сравнению с анализом цвета, поскольку текстура отличается взаимным пространственным расположением пикселей с различной интенсивностью цветовых компонент. Как и цветовые, текстурные характеристики могут быть определены на основе статистических методов, позволяющих оценить такие свойства гистограммы характеристик исходного изображения, как среднее, дисперсия, асимметрия, эксцесс.

Характеристики текстуры определяются для одного канала изображения, как правило, изображения в градациях серого, т. е. от описания цветовых характеристик пикселя (три компоненты) переходят к описанию лишь только общей его интенсивности (одна компонента, $I(x, y)$, где x, y – координаты пикселя).

Для описания совместной встречаемости интенсивностей соседних пикселей на изображении вычисляется матрица совпадения уровней серого (GLCM, Grey Level Co-occurrence Matrix) (Приложение: табл. 1, формула 1)¹, представляющая собой гистограмму второго порядка (Haralick et al., 1973). Второй порядок означает, что матрица описывает распределение интенсивностей для пар

различных пикселей на изображении. Таким образом, учитываются сочетания интенсивностей для этих пар. Пример расчета матрицы совместной встречаемости уровней серого можно найти в работе (Астафуров др., 2014). На основе матрицы GLCM вычисляются статистики распределения ее элементов, таких как однородность, гомогенность, моменты инерции, корреляция, различные средние значения, дисперсия и энтропия (см. Приложение: табл. 2) (Majumdar, Jayas, 1999).

Матрица длин серий уровней серого (GLRM, Gray Level Run-length Matrix) (см. Приложение: табл. 1, формула 2) строится на основе информации о длине серий пикселей, имеющих одинаковую интенсивность (Galloway, 1975). Эти серии могут быть заданы различными уровнями яркости и направлением движения от одного пикселя к другому. На основе матрицы GLRM рассчитываются такие статистики, как неоднородность уровня серого, неоднородность длин серий, коэффициент серий, энтропия, обратный разностный момент, второй угловой момент, неравномерность уровня серого, неравномерность длин серий и другие характеристики (Haralick, 1979).

Еще один способ описания характеристик текстуры основан на использовании авторегрессионной модели, в которой интенсивность пикселя прогнозируется как взвешенная сумма четырех интенсивностей соседних пикселей (Szczypiński et al., 2015). Параметрами такой модели являются вес и дисперсия ошибки предсказания интенсивности пикселя. Существуют также методы описания текстуры, основанные на преобразованиях Фурье, Габора или вейвлет-преобразования (преобразования всплесков), которые применяются для того, чтобы охарактеризовать пространственное расположение пикселей различной интенсивности на изображении на основе его частотных характеристик или вейвлет-компонентов (Szczypiński et al., 2009). Приведенные выше характеристики позволяют сформировать свыше сотни числовых признаков текстуры изображений. Как правило, используется лишь часть из приведенных характеристик.

Примером использования текстурных характеристик при анализе зерен служит работа (Pourgeza et al., 2012). Авторы анализировали изображения зерен девяти сортов пшеницы, располагавшихся в контейнере, в условиях искусственного освещения флуоресцентной лампой. Для описания текстуры вычисляли матрицы для изображений в градациях серого: матрица совпадений уровней серого (GLCM), матрица длин серий серого (GLRM), описанные выше. Дополнительно брали три характеристики, которые определяются тем, насколько интенсивность центрального пикселя отличается от интенсивности соседних пикселей в матрице 3×3 . Локальные паттерны сходства (LSP, Local Similarity Patterns) (см. Приложение: табл. 1, формула 3) вычисляются на основе разницы интенсивностей центрального и соседнего пикселей. Если она не превышает порога SRR, то значение LSP соседнего пикселя устанавливается равным 1, в противном случае – 0. В результате обхода по часовой стрелке 8 пикселей получается вектор из нулей и единиц, который характеризует соответствие интенсивности центрального пикселя и всех его соседей. Еще одним параметром в этой работе стали локальные бинарные паттерны (LBP, Local Binary Patterns)

¹ Приложение см. по адресу:
<http://www.bionet.nsc.ru/vogis/download/pict-2020-24/appx3.pdf>

(см. Приложение: табл. 1, формула 4). Они определялись с учетом весовых коэффициентов соседних пикселей, умноженных на компоненты векторов LSP. Наконец, характеристикой текстуры в работе было также и число локального сходства (LSN, Local Similarity Number) (см. Приложение: табл. 1, формула 5). Это число пикселей, которые имеют сходную величину интенсивности с центральным пикселем квадрата размером $p \times p$.

Далее для элементов указанных признаков текстуры вычислялись различные статистики (среднее, стандартное отклонение, энтропия и др.), всего 131 признак. Результаты показали, что текстурные признаки обладали наивысшей эффективностью классификации сортов по сравнению с другими. Шесть из девяти сортов были определены со 100 % точностью, а два других классифицированы с более чем 96 % точностью. Использование характеристик, полученных на основе матриц LBP, LSP и LSN, повысило точность классификации по сравнению с предыдущими исследованиями. Пятьдесят четыре процента из 50 основных текстурных признаков были отобраны из групп признаков LBP, LSP и LSN; сделан вывод о том, что характеристики распределения указанных выше показателей внесли значительный вклад в идентификацию сорта пшеницы.

К. Sabanci с коллегами (2017) разработали систему для классификации зерен по принадлежности к растениям мягкой и твердой пшеницы на основе компьютерного зрения. Визуальные характеристики – размеры (длина, ширина, периметр и площадь), цвет (R, G и B) и текстура (контраст, корреляция, энергия, однородность и энтропия). В дополнение к этим основным показателям рассчитываются еще девять производных. В процессе тестирования упрощенный классификатор вычисляет тип зерна с точностью 99.46 % и сортирует зерна пшеницы с точностью 100 %. Для обучения и проверки классификатора изображения 200 зерен пшеницы (100 хлебных и 100 твердых сортов) были сняты камерой высокого разрешения.

Заключение

Спектрофотометры, спектрометры и гиперспектральные камеры – эффективные и надежные технологии анализа и оценки зерен злаковых. Однако они дорогостоящие, особенно камеры с высоким разрешением – пространственным и спектральным. Альтернативой является применение цифровых фотокамер, позволяющих получать высококачественные изображения с высоким пространственным и цветовым разрешением. Исследования показали, что их можно эффективно задействовать в качестве надежного и точного инструмента для решения множества практических задач. Высокое пространственное и цветовое разрешение таких камер дает возможность детализированно анализировать текстурные характеристики зерен злаковых. Дополняют текстурные признаки цветочные характеристики, представленные в различных цветовых моделях.

Таким образом, использование цветowych и структурных характеристик при анализе цифровых изображений зерен злаков позволяет эффективно решать ряд важных задач для их классификации, сортировки и определения заболеваний.

Список литературы / References

- Аджиева В.Ф., Бабак О.Г., Шоева О.Ю., Кильчевский А.В., Хлесткина Е.К. Молекулярно-генетические механизмы формирования окраски плодов и семян растений. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2015;19(5):561-573. DOI 10.18699/VJ15.073. [Adzhieva V.F., Babak O.G., Shoeva O.Yu., Kilchevsky A.V., Khlestkina E.K. Molecular-genetic mechanisms underlying fruit and seed coloration in plants. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2015;19(5):561-573. DOI 10.18699/VJ15.073. (in Russian)]
- Астафуров В.Г., Евсюткин Т.В., Курьянович К.В., Скороходов А.В. Статистическая модель текстурных признаков перистой облачности по спутниковым снимкам MODIS. *Оптика атмосферы и океана*. 2014;27(07):640-646. [Astafurov V.G., Evsyutkin T.V., Kuriyanovich K.V., Skorokhodov A.V. Statistical model of cirrus cloud textural features based on MODIS satellite images. *Optika Atmosfery i Okeana = Atmospheric and Oceanic Optics*. 2014;27(07):640-646. (in Russian)]
- Домасев М.В., Гнатюк С.П. Цвет, управление цветом, цветочные расчеты и измерения. СПб.: Питер, 2009. [Domasev M.V., Gnatyk S.P. Color, Color Management, Color Calculations and Measurements. St. Petersburg: Piter Publ., 2009. (in Russian)]
- Дорофеев В.Ф., Филатенко А.А., Мигушова Э.Ф., Удачин Р.А., Якубцинер М.М. Культурная флора СССР. Т. 1. Пшеница. Л.: Колос, 1979. [Dorofeev V.F., Filatenko A.A., Migushova E.F., Udachin R.A., Yakubtsiner M.M. The Cultural Flora of the USSR. Vol. 1. Wheat. Leningrad: Kolos Publ., 1979. (in Russian)]
- Крупнов В.А., Антонов Г.Ю., Дружинин А.Е., Крупнова О.В. Устойчивость к предуборочному прорастанию яровой мягкой пшеницы с *6Agⁱ(6D)*-хромосомой от *Agropyron intermedium*. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2012;16(2):444-450. [Krupnov V.A., Antonov G.Yu., Druzhin A.E., Krupnova O.V. Preharvest sprouting resistance in spring bread wheat carrying chromosome *6Agⁱ(6D)* from *Agropyron intermedium*. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2012;16(2):444-450. (in Russian)]
- Фисенко В.Т., Фисенко Т.Ю. Компьютерная обработка и распознавание изображений: учебное пособие. СПб.:СПбГУ ИТМО, 2008. [Fisenko V.T., Fisenko T.Yu. Computer Processing and Image Recognition: Tutorial. St. Petersburg, 2008. (in Russian)]
- Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. М.: Вильямс, 2004. [Forsyth D., Ponce J. Computer Vision: A Modern Approach. Prentice Hall, 2003. (Russ. ed. Forsayt D., Pons Zh. Komp'yuternoe Zrenie. Sovremennyy Podkhod. Moscow: Williams, 2004.)]
- Хлесткина Е.К. Гены, детерминирующие окраску различных органов пшеницы. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2014; 16(1):202-216. [Khlestkina E.K. Genes determining coloration of different organs in wheat. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2014;16(1):202-216. (in Russian)]
- Хлесткина Е.К., Пшеничникова Т.А., Усенко Н.И., Отмахова Ю.С. Перспективные возможности использования молекулярно-генетических подходов для управления технологическими свойствами зерна пшеницы в контексте цепочки «зерно–мука–хлеб». *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2016;20(4):511-527. DOI 10.18699/VJ15.140. [Khlestkina E.K., Pshenichnikova T.A., Usenko N.I., Otmakhova Yu.S. Prospective applications of molecular genetic approaches to control technological properties of wheat grain in the context of the “grain–flour–bread” chain. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2016;20(4):511-527. DOI 10.18699/VJ15.140. (in Russian)]
- Шоева О.Ю., Стрыгина К.В., Хлесткина Е.К. Гены, контролирующие синтез флавоноидных и меланиновых пигментов ячменя.

- Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2018;22(3):333-342. DOI 10.18699/VJ18.369.
- [Shoeva O.Yu., Strygina K.V., Khlestkina E.K. Genes determining the synthesis of flavonoid and melanin pigments in barley. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2018;22(3):333-342. DOI 10.18699/VJ18.369. (in Russian)]
- Ahmad I.S., Reid J.F., Paulsen M.R., Sinclair J.B. Color classifier for symptomatic soybean seeds using image processing. *Plant Dis*. 1999;83(4):320-327. DOI 10.1094/PDIS.1999.83.4.320.
- Alemu A., Feyissa T., Tuberosa R., Maccaferri M., Sciara G., Letta T., Abeyo B. Genome-wide association mapping for grain shape and color traits in Ethiopian durum wheat (*Triticum turgidum* ssp. *durum*). *Crop. J.* 2020. DOI 10.1016/j.cj.2020.01.001.
- Berry J.C., Fahlgren N., Pokorny A.A., Bart R.S., Veley K.M. An automated, high-throughput method for standardizing image color profiles to improve image-based plant phenotyping. *PeerJ*. 2018;6:5727. DOI 10.7717/peerj.5727.
- Black C.K., Panozzo J.F. Accurate technique for measuring color values of grain and grain products using a visible-NIR instrument. *Cereal Chem*. 2004;81(4):469-474. DOI 10.1094/CCHEM.2004.81.4.469.
- Chaugule A., Mali S.N. Evaluation of texture and shape features for classification of four paddy varieties. *J. Engineer*. 2014. DOI 10.1155/2014/617263.
- Corrêa R.C.G., Garcia J.A.A., Correa V.G., Vieira T.F., Bracht A., Peralta R.M. Pigments and vitamins from plants as functional ingredients: Current trends and perspectives. *Adv. Food Nutr. Res*. 2019; 90:259-303. DOI 10.1016/bs.afnr.2019.02.003.
- Delwiche S.R., Yang I.C., Graybosch R.A. Multiple view image analysis of freefalling US wheat grains for damage assessment. *Comput. Electron. Agr.* 2013;98:62-73. DOI 10.1016/j.compag.2013.07.002.
- Draz I.S., El-Gremi S.M., Youssef W.A. Response of Egyptian wheat cultivars to kernel black point disease alongside grain yield. *Pak. J. Phytopathol*. 2016;28(1):15-17.
- ElMasry G., Mandour N., Al-Rejaie S., Belin E., Rousseau D. Recent applications of multispectral imaging in seed phenotyping and quality monitoring – An overview. *Sensors*. 2019;19(5):1090. DOI 10.3390/s19051090.
- Fakthongphan J., Graybosch R.A., Baenziger P.S. Combining ability for tolerance to pre-harvest sprouting in common wheat (*Triticum aestivum* L.). *Crop Sci*. 2016;56(3):1025-1035. DOI 10.2135/cropsci.2015.08.0490.
- Flintham J., Adlam R., Bassoi M., Holdsworth M., Gale M. Mapping genes for resistance to sprouting damage in wheat. *Euphytica*. 2002; 126:39-45. DOI 10.1023/A:1019632008244.
- Galloway M.M. Texture analysis using grey level run lengths. *Comput. Graphics Image Process*. 1975;4:172-179.
- Garg M., Chawla M., Chunduri V., Kumar R., Sharma S., Sharma N.K., Kaur N., Kumar A., Munday J.K., Saini M.K., Singh S.P. Transfer of grain colors to elite wheat cultivars and their characterization. *J. Cereal Sci*. 2016;71:138-144. DOI 10.1016/j.jcs.2016.08.004.
- Genaev M.A., Komyshev E.G., Smirnov N.V., Kruchinina Y.V., Goncharov N.P., Afonnikov D.A. Morphometry of the wheat spike by analyzing 2D images. *Agronomy*. 2019;9(7):390.
- Glagoleva A.Y., Shmakov N.A., Shoeva O.Y., Vasiliev G.V., Shatskaya N.V., Börner A., Afonnikov D.A., Khlestkina E.K. Pleiotropic effect of barley Blp locus: metabolic pathways and genes identified by RNA-seq analysis of near-isogenic lines. *BMC Plant Biol*. 2017; 17(Suppl. 1):182. DOI 10.1186/s12870-017-1124-1.
- Gong Z., Cheng F., Cheng F., Liu Z., Yang X., Zhai B., You Z. Recent developments of seeds quality inspection and grading based on machine vision. ASABE Annual International Meeting. 2015;1. DOI 10.13031/aim.20152188378.
- Goriewa-Duba K., Duba A., Wachowska U., Wiwart M. An evaluation of the variation in the morphometric parameters of grain of six *Triticum* species with the use of digital image analysis. *Agronomy*. 2018;8(12):296. DOI 10.3390/agronomy8120296.
- Haralick R.M. Statistical and structural approaches to texture. *Proc. IEEE*. 1979;67(5):786-804.
- Haralick R.M., Shanmugam K., Dinstein I.H. Textural features for image classification. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern*. 1973;6:610-621.
- Huang M., Wang Q.G., Zhu Q.B., Qin J.W., Huang G. Review of seed quality and safety tests using optical sensing technologies. *Seed Sci. Technol*. 2015;43(3):337-366.
- Körnicke F., Werner H. Die Arten und Varietäten des Getreides. In: Handbuch des Getreidebaus. Vol. 1. Berlin, 1885.
- Lachman J., Martinek P., Kotíková Z., Orsák M., Šulc M. Genetics and chemistry of pigments in wheat grain – A review. *J. Cereal Sci*. 2017;74:145-154. DOI 10.1016/j.jcs.2017.02.007.
- Machálková L., Janečková M., Hřivna L., Dostálová Y., Hernandez J., Mrkvicová E., Vyhnaněk T., Trojan V. Impact of added colored wheat bran on bread quality. *Acta Univ. Agric. Silvic*. 2017;65(1): 99-104. DOI 10.11118/actaun201765010099.
- Majumdar S., Jayas D.S. Classification of bulk samples of cereal grains using machine vision. *J. Agric. Eng. Res*. 1999;73(1):35-47. DOI 10.1006/jaer.1998.0388.
- Majumdar S., Jayas D.S. Classification of cereal grains using machine vision: IV. Combined morphology, color, and texture models. *Trans. ASAE*. 2000;43(6):1689. DOI 10.13031/2013.3069.
- McCaig T.N., DePauw R.M., Williams P.C. Assessing seed-coat color in a wheat breeding program with a NIR/VIS instrument. *Can. J. Plant Sci*. 1993;73(2):535-539. DOI 10.4141/cjps93-073.
- McMullen M., Jones R., Gallenberg D. Scab of wheat and barley: a re-emerging disease of devastating impact. *Plant Dis*. 1997;81(12): 1340-1348. DOI 10.1094/PDIS.1997.81.12.1340.
- Olgun M., Onarcan A.O., Özkan K., Işık Ş., Sezer O., Özgişi K., Ayter N.G., Başıçiftçi Z.B., Ardiç M., Koyuncu O. Wheat grain classification by using dense SIFT features with SVM classifier. *Comput. Electron. Agric*. 2016;122:185-190. DOI 10.1016/j.compag.2016.01.033.
- Pathare P.B., Opara U.L., Al-Said F.A.J. Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: A review. *Food Bioprocess Technol*. 2013;6(1):36-60. DOI 10.1007/s11947-012-0867-9.
- Patrício D.I., Rieder R. Computer vision and artificial intelligence in precision agriculture for grain crops: A systematic review. *Comput. Electron. Agric*. 2018;153:69-81. DOI 10.1016/j.compag.2018.08.001.
- Pearson T. High-speed sorting of grains by color and surface texture. *Appl. Eng. Agric*. 2010;26(3):499-505. DOI 10.13031/2013.29948.
- Pearson T., Brabec D., Haley S. Color image based sorter for separating red and white wheat. *Sens. Instrum. Food Qual. Saf*. 2008;2(4):280-288. DOI 10.1007/s11694-008-9062-0.
- Pourreza A., Pourreza H.R., Abbaspour-Fard M.H., Sadriah H. Identification of nine Iranian wheat seed varieties by textural analysis with image processing. *Comput. Electron. Agric*. 2012;83:102-108. DOI 10.1016/j.compag.2012.02.005.
- Ram M.S., Dowell F.E., Seitz L., Lookhart G. Development of standard procedures for a simple, rapid test to determine wheat color class. *Cereal Chem*. 2002;79(2):230-237. DOI 10.1094/CCHEM.2002.79.2.230.
- Sabancı K., Ekinci S., Karahan A.M., Aydın C. Weight estimation of wheat by using image processing techniques. *J. Image Graph*. 2016; 4(1):51-54. DOI 10.18178/joig.4.1.51-54.
- Sabancı K., Toktas A., Kayabasi A. Grain classifier with computer vision using adaptive neuro-fuzzy inference system. *J. Sci. Food Agric*. 2017;97(12):3994-4000. DOI 10.1002/jsfa.8264.
- Septiningsih E.M., Prasetyono J., Lubis E., Tai T.H., Tjubyaryat T., Moeljopawiro S., McCouch S.R. Identification of quantitative trait loci for yield and yield components in an advanced backcross population derived from the *Oryza sativa* variety IR64 and the wild relative *O. rufipogon*. *Theor. Appl. Genet*. 2003;107(8):1419-1432. DOI 10.1007/s00122-003-1373-2.

- Shen Y., Jin L., Xiao P., Lu Y., Bao J. Total phenolics, flavonoids, anti-oxidant capacity in rice grain and their relations to grain color, size and weight. *J. Cereal Sci.* 2009;49(1):106-111. DOI 10.1016/j.jcs.2008.07.010.
- Souza F.H., Marcos-Filho J.Ú.L.I.O. The seed coat as a modulator of seed-environment relationships in Fabaceae. *Braz. J. Bot.* 2001; 24(4):365-375. DOI 10.1590/S0100-84042001000400002.
- Szczypiński P.M., Klepaczko A., Zapotoczny P. Identifying barley varieties by computer vision. *Comput. Electron. Agric.* 2015;110:1-8. DOI 10.1016/j.compag.2014.09.016.
- Szczypiński P.M., Strzelecki M., Materka A., Klepaczko A. MaZda – a software package for image texture analysis. *Comput. Methods Prog. Biomed.* 2009;94(1):66-76. DOI 10.1016/j.cmpb.2008.08.005.
- Visen N.S., Paliwal J., Jayas D.S., White N.D.G. Ae – automation and emerging technologies: specialist neural networks for cereal grain classification. *Biosyst. Eng.* 2002;82(2):151-159. DOI 10.1006/bioe.2002.0064.
- Žilić S., Serpen A., Akıllıoğlu G., Gökmen V., Vančetović J. Phenolic compounds, carotenoids, anthocyanins, and antioxidant capacity of colored maize (*Zea mays* L.) kernels. *J. Agric. Food Chem.* 2012; 60(5):1224-1231. DOI 10.1021/jf204367z.

ORCID ID

D.A. Afonnikov orcid.org/0000-0001-9738-1409

Благодарности. Работа выполнена за счет финансирования Курчатовского геномного центра Федерального исследовательского центра ИЦиГ СО РАН, соглашение с Министерством образования и науки РФ № 075-15-2019-1662.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 27.12.2019. После доработки 03.04.2020. Принята к публикации 07.04.2020.