

КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СЕМЯН ПОДРОДА *СЕРА* (*ALLIUM* L., ALLIACEAE) – ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИХ КАЧЕСТВА

¹**Ф.Б. Мусаев**, доктор сельскохозяйственных наук

²**Н.С. Прияткин**, кандидат технических наук

³**М.И. Иванова**, доктор сельскохозяйственных наук

³**А.Ф. Бухаров**, доктор сельскохозяйственных наук

³**А.И. Кашлева**, кандидат сельскохозяйственных наук

¹Федеральный научный центр овощеводства, п. ВНИИССОК, Московской обл., Россия

²Агрофизический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

³Всероссийский научно-исследовательский институт овощеводства – филиал ФГБНУ Федеральный научный центр овощеводства, д. Верея, Московской обл., Россия

E-mail: musayev@bk.ru

Ключевые слова: *Allium* L., семена, морфология, цифровой анализ изображений, цветовые признаки в системе RGB.

Реферат. В статье представлены результаты исследования морфологии семян *Allium* из подрода *Сера*: секции *Сера* (Mill.) Prokh. – *A. fistulosum* L., *A. altaicum* Pall., *A. galanthum* Kar. & Kir., *A. oschaninii* O. Fedtsch., *A. pskemense* B. Fedtsch.; секции *Schoenoprasum* Dum. – *A. altynolicum*, *A. ledebourianum*, *A. oliganthum*, *A. schoenoprasum* L.; секции *Condensatum* N. Friesen – *A. condensatum* из биокolleкции ВНИИО – филиала ФГБНУ ФНЦО (Московская область). Семена имели длину 2,74 - 3,50 мм, ширину – 1,33 – 2,14 мм. Морфологические признаки семян могут быть использованы в качестве дополнительных таксономических показателей в идентификации и различения таксонов в пределах подрода *Сера* рода *Allium*. Измерение морфометрических и оптических параметров семян осуществляли путем анализа изображений с помощью программного обеспечения «ВидеоТест-Морфология», разработанного в ООО «Аргус-Био», г. Санкт-Петербург. Цифровые изображения семян получены с использованием цифрового планшетного сканера HP Scanjet 200, разрешение 600 dpi, формат файлов JPG. Определены морфометрические параметры семян, в том числе площадь проекции (см²), длина, ширина, периметр, средний размер (мм), средний диаметр Фере, факторы округлости, удлиненности, эллипса, изрезанности (отн. ед.), параметры яркости, тональности, насыщенности цвета (отн. ед.). По результатам исследования составлены ряды распределения видов в порядке убывания по каждому из изученных признаков. В пределах секции *Сера* максимальные линейные размеры, периметр и площадь сечения имели семена *A. pskemense*. Среди представителей секции *Schoenoprasum* максимальную длину имели сеянки *A. altynolicum*. Максимальная ширина, периметр, площадь сечения, средний диаметр Фере семян зафиксирована у *A. ledebourianum*. В секции *Сера* среднее значение RGB в порядке убывания составило ряд: *A. pskemense* > *A. galanthum* > *A. fistulosum* > *A. altaicum* > *A. oschaninii*. В секции *Schoenoprasum* этот ряд имеет вид: *A. schoenoprasum* > *A. ledebourianum* > *A. altynolicum* > *A. oliganthum*.

COMPUTERISED VISUALISATION OF SEEDS OF THE CEPASUBGENUS (*ALLIUM* L., ALLIACEAE) - AN EFFECTIVE TOOL FOR ASSESSING THEIR QUALITY

¹**F.B. Musaev**, Doctor of Agricultural Sciences

²**N.S. Priyatkin**, Ph.D. in Technical Sciences

³**M.I. Ivanova**, Doctor of Agricultural Sciences

³**A.F. Bukharov**, Doctor of Agricultural Sciences

³**A.I. Kashleva**, Ph.D. in Agricultural Sciences

¹Federal Scientific Centre for Vegetable Production, VNISSOK settlement, Moscow Region, Russia

²Agrophysical Research Institute, St. Petersburg, Russia

³Russian Research Institute on Vegetable Growing, the branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution Federal Scientific Center for Vegetable Growing, Vereya village, Moscow region, Russia

E-mail: musayev@bk.ru

Keywords: *Allium* L., seeds, morphology, digital image analysis, color attributes in RGB (red, green, blue) system.

Abstract. The authors presented the results of a study of the morphology of *Allium* seeds from the subgenus *Cepa*: *Cepa* section (Mill.) Prokh. *A. fistulosum* L., *A. altaicum* Pall., *A. galanthum* Kar. & Kir., *A. oschaninii* O. Fedtsch., *A. pskemense* B. Fedtsch.; *Schoenoprasum* Dum. — *A. altynolicum*, *A. ledebourianum*, *A. oliganthum*, *A. schoenoprasum* L.; *Condensatum* N. Friesen — *A. condensatum*, from the biocollection of All-Russian Research Institute of Vegetable Growing — Branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution „Federal Scientific Centre for Vegetable Growing” (Moscow region). Seeds were 2.74 — 3.50 mm long and 1.33 — 2.14 mm wide. The morphological characteristics of the seeds can be used as additional taxonomic indicators in the identification and classification of taxa within the *Cepa* subgenus of the genus *Allium*. The authors measured the morphometric and optical parameters of the seeds by image analysis using VideoTest-Morphology software developed at Argus Bio Ltd. (St. Petersburg). Seed digital images were obtained using an HP Scanjet 200 digital flatbed scanner, 600 dpi resolution, and JPG file format. Morphometric parameters of seeds were determined, including projection area (cm²), length, width, perimeter, average size (mm), average diameter Fere, factors of roundness, elongation, ellipse, rugosity (relative units), parameters of brightness, tonality, color saturation (relative units). Based on the results of the study, a series of distributions of species was compiled in descending order of each of the characters studied. Within the *Cepa* section, the seeds of *A. pskemense* had the maximum linear size, perimeter, and cross-sectional area. Within the *Schoenoprasum* section, the seeds of *A. altynolicum* had the maximum length. The maximum width, perimeter, cross-sectional area, and average diameter of Fere seeds were recorded for *A. ledebourianum*. In the *Cepa* section, the average RGB value in descending order was as follows: *A. pskemense* > *A. galanthum* > *A. fistulosum* > *A. altaicum* > *A. oschaninii*. In the *Schoenoprasum* section, this series is as follows: *A. schoenoprasum* > *A. ledebourianum* > *A. altynolicum* > *A. oliganthum*.

Царство растений богато структурами, текстурами, формами и цветом. Тщательное их изучение может предоставить ценную биологическую информацию. Изображения и морфометрическая информация оказывают значительное влияние на широкий спектр тем исследований, в том числе в таксономии [1], для фенотипической характеристики видов [2], внутривидовой классификации [3], исследования изменчивости на популяционном уровне [4] и палеоэкологических исследований с анализом морфологии окаменелых растений, которые предоставляют данные об изменении климата [5].

Применение методов визуализации в сельском хозяйстве и науке о растениях ранее было ограничено изображениями, снятыми с помощью методов дистанционного зондирования с участием самолетов или спутников, которые затем обрабатывали и анализировали с использованием компьютеров. С новыми технологическими достижениями в захвате изображения и обработке данных методы визуализации решают различные практические проблемы в области биологии, медицины и сельского хозяйства. Различные типы методов визуализации, такие как тепловидение, флуоресцентная визуализация, гиперспектральная визуализация и фотометрические изображения, внесли значительный вклад в продвижение различных аспектов фенотипирования растений. Один из них — фотометрия, или изображения на основе RGB в

зависимости от изменения цвета различных биологических объектов. В последние годы значительный прогресс в применении изображений на основе RGB отмечен в различных областях сельского хозяйства и науки о растениях. RGB-анализ успешно использован для идентификации сорных растений [6, 7], картирования засоренности посевов [8, 9], оценки состояния газонов [10], анализа физиологических процессов в листьях [11], тестирования семян на степень вызревания [12–15]. В культуре растительных тканей на основе RGB-анализа изображений оценивали длину побега [16], определяли наличие вторичных метаболитов корневых волосков [17], классифицировали регенеранты [18, 19] и оценивали содержание хлорофилла в растениях [20, 21].

В семеноведении сельскохозяйственных культур современный уровень научных знаний требует применения инновационных инструментальных методов, отличающихся высокой информативностью и скоростью исполнения. Успешно применяются интроскопические методы оценки качества семенного материала, связанные с особенностями внутренней структур семян [22–24], активно используются технологии компьютерного анализа изображений семян [25, 26].

Морфометрические параметры определяют форму семян, что, в свою очередь, характеризует их жизнеспособность и в конечном счете продуктивность и качество урожая сельскохозяйственных культур. Подсчет

семян и «ручная» морфометрия длительны и трудоемки в исполнении. Предложены различные эффективные методы компьютерной морфометрии семян с использованием обработки изображений [27–29]. Большинство из этих подходов реализованы с использованием программного обеспечения настольных ПК для анализа изображений семян на светлом фоне, полученных с помощью цифровой камеры или сканера [30, 31]. Эти подходы позволяют пользователям оценивать большое количество морфометрических параметров семени, описывающих форму и цвет [32]. Они также облегчают методы идентификации сорта с использованием изображений семян [33–35], определения содержания влаги в семенах и прогнозирования урожайности [36, 37].

Методы обработки изображений для морфометрии и классификации семян применяются с 1980-х гг. [38]. Обновление этих методов происходит постоянно, в том числе в последние годы [39, 40]. Разработаны различные методы оптического зондирования для оценки качества и безопасности семян [41], описаны сложные формы семян с использованием 2D-изображений [42, 43]. Революционная технология 3D-визуализации и робототехника [44, 45] или рентгеновская компьютерная томография [46] могут быть реализованы для точной оценки формы семян. Однако все еще существует необходимость в фенотипировании семян с использованием простых и доступных инструментов [31]. Они могут быть эффективно реализованы с высокой пропускной способностью.

Размерные характеристики, определяющие форму семян, оттенки цвета их поверхности, пригодные для дальнейшей обработки, делают современные методы получения изображений высокоадаптируемыми инструментами. Биоморфологические свойства семян могут быть проанализированы с помощью компьютерных систем анализа изображений, а данные быстро обработаны и сохранены, нанесены на график или составлены статистически [14].

Allium L. – большой, очень разнообразный и таксономически сложный род однодольных. Род включает более 900 видов, относящихся к 15 под родам и более 70 секциям [47–49], много культивируемых видов – в основном овощные и декоративные растения, некоторые с лечебными свойствами [50–51]. Установлен высокий уровень морфологического разнообразия семенной оболочки в роде *Allium*, детали которой хорошо видны

под сканирующим электронным микроскопом. Различия в размере семян, форме, цвете и структуре клеток семенной оболочки могут служить таксономическими и/или филогенетическими маркерами [48, 52].

Цель исследования – изучить геометрические параметры и цветковые признаки семян подрода *Cepa* (*Allium* L., Alliaceae) из биоколлекции ВНИИО – филиала ФГБНУ ФНЦО путем цифрового сканирования.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом для исследований явились семена *Allium* L. из подрода *Cepa*: секции *Cepa* (Mill.) Prokh. – *A. fistulosum* L., *A. altaicum* Pall., *A. galanthum* Kar. & Kir., *A. oschaninii* O. Fedtsch., *A. pskemense* B. Fedtsch.; секции *Schoenoprasum* Dum. – *A. altynolicum*, *A. ledebourianum*, *A. oliganthum*, *A. schoenoprasum* L.; секции *Condensatum* N. Friesen – *A. condensatum* из биоколлекции ВНИИО – филиала ФГБНУ ФНЦО (Московская область, N 55°36' E 38°1'). Растения 4–5-летнего возраста.

Измерение морфометрических и оптических параметров семян проводили путем анализа изображений с помощью программного обеспечения «ВидеоТест-Морфология» (ООО «Аргус-Био», г. Санкт-Петербург). Цифровые изображения семян получали с использованием цифрового планшетного сканера HP Scanjet 200, разрешение 600 dpi, формат файлов JPG. Программа с высокой точностью (до 1/1000 долей миллиметра) измеряет линейные параметры семян. Ранее нами были проанализированы линейные параметры экологически разнокачественных семян фасоли и матриально разнокачественных семян моркови и пастернака [53, 54].

Программное обеспечение анализа изображений позволяет проводить автоматические и ручные измерения по изображениям. Программа способна выделить объекты интереса (от фона) по значениям пикселей в цветовых системах RGB и HSB (цветовой тон, насыщенность, светлость). Для описания цветности при анализе цифровых изображений пользовались цветовой моделью RGB. Эта цветовая модель дает возможность разрешить до 28 (256) градаций яркости каждого из трех базовых цветов. Яркость в любом из каналов цифрового изображения в данной точке отражает интенсивность света красной, зеленой и синей областей спектра, попадающего на матрицу регистрирующего устрой-

ства фотокамеры. Согласно цветовой модели, R, G и B могут принимать абсолютные значения от 0 до 255.

Среднее значение $RGB = (\text{значение } R + \text{значение } G + \text{значение } B) / 3$.

Определяли морфометрические параметры семян:

- а) площадь проекции (см^2);
- б) линейные размеры: длина, ширина, периметр, размер средний (мм);
- в) факторы округлости, удлиненности, эллипса, изрезанности (отн. ед.);
- д) параметры яркости: яркость, тональность, насыщенность (отн. ед.).

Фактор округлости (отн. ед.) – это отношение периметра семанки к периметру круга с той же площадью. Для круга показатель близок к единице. Фактор удлиненности (отн. ед.) показывает отношение габаритной длины семанки к габаритной ширине. Проекция изображения семени, не имеющего форму круга, измеряется как расстояние между касательными к контуру изображения, проведенными параллельно выбранному направлению (средний диаметр Фере).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Allium – один из крупнейших однодольных родов. Подрод *Cepa* включает 5 секций [55]. В настоящем исследовании мы описываем семанки 10 видов из 3 секций. Для рода *Allium* характерны зонтиковидные соцветия, при основании с покрывалом. Завязь трёхгнёздная или одногнёздная, с шестью или многими семяпочками. Плод – коробочка, вскрывающаяся по гнездам. В плоде образуется до 6 семянок, у редких видов – более 10.

Поливариантность семян является необходимым условием адаптивной стратегии растительных видов в нативных фитоценозах, но в агроценозах ее проявление ограничивается уровнем применяемых технологий возделывания сельскохозяйственной культуры. Варьирование морфометрических параметров семян, как и любых других признаков, является геноспецифичным, а следовательно, селекционно значимым [56, 57].

Из секции *Cepa* проанализированы семанки видов *A. fistulosum*, *A. altaicum*, *A. galanthum*, *A. oschaninii*, *A. pskemense*. Внутри секции максимальную длину имели семан-

ки *A. pskemense* (3,09 мм), минимальную – *A. fistulosum* (2,88 мм). Максимальная ширина семанки зафиксирована у *A. pskemense* (2,14 мм), минимальная – у *A. altaicum* (1,89 мм). Распределение среднего размера и площади семанки внутри видов составило ряд в порядке убывания: *A. pskemense* > *A. oschaninii* > *A. galanthum* > *A. fistulosum* > *A. altaicum*. Семанки всех изученных видов эллиптические: фактор эллипса 0,99 отн. ед., у *A. altaicum* – 0,98 отн. ед., у которого отмечена минимальная округлость (0,61 отн. ед.) и максимальная удлиненность (1,57 отн. ед.). Распределение периметра и изрезанности семанки внутри видов составило ряд в порядке убывания: *A. pskemense* > *A. oschaninii* > *A. galanthum* > *A. altaicum* > *A. fistulosum* (табл. 1).

Из секции *Schoenoprasum* в изучении находились семанки видов *A. altynolicum*, *A. ledebourianum*, *A. oliganthum*, *A. schoenoprasum*. Внутри секции максимальную длину имели семанки *A. altynolicum* (3,26 мм), минимальную – *A. oliganthum* (2,74 мм). Максимальная ширина семанки зафиксирована у *A. ledebourianum* (1,89 мм), минимальная – у *A. oliganthum* (1,33 мм). Распределение площади, периметра, ширины, среднего размера и среднего диаметра Фере семанки внутри видов составило ряд в порядке убывания: *A. ledebourianum* > *A. altynolicum* > *A. schoenoprasum* > *A. oliganthum*.

Распределение длины и максимального диаметра Фере семанки внутри видов составило ряд в порядке убывания: *A. altynolicum* > *A. ledebourianum* > *A. schoenoprasum* > *A. oliganthum*. Удлиненность семанки составила 2,08 отн. ед. у видов *A. oliganthum* и *A. schoenoprasum*, 2,05 отн. ед. – у *A. altynolicum* и 1,64 отн. ед. – у *A. ledebourianum*. Семанки всех изученных видов эллиптические: фактор эллипса 0,99 отн. ед., изрезанность – 0,01 отн. ед.

В наших исследованиях секция *Condensatum* представлена видом *A. condensatum*. Длина семанки составила 3,5 мм, ширина – 1,95 мм, средний размер – 2,73 мм. Периметр зафиксирован на уровне 8,86 мм, изрезанность – 0,03 отн. ед. Семанки эллиптические, фактор эллипса 0,99 отн. ед.

Анализ изрезанности семян изученных видов *Allium* из трех секций показал, что значение этого признака максимально (0,03 отн. ед.) у видов *A. pskemense* и *A. condensatum*, что может быть маркерным признаком в идентификации семян этих видов.

Таблица 1

Результаты морфометрического анализа семян некоторых видов *Allium L.* (n=100 шт.)
Results of morphometric analysis of seeds of some *Allium L.* species (n=100 pcs.)

Параметр	Секция <i>Cepa</i> (Mill.) Prokh.					Секция <i>Schoenoprasum</i> Dum.					Секция <i>Condensatum</i> N. Friesen
	<i>A. fistulosum</i>	<i>A. altaicum</i>	<i>A. galanthum</i>	<i>A. oschaninii</i>	<i>A. pskemense</i>	<i>A. alyncolicum</i>	<i>A. ledebourianum</i>	<i>A. oliganthum</i>	<i>A. schoenoprasum</i>	<i>A. condensatum</i>	
Площадь, мм ²	4,10/0,07	4,01/0,08	4,19/0,07	4,57/0,15	4,72/0,08	3,58/0,06	4,34/0,08	2,53/0,06	3,06/0,06	4,77/0,10	
Периметр, мм	7,71/0,06	7,73/0,08	7,80/0,07	8,11/0,14	8,42/0,08	7,66/0,06	8,03/0,07	6,45/0,07	7,15/0,06	8,86/0,14	
Длина, мм	2,88/0,02	2,95/0,03	2,90/0,02	3,02/0,06	3,09/0,03	3,26/0,02	3,06/0,02	2,74/0,03	3,02/0,02	3,50/0,05	
Ширина, мм	1,98/0,02	1,89/0,02	1,99/0,02	2,06/0,03	2,14/0,02	1,60/0,02	1,89/0,03	1,33/0,02	1,47/0,02	1,95/0,03	
Средний размер, мм	2,43/0,02	2,42/0,02	2,45/0,02	2,54/0,04	2,61/0,02	2,43/0,02	2,47/0,02	2,04/0,02	2,24/0,02	2,73/0,03	
Максимальный диаметр Фере, мм	2,84/0,02	2,90/0,03	2,86/0,02	2,97/0,06	3,04/0,03	3,19/0,02	3,02/0,02	2,67/0,03	2,95/0,02	3,45/0,05	
Средний диаметр Фере, мм	2,43/0,02	2,44/0,02	2,44/0,02	2,54/0,04	2,61/0,02	2,43/0,02	2,53/0,02	2,04/0,02	2,24/0,02	2,75/0,03	
Фактор круга, отн. ед.	0,86/0,00	0,84/0,01	0,86/0,01	0,87/0,01	0,84/0,01	0,77/0,01	0,84/0,01	0,76/0,01	0,75/0,01	0,77/0,02	
Фактор эллипса, отн. ед.	0,99/0,00	0,98/0,00	0,99/0,00	0,99/0,00	0,99/0,00	0,99/0,00	0,99/0,00	0,99/0,00	0,99/0,00	0,99/0,00	
Округлость, отн. ед.	0,65/0,01	0,61/0,01	0,65/0,01	0,66/0,01	0,65/0,01	0,45/0,01	0,60/0,01	0,45/0,01	0,45/0,01	0,52/0,01	
Удлиненность, отн. ед.	1,47/0,02	1,57/0,02	1,47/0,02	1,46/0,02	1,45/0,02	2,05/0,03	1,64/0,03	2,08/0,03	2,08/0,03	1,82/0,05	
Изрезанность, отн. ед.	0,01/0,00	0,01/0,00	0,02/0,00	0,02/0,00	0,03/0,00	0,01/0,00	0,01/0,00	0,01/0,00	0,01/0,00	0,03/0,01	

Примечание. Значение / доверительный интервал.

Таблица 2

Величины цветовых составляющих семян некоторых видов *Allium L.* по модели RGB (n=100 шт.)
Values of the color components of seeds of some species of *Allium L.* according to the RGB model (n=100 pcs.)

Параметр	Секция <i>Cepa</i> (Mill.) Prokh.					Секция <i>Schoenoprasum</i> Dum.					Секция <i>Condensatum</i> N. Friesen
	<i>A. fistulosum</i>	<i>A. altaicum</i>	<i>A. galanthum</i>	<i>A. oschaninii</i>	<i>A. pskemense</i>	<i>A. alyncolicum</i>	<i>A. ledebourianum</i>	<i>A. oliganthum</i>	<i>A. schoenoprasum</i>	<i>A. condensatum</i>	
Средняя яркость, ед. яркости	58,12/0,56	56,62/0,84	58,35/0,82	54,17/0,64	61,83/0,88	52,80/0,78	61,64/0,79	51,99/0,61	61,59/0,75	62,61/1,11	
Отклонение яркости, ед. яркости	26,44/0,26	27,60/0,35	27,04/0,31	25,00/0,34	29,62/0,47	31,82/0,34	32,31/0,30	32,30/0,35	40,39/0,29	30,13/0,39	
Минимальная яркость, ед. яркости	9,70/0,46	9,80/0,56	10,10/0,54	10,35/0,59	9,59/0,54	6,00/0,60	7,71/0,47	7,90/0,58	9,86/0,48	8,01/0,63	
Максимальная яркость, ед. яркости	239,00/0,20	241,68/0,22	239,56/0,23	237,43/0,17	238,55/0,29	242,24/0,30	243,45/0,25	243,22/0,23	226,75/0,08	240,98/0,47	
Красный, ед. яркости	60,37/0,62	59,88/0,97	60,71/0,86	56,76/0,71	63,35/0,90	53,45/0,81	64,69/0,80	52,19/0,63	62,40/0,80	64,62/1,18	
Зеленый, ед. яркости	57,84/0,55	55,94/0,82	58,00/0,82	53,68/0,62	61,79/0,88	52,75/0,77	60,95/0,79	52,08/0,61	61,08/0,74	62,34/1,09	
Синий, ед. яркости	57,20/0,51	55,18/0,72	57,60/0,77	53,54/0,57	61,63/0,86	55,24/0,77	60,93/0,81	55,17/0,63	66,44/0,70	62,24/1,02	
Среднее значение RGB, ед. яркости	58,47/0,56	57,00/0,84	58,77/0,82	54,66/0,63	62,26/0,88	53,81/0,78	62,19/0,80	53,15/0,62	63,31/0,75	63,07/1,10	
Тональность, отн. ед.	0,27/0,04	0,29/0,06	0,40/0,05	0,46/0,07	0,41/0,05	0,73/0,01	0,46/0,06	0,68/0,01	0,72/0,01	0,46/0,07	
Насыщенность, отн. ед.	0,03/0,00	0,04/0,00	0,03/0,00	0,03/0,00	0,02/0,00	0,02/0,00	0,03/0,00	0,03/0,00	0,04/0,00	0,02/0,00	

Примечание. Значение / доверительный интервал.

Программное обеспечение также может извлекать и экспортировать информацию о цвете из изображения. Цветовой анализ стал очень важным в области растений в последние годы. Это позволяет идентифицировать вариации в накоплении различных пигментов и проводить диагностику болезней растений, сравнивать мутантные фенотипы и таксономические вариации [56, 57].

На основе интенсивности всех отдельных цветовых компонентов и среднего значения RGB были определены различия значений между секциями и видами (табл. 2). В секции *Cepa* среднее значение RGB в порядке убывания составило ряд: *A. pskemense* > *A. galanthum* > *A. fistulosum* > *A. altaicum* > *A. oschaninii*. В секции *Schoenoprasum* этот ряд имеет вид: *A. schoenoprasum* > *A. ledebourianum* > *A. altynolicum* > *A. oliganthum*. Наивысший показатель среднего значения RGB установлен у *A. schoenoprasum* (63,31 ед. яркости) и *A. condensatum* (63,07 ед. яркости).

Выявлен ряд значений RGB в порядке убывания: в секции *Cepa* и секции *A. condensatum* – R > G > B. В секции *Schoenoprasum* эти значения неоднозначны: у *A. altynolicum*, *A. oliganthum* и *A. schoenoprasum* – B > R > G, у *A. ledebourianum* – R > G > B. Максимальная тональность семян обнаружена в секции *Schoenoprasum*: у *A. altynolicum* – 0,73 отн. ед., у *A. schoenoprasum* – 0,72 отн. ед.

Из секции *Cepa* у *A. altaicum* отмечены высокие значения максимальной яркости (241,68 ед. яркости) и насыщенности (0,04 отн. ед.).

Однако в секции *Schoenoprasum* обнаружена обратная закономерность: у *A. schoenoprasum* при наименьшем значении максимальной яркости (226,75 ед. яркости) отмечена высокая насыщенность (0,04 отн. ед.).

ВЫВОДЫ

1. Растущий интерес к цифровому документированию информации растений, их органов и тканей для разных целей (в том числе характеризующих качество семян) заставляет искать оперативные методы наблюдения и инструменты анализа. 2-D цифровое сканирование и компьютерная визуализация позволяют легко документировать изображения семян и их количественные характеристики (линейные измерения, проекции, яркость и насыщенность цвета).

2. В пределах секции *Cepa* максимальные линейные размеры, периметр и площадь сечения имели семена *A. pskemense*. Среди представителей секции *Schoenoprasum* максимальную длину имели семечки *A. altynolicum*. Максимальная ширина, периметр, площадь сечения, средний диаметр Фере семян зафиксированы у *A. ledebourianum*. В секции *Cepa* среднее значение RGB в порядке убывания составило ряд: *A. pskemense* > *A. galanthum* > *A. fistulosum* > *A. altaicum* > *A. oschaninii*. В секции *Schoenoprasum* этот ряд имеет вид: *A. schoenoprasum* > *A. ledebourianum* > *A. altynolicum* > *A. oliganthum*.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Plant species identification using digital morphometrics: a review* / J.S. Cope, D. Corney, J.Y. Clark [et al.] // *Expert Syst. App.* – 2012. – N. 39. – P. 7562–7573. – DOI: 10.1016/j.eswa.2012.01.073.
2. *Pinheiro F., De Barros F. Morphometric analysis of Epidendrum secundum (Orchidaceae) in southeastern Brazil* // *Nord. J. Bot.* – 2008. – N 25. – P. 129–136. – DOI: 10.1111/j.0107-055X.2007.00010.x.
3. *Morphological and physiological traits of three major Arabidopsis thaliana accessions* / F. Passardi, J. Dobias, L. Valério [et al.] // *J. Plant Physiol.* – 2007. – N 164. – P. 980–992. – DOI: 10.1016/j.jplph.2006.06.008.
4. *Morphometric Study of Populations of the Centaurea jacea Complex (Asteraceae) in Belgium* / S. Vanderhoeven, O. Hardy, X. Vekemans [et al.] // *Plant Biol.* – 2002. – N 4. – P. 403–412. – DOI: 10.1055/s-2002-32327.
5. *Chaloner W.G., McElwain J. The fossil plant record and global climatic change* // *Rev. Palaeobot. Palynol.* – 1997. – N 95. – P. 73–82. – DOI: 10.1016/S0034-6667(96)00028-0.
6. *Hemming J., Rath T. Computer-vision based weed identification under field condition using controlled lighting* // *J. Agric. Eng. Res.* – 2001. – N 78. – P. 233–243.
7. *Ahmad I., Muhamin A., Naeem Islam M. Real-time specific weed recognition system using histogram analysis* // *Proc. World Acad. Sci. Eng. Technol.* – 2006. – N 16. – P. 145–148.
8. *Tillet N.P., Hague T., Miles S.J. A field assessment of a potential method for weed and crop mapping geometry* // *Comput. Electron. Agric.* – 2001. – N 32. – P. 229–246.

9. *Weed and crop discrimination using image analysis and artificial intelligence methods* / M.J. Aitkenhead, I.A. Dalgetty, C.E. Mullins [et al.] // *Comput. Electron. Agric.* – 2003. – N 39. – P. 157–171.
10. *Karcher D.E., Rechardson M.D.* Quantifying turf grass color using digital image analysis // *Crop Sci.* – 2003. – N 43. – P. 943–951.
11. *Aldea M., Frank T.D., Delucia E.H.* A method for quantitative analysis for spatially variable physiological processes across leaf surfaces // *Photosynth. Res.* – 2006. – N 90. – P. 161–172.
12. *Dell'Aquila A., van der Shoor R., Jalink A.* Application of chlorophyll fluorescence in sorting controlled deteriorated white cabbage (*Brassica oleracea* L.) seeds // *Seed Science and Technology*. – 2002. – N 30. – P. 689–695.
13. *Dell'Aquila A.* Red-Green-Blue (RGB) colour density as a non-destructive marker in sorting deteriorated lentil (*Lens culinaris* Medik.) seeds // *Seed Sci. & Technol.* – 2006. – N 34. – P. 609–619.
14. *Dell'Aquila A.* Application of a computer-aided image analysis system to evaluate seed germination under different environmental conditions // *Ital. J. Agron.* – 2004. – N. 8. – P. 51–62.
15. *Dana W., Ivo W.* Computer image analysis of seed shape and seed color of flax cultivar description // *Comput. Electron. Agric.* – 2008. – N 61. – P. 126–135.
16. *Image analysis associated with a fuzzy neural network and estimation of shoot length of regenerated rice callus* / H. Honda, N. Takikawa, H. Noguchi [et al.] // *J. Ferment. Bioeng.* – 1997. – N 84. – P. 342–347.
17. *Berzin I., Mills D., Merchuk J.C.* A non-destructive method for secondary metabolite determination in hairy root cultures // *J. Chem. Eng. Jpn.* – 1999. – N 32. – P. 229–234.
18. *Mahendra Prasad V.S.S., Dutta Gupta S.* Trichromatic sorting of *in vitro* regenerated plants of gladiolus using adaptive resonance theory // *Curr. Sci.* – 2004. – N 87. – P. 348–353.
19. *Prasad V.S.S., Dutta Gupta S.* Photometric clustering of regenerated plants of gladiolus by neural network and its biological validation // *Comput. Electron. Agric.* – 2008. – N 60. – P. 8–17.
20. *Yadav S.P., Ibaraki Y., Dutta Gupta S.* Estimation of the chlorophyll content of micropropagated potato plants using RGB based image analysis // *Plant Cell Tiss. Org. Cult.* – 2010. – N 100. – P. 183–188.
21. *Dutta Gupta S., Ibaraki Y., Pattanayak A.* Development of a digital image analysis method for real-time estimation of chlorophyll content in micropropagated potato plants // *Plant Biotechnol. Rep.* – 2013. – N 7. – P. 91–97.
22. *Мусаев Ф.Б., Архипов М.В., Потрахов Н.Н.* Анализ качества семян овощных культур методом рентгенографии // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии.* – 2014. – № 4. – С. 18–27.
23. *Бухаров А.Ф., Балеев Д.Н., Мусаев Ф.Б.* Мягколучевая рентгеноскопия – эффективный метод выявления «пустосемянности» овощных зонтичных культур // *Пермский аграрный вестник.* – 2015. – № 1 (9). – С. 6–11.
24. *Интроскопические методы исследования качества семенного материала: состояние проблемы и перспективы использования* / Н.С. Прияткин, М.В. Архипов, Л.П. Гусакова [и др.] // *Агрофизика.* – 2018. – № 2. – С. 29–39.
25. *Sandeep Varma V., Kanaka Durga K., Keshavulu K.* Seed image analysis: its applications in seed science research // *International Research Journal of Agricultural Sciences.* – 2013. – Vol. 1 (2). – P. 30–36.
26. *Kapadia V.N., Sasidharan N., Patil K.* Seed Image Analysis and Its Application in Seed Science Research // *Advances in Biotechnology and Microbiology.* – 2017. – Vol. 7, Is. 2. – P. 1–3.
27. *Granitto P.M., Verdes P.F., Ceccatto H.A.* Large-scale investigation of weed seed identification by machine vision // *Comput. Electron. Agric.* – 2005. – N 47. – P. 15–24. – DOI: 10.1016/j.compag.2004.10.003.
28. *Identification of nine Iranian wheat seed varieties by textural analysis with image processing* / A. Pourreza, H. Pourrezab, M.H. Abbaspour-Farda, H. Sadrniaa // *Comput. Electron. Agric.* – 2012. – N 83. – P. 102–108. – DOI: 10.1016/j.compag.2012.02.005.

29. *SmartGrain*: high-throughput phenotyping software for measuring seed shape through image analysis / T. Tanabata, T. Shibaya, K. Hori [et al.] // *Plant Physiol.* – 2012. – N 4. – P. 1871–1880. – DOI: 10.1104/pp.112.205120.
30. *Rapid* analysis of seed size in *Arabidopsis* for mutant and QTL discovery / R.P. Herridge, R.C. Day, S. Baldwin, R.C. Macknight // *Plant Methods.* – 2011. – N 7. – P. 3. – DOI: 10.1186/1746-4811-7-3.
31. *GrainScan*: a low cost, fast method for grain size and colour measurements / A.P. Whan, A.B. Smith, C.R. Cavanagh [et al.] // *Plant Methods.* – 2014. – N 10. – P. 1. – DOI: 10.1186/1746-4811-10-2310.4225/08/536302C43FC28.
32. *Crop* segmentation from images by morphology modeling in the CIE L*a*b color space / X.D. Bai, Z.G. Cao, Y. Wang [et al.] // *Comput. Electron. Agric.* – 2013. – N 99. – P. 21–34. – DOI: 10.1016/j.compag.2013.08.022.
33. *Wiesnerová D., Wiesner I.* Computer image analysis of seed shape and seed color for flax cultivar description // *Comput. Electron. Agric.* – 2008. – N 61. – P. 126–135. – DOI: 10.1016/j.compag.2007.10.001.
34. *Combining* discriminant analysis and neural networks for corn variety identification / X. Chen, Y. Xun, W. Li, J. Zhang // *Comput. Electron. Agric.* – 2010. – N 71. – P. 48–53. – DOI: 10.1016/j.compag.2009.09.003.
35. *Zapotoczny P.* Discrimination of wheat grain varieties using image analysis and neural networks, Part I, single kernel texture // *J. Cereal Sci.* – 2011. – N 54. – P. 60–68. – DOI: 10.1016/j.jcs.2011.02.012.
36. *Image* analysis of whole grains: a noninvasive method to predict semolina yield in durum wheat / P. Novaro, F. Colucci, G. Venora, M.G. D'egidio // *Cereal Chem.* – 2001. – N 78. – P. 217–221. – DOI: 10.1094/CCHEM.2001.78.3.217.
37. *Evaluation* of the effect of moisture content on cereal grains by digital image analysis / A.R. Tahir, S. Neethirajan, D.S. Jayas [et al.] // *Food Res. Int.* – 2007. – N 40. – P. 1140–1145. – DOI: 10.1016/j.foodres.2007.06.009.
38. *An instrumental* system for cereal grain classification using digital image analysis / H.D. Sapirstein, M. Neuman, E.H. Wright [et al.] // *J. Cereal Sci.* – 1987. – N 6. – P. 3–14. – DOI: 10.1016/S0733-5210(87)80035-8.
39. *A robust*, high-throughput method for computing maize ear, cob, and kernel attributes automatically from images / N.D. Miller, N.J. Haase, J. Lee [et al.] // *Plant J.* – 2016. – DOI: 10.1111/tbj.13320.
40. *Sankaran S., Wang M., Vandemark G.J.* Image-based rapid phenotyping of chickpeas seed size // *Eng. Agric. Environ. Food.* – 2016. – N 9. – P. 50–55. – DOI: 10.1016/j.eaef.2015.06.001.
41. *Review* of seed quality and safety tests using optical sensing technologies / M. Huang, Q.G. Wang, Q.B. Zhu [et al.] // *Seed Sci. Technol.* – 2015. – N 43. – P. 337–366. – DOI: 10.15258/sst.2015.43.3.16.
42. *Williams K., Munkvold J., Sorrells M.* Comparison of digital image analysis using elliptic fourier descriptors and major dimensions to phenotype seed shape in hexaploid wheat (*Triticum aestivum* L.) // *Euphytica.* – 2013. – N 190. – P. 99–116. – DOI: 10.1007/s10681-012-0783-0.
43. *Cervantes E., Martín J.J., Saadaoui E.* Updated methods for seed shape analysis // *Scientifica.* – 2016. – DOI: 10.1155/2016/5691825.
44. *PhenoSeeder* – a robot system for automated handling and phenotyping of individual seeds / S. Jahnke, J. Roussel, T. Hombach [et al.] // *Plant Physiol.* – 2016. – N 172. – P. 1358–1370. – DOI: 10.1104/pp.16.01122.
45. *3D surface* reconstruction of plant seeds by volume carving: performance and accuracies / J. Roussel, F. Geiger, A. Fischbach [et al.] // *Front. Plant. Sci.* – 2016. – N 7. – P. 745. – DOI: 10.3389/fpls.2016.00745.
46. *Automatic* estimation of wheat grain morphometry from computed tomography data / H. Strange, R. Zwiggelaar, C. Sturrock [et al.] // *Funct. Plant Biol.* – 2015. – N 42. – P. 452–459. – DOI: 10.1071/FP14068.

47. Friesen N., Fritsch R.M., Blattner F.R. Phylogeny and new infrageneric classification of *Allium* (Alliaceae) based on nuclear ribosomal DNA ITS sequences // *Aliso*. – 2006. – N 22. – P. 372–395.
48. Neshati F., Fritsch R.M. Seed characters and testa sculptures of some Iranian *Allium* L. species (Alliaceae) // *Feddes Repert.* – 2009. – N 120. – P. 322–332.
49. Fritsch R.M., Blattner F.R., Gurushidze M. New classification of *Allium* L. subg. *Melanocrommyum* (Webb & Berthel) Rouy (Alliaceae) based on molecular and morphological characters // *Phyton*. – 2010. – N 49. – P. 145–220.
50. Fritsch R.M., Abbasi M. Taxonomic Review of *Allium* subg. *Melanocrommyum* in Iran. – Germany, Leibniz-Institut für Pflanzengenetik und Kulturpflanzenforschung Gatersleben, 2013.
51. Биохимический состав листьев видов *Allium* L. в условиях Московской области / М.И. Иванова, А.Ф. Бухаров, Д.Н. Балеев, А.Р. Бухарова, А.И. Кашлева, Т.М. Середин, О.А. Разин // *Достижения науки и техники АПК*. – 2019. – Т. 33, № 5. – С. 47–50. – DOI: 10.24411/0235-2451-2019-10511.
52. Bednorz L., Krzysińska A., Czarna A. Seed morphology and testa sculptures of some *Allium* L. species (Alliaceae) // *Acta Agrobotanica*. – 2011. – Vol. 64 (2). – P. 33–38.
53. Исследование разнокачественности семян овощных культур с использованием компьютерного анализа изображений / Ф.Б. Мусаев, А.В. Солдатенко [и др.] // *Агрофизика*. – 2019. – № 1. – С. 38–44.
54. Цифровая морфометрия разнокачественности семян овощных культур / Ф.Б. Мусаев, Н.С. Прияткин, М.В. Архипов [и др.] // *Картофель и овощи*. – 2018. – № 6. – С. 35–37.
55. *Systematics* of disjunct northeastern Asian and northern North American *Allium* (Amaryllidaceae) / Choi Hyeok Jae, Giussani Liliana M., Jang Chang Gee [et al.] // *Botany*. – 2012. – N 90 (6). – P. 491–508. – DOI: 10.1139/b2012-031.
56. *Non-destructive* Plant Morphometric and Color Analyses Using an Optoelectronic 3D Color Microscope / H.G. Lazcano-Ramírez, A. Gómez-Felipe, D. Díaz-Ramírez [et al.] // *Front. Plant Sci.* – 2018. – N 9. – P. 1409. – DOI: 10.3389/fpls.2018.01409.
57. Kasajima I. Measuring plant colors // *Plant Biotechnology*. – 2019. – N 36. – P. 63–75. – DOI: 10.5511/plantbiotechnology.19.0322a.

REFERENCES

1. Cope J.S., Corney D., Clark J.Y., Remagnino P., Wilkin P., Plant species identification using digital morphometrics: a review, *Expert Syst. App.*, 2012, No. 39, pp. 7562–7573, DOI: 10.1016/j.eswa.2012.01.073.
2. Pinheiro F., De Barros F., Morphometric analysis of *Epidendrum secundum* (Orchidaceae) in southeastern Brazil, *Nord. J. Bot.*, 2008, No. 25, pp. 129–136, DOI: 10.1111/j.0107-055X.2007.00010.x.
3. Passardi F., Dobias J., Valério L., Guimil S., Penel C., Dunand C., Morphological and physiological traits of three major *Arabidopsis thaliana* accessions, *J. Plant Physiol.*, 2007, No. 164, pp. 980–992, DOI: 10.1016/j.jplph.2006.06.008.
4. Vanderhoeven S., Hardy O., Vekemans X., Lefèbvre C., de Loose M., Lambinon J.A., Morphometric Study of Populations of the *Centaurea jacea* Complex (Asteraceae) in Belgium, *Plant Biol.*, 2002, No. 4, pp. 403–412, DOI: 10.1055/s-2002-32327.
5. Chaloner W.G., McElwain J., The fossil plant record and global climatic change, *Rev. Palaeobot. Palynol.*, 1997, No. 95, pp. 73–82, DOI: 10.1016/S0034-6667(96)00028-0.
6. Hemming J., Rath T., Computer-vision based weed identification under field condition using controlled lighting, *J. Agric. Eng. Res.*, 2001, No. 78, pp. 233–243.
7. Ahmad I., Muhamin A., Naeem Islam M., Real-time specific weed recognition system using histogram analysis, *Proc. World Acad. Sci. Eng. Technol.*, 2006, No. 16, pp. 145–148.
8. Tillet N.P., Hague T., Miles S.J. A field assessment of a potential method for weed and crop mapping geometry, *Comput. Electron. Agric.*, 2001, No. 32, pp. 229–246.
9. Aitkenhead M.J., Dalgetty I.A., Mullins C.E., McDonald A.J.S., St. Rachan, N.J.C., Weed and crop discrimination using image analysis and artificial intelligence methods, *Comput. Electron. Agric.*, 2003, No. 39, pp. 157–171.

10. Karcher D.E., Rechardson M.D., Quantifying turf grass color using digital image analysis, *Crop Sci.*, 2003, No. 43, pp. 943–951.
11. Aldea M., Frank T.D., Delucia E.H., A method for quantitative analysis for spatially variable physiological processes across leaf surfaces, *Photosynth. Res.*, 2006, No. 90, pp. 161–172.
12. Dell'Aquila A., van der Shoor R., Jalink A., Application of chlorophyll fluorescence in sorting controlled deteriorated white cabbage (*Brassica oleracea* L.) seeds, *Seed Science and Technology*, 2002, No. 30, pp. 689–695.
13. Dell'Aquila A., Red-Green-Blue (RGB) colour density as a non-destructive marker in sorting deteriorated lentil (*Lens culinaris* Medik.) seeds, *Seed Sci. & Technol.*, 2006, No. 34, pp. 609–619.
14. Dell'Aquila A., Application of a computer-aided image analysis system to evaluate seed germination under different environmental conditions, *Ital. J. Agron.*, 2004, No. 8, pp. 51–62.
15. Dana W., Ivo W., Computer image analysis of seed shape and seed color of flax cultivar description, *Comput. Electron. Agric.*, 2008, No. 61, pp. 126–135.
16. Honda H., Takikawa N., Noguchi H., Hanai T., Kobayashi T., Image analysis associated with a fuzzy neural network and estimation of shoot length of regenerated rice callus, *J. Ferment. Bioeng.*, 1997, No. 84, pp. 342–347.
17. Berzin I., Mills D., Merchuk J.C., A non-destructive method for secondary metabolite determination in hairy root cultures, *J. Chem. Eng. Jpn.*, 1999, No. 32, pp. 229–234.
18. Mahendra Prasad V.S.S., Dutta Gupta S., Trichromatic sorting of in vitro regenerated plants of gladiolus using adaptive resonance theory, *Curr. Sci.*, 2004, No. 87, pp. 348–353.
19. Prasad V.S.S., Dutta Gupta S., Photometric clustering of regenerated plants of gladiolus by neural network and its biological validation, *Comput. Electron. Agric.*, 2008, No. 60, pp. 8–17.
20. Yadav S.P., Ibaraki Y., Dutta Gupta S., Estimation of the chlorophyll content of micropropagated potato plants using RGB based image analysis, *Plant Cell Tiss. Org. Cult.*, 2010, No. 100, pp. 183–188.
21. Dutta Gupta S., Ibaraki Y., Pattanayak A., Development of a digital image analysis method for real-time estimation of chlorophyll content in micropropagated potato plants, *Plant Biotechnol. Rep.*, 2013, No. 7, pp. 91–97.
22. Musaev F.B., Arhipov M.V., Potrahov N.N., *Izvestija Timirjazevskoj sel'skhozjajstvennoj akademii*, 2014, No. 4, pp. 18–27. (In Russ.)
23. Buharov A.F., Baleev D.N., Musaev F.B., *Permskij agrarnyj vestnik*, 2015, No. 1 (9), pp. 6–11. (In Russ.)
24. Prijatkin N.S., Arhipov M.V., Gusakova L.P. [i dr.], *Agrofizika*, 2018, No. 2, pp. 29–39. (In Russ.)
25. Sandeep Varma V., Kanaka Durga K., Keshavulu K., Seed image analysis: its applications in seed science research, *International Research Journal of Agricultural Sciences*, 2013, Vol. 1 (2), pp. 30–36.
26. Kapadia V.N., Sasidharan N., Patil K., Seed Image Analysis and Its Application in Seed Science Research, *Advances in Biotechnology and Microbiology*, 2017, Vol. 7, Iss. 2, pp. 1–3.
27. Granitto P.M., Verdes P.F., Ceccatto H.A., Large-scale investigation of weed seed identification by machine vision, *Comput. Electron. Agric.*, 2005, No. 47, pp. 15–24, DOI: 10.1016/j.compag.2004.10.003.
28. Pourreza A., Pourrezab H., Abbaspour-Farda M.H., Sadrniaa H., Identification of nine Iranian wheat seed varieties by textural analysis with image processing, *Comput. Electron. Agric.*, 2012, No. 83, pp. 102–108, DOI: 10.1016/j.compag.2012.02.005.
29. Tanabata T., Shibaya T., Hori K., Ebana K., Yano M., SmartGrain: high-throughput phenotyping software for measuring seed shape through image analysis, *Plant Physiol.*, 2012, No. 4, pp. 1871–1880, DOI: 10.1104/pp.112.205120.
30. Herridge R.P., Day R.C., Baldwin S., Macknight R.C., Rapid analysis of seed size in Arabidopsis for mutant and QTL discovery, *Plant Methods*, 2011, No. 7, p. 3, DOI: 10.1186/1746-4811-7-3.
31. Whan A.P., Smith A.B., Cavanagh C.R., Ral J. P.F., Shaw L.M., Howitt C.A. [et al.], GrainScan: a low cost, fast method for grain size and colour measurements, *Plant Methods*, 2014, No. 10, pp. 1, DOI: 10.1186/1746-4811-10-2310.4225/08/536302C43FC28.

32. Bai X.D., Cao Z.G., Wang Y., Yu Z.H., Zhang X.F., Li C.N., Crop segmentation from images by morphology modeling in the CIE L*a*b color space, *Comput. Electron. Agric.*, 2013, No. 99, pp. 21–34, DOI: 10.1016/j.compag.2013.08.022.
33. Wiesnerová D., Wiesner I., Computer image analysis of seed shape and seed color for flax cultivar description, *Comput. Electron. Agric.*, 2008, No. 61, pp. 126–135, DOI: 10.1016/j.compag.2007.10.001.
34. Chen X., Xun Y., Li W., Zhang J., Combining discriminant analysis and neural networks for corn variety identification, *Comput. Electron. Agric.*, 2010, No. 71, pp. 48–53, DOI: 10.1016/j.compag.2009.09.003.
35. Zapotoczny P., Discrimination of wheat grain varieties using image analysis and neural networks, Part I, single kernel texture, *J. Cereal Sci.*, 2011, No. 54, pp. 60–68, DOI: 10.1016/j.jcs.2011.02.012.
36. Novaro P., Colucci F., Venora G., D'egidio M.G., Image analysis of whole grains: a noninvasive method to predict semolina yield in durum wheat, *Cereal Chem.*, 2001, No. 78, pp. 217–221, DOI: 10.1094/CCHEM.2001.78.3.217.
37. Tahir A.R., Neethirajan S., Jayas D.S., Shahin M.A., Symons S.J., White N.D.G., Evaluation of the effect of moisture content on cereal grains by digital image analysis, *Food Res. Int.*, 2007, No. 40, pp. 1140–1145, DOI: 10.1016/j.foodres.2007.06.009.
38. Sapirstein H.D., Neuman M., Wright E.H., Shweddyk E., Bushuk W., An instrumental system for cereal grain classification using digital image analysis, *J. Cereal Sci.*, 1987, No. 6, pp. 3–14, DOI: 10.1016/S0733-5210(87)80035-8.
39. Miller N.D., Haase N.J., Lee J., Kaeppler S. M., de Leon N., Spalding E.P., A robust, high-throughput method for computing maize ear, cob, and kernel attributes automatically from images, *Plant J.*, 2016, DOI: 10.1111/tpj.13320.
40. Sankaran S., Wang M., Vandemark G.J., Image-based rapid phenotyping of chickpeas seed size, *Eng. Agric. Environ. Food*, 2016, No. 9, pp. 50–55, DOI: 10.1016/j.eaef.2015.06.001.
41. 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, No. 43, pp. 337–366, DOI: 10.15258/sst.2015.43.3.16.
42. Williams K., Munkvold J., Sorrells M., Comparison of digital image analysis using elliptic fourier descriptors and major dimensions to phenotype seed shape in hexaploid wheat (*Triticum aestivum* L.), *Euphytica*, 2013, No. 190, pp. 99–116, DOI: 10.1007/s10681-012-0783-0.
43. Cervantes E., Martín J.J., Saadaoui E., Updated methods for seed shape analysis, *Scientifica*, 2016, 5691825, DOI: 10.1155/2016/5691825.
44. Jahnke S., Roussel J., Hombach T., Kochs J., Fischbach A., Huber G. [et al.], PhenoSeeder – a robot system for automated handling and phenotyping of individual seeds, *Plant Physiol.*, 2016, No. 172, pp. 1358–1370, DOI: 10.1104/pp.16.01122.
45. Roussel J., Geiger F., Fischbach A., Jahnke S., Scharr H., 3D surface reconstruction of plant seeds by volume carving: performance and accuracies, *Front. Plant. Sci.*, 2016, No. 7, pp. 745, DOI: 10.3389/fpls.2016.00745.
46. 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, No. 42, pp. 452–459, DOI: 10.1071/FP14068.
47. Friesen N., Fritsch R.M., Blattner F.R., Phylogeny and new infrageneric classification of Allium (Alliaceae) based on nuclear ribosomal DNA ITS sequences, *Aliso*, 2006, No. 22, pp. 372–395.
48. Neshati F., Fritsch R.M., Seed characters and testa sculptures of some Iranian Allium L. species (Alliaceae), *Feddes Repert*, 2009, No. 120, pp. 322–332.
49. Fritsch R.M., Blattner F.R., Gurushidze M., New classification of Allium L. subg. Melanocrommyum (Webb & Berthel) Rouy (Alliaceae) based on molecular and morphological characters, *Phyton*, 2010, No. 49, pp. 145–220.
50. Fritsch R.M., Abbasi M., Taxonomic Review of Allium subg. Melanocrommyum in Iran, Germany, Leibniz-Institut für Pflanzengenetik und Kulturpflanzenforschung Gatersleben, 2013.

51. Ivanova M.I., Buharov A.F., Baleev D.N., Buharova A.R., Kashleva A.I., Seredin T.M., Razin O.A., *Dostizhenija nauki i tehniki APK*, 2019, T. 33, No. 5, pp. 47–50, DOI: 10.24411/0235-2451-2019-10511. (In Russ.)
52. Bednorz L., Krzysińska A., Czarna A., Seed morphology and testa sculptures of some *Allium* L. species (Alliaceae), *Acta Agrobotanica*, 2011, Vol. 64 (2), pp. 33–38.
53. Musaev F.B., Soldatenko A.V. [i dr.], *Agrofizika*, 2019, No. 1, pp. 38–44. (In Russ.)
54. Musaev F.B., Prijatkin N.S., Arhipov M.V. [i dr.], *Kartofel' i ovoshhi*, 2018, No. 6, pp. 35–37. (In Russ.)
55. Choi Hyeok Jae, Giussani Liliana M., Jang Chang Gee, Oh Byoung Un, Cota-Sánchez J. Hugo., Systematics of disjunct northeastern Asian and northern North American *Allium* (Amaryllidaceae), *Botany*, 2012, No. 90 (6), pp. 491–508, DOI:10.1139/b2012-031.
56. Lazcano-Ramírez H.G., Gómez-Felipe A., Díaz-Ramírez D., Durán-Medina Y., Sánchez-Segura L., de Folter S., Marsch-Martínez N., Non-destructive Plant Morphometric and Color Analyses Using an Optoelectronic 3D Color Microscope, *Front. Plant Sci.*, 2018, No. 9, pp. 1409, DOI: 10.3389/fpls.2018.01409.
57. Kasajima I., Measuring plant colors, *Plant Biotechnology*, 2019, No. 36, pp. 63–75, DOI: 10.5511/plantbiotechnology.19.0322a.