

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕКЛОВИДНОСТИ ПШЕНИЦЫ МЕТОДОМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ В БЛИЖНЕМ ИК-ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Д. Е. ТРОШКИН¹, Е. В. ГОРБУНОВА¹, А. Н. ЧЕРТОВ¹, Е. А. СЫЧЕВА¹,
А. А. АЛЕХИН¹, И. Г. ЛОСКУТОВ², Е. В. ЗУЕВ²

¹Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: a.n.chertov@mail.ru

²Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова,
190031, Санкт-Петербург, Россия

Рассматриваются вопросы совершенствования метода оценивания стекловидности пшеницы с помощью технологий технического зрения и обработки изображений. Приведены результаты экспериментальных исследований, проведенных с использованием разработанного авторами аппаратно-программного комплекса, исследования проводились на 7 сортах твердой и мягкой пшеницы, отличающихся цветом и стекловидностью зерна. Верификация полученных результатов осуществлялась по стандартному методу визуального осмотра среза зерен. Установлено, что при анализе в видимом диапазоне длин волн сильное негативное влияние на конечный результат оказывает цвет зерна, что ставит под сомнение достоверность результатов, получаемых с помощью используемых в настоящее время диафаноскопов. Для устранения влияния выявленного негативного фактора предложено определять стекловидность на основании анализа изображений зерен в ближнем ИК-диапазоне длин волн. Повторно проведенные экспериментальные исследования подтвердили это предположение — зафиксирована высокая сходимость результатов, полученных методом технического зрения и визуального анализа среза зерна. Повторяемость результатов измерений находится в пределах 5 %, что соответствует требованиям стандарта.

Ключевые слова: пшеница, стекловидность, техническое зрение, анализ изображений, цвет, инфракрасное излучение

Введение. Стекловидность — важный показатель качества зерна, определяющий его дальнейшее использование. Для пшеницы, согласно ГОСТ 9353-2016, чем выше ее стекловидность, тем выше и подтип, который связывает устойчивые природные признаки зерна с технологическими, пищевыми и товарными достоинствами, например с содержанием белка [1, 2].

В соответствии с ГОСТ 10987-76 стекловидность пшеницы определяют по разрезу зерна или с помощью визуального диафаноскопа. Использование такого прибора позволяет анализировать стекловидность зерна без разреза, что, однако, также является достаточно трудоемкой процедурой. Кроме того, в силу особенностей строения и работы зрительного аппарата человека данный метод нельзя считать объективным.

Практически единственной альтернативой визуальным диафаноскопам на сегодняшний день является диафаноскоп „Янтарь“ производства компании „Экан“ (Санкт-Петербург) [3]. Принцип его работы заключается в просвечивании пробы зерна световым потоком в видимом диапазоне длин волн с последующей обработкой и анализом полученного изображения всех зерен. Измерения проводятся в полуавтоматическом или автоматическом режиме. Реализованы как стандартный анализ зерен в кассете, так и анализ при произвольном взаимном расположении зерен в зоне анализа. Из недостатков устройства следует отметить сохранение субъективности анализа, причиной которого является необходимость выбора оператором эталонных образцов стекловидных, частично стекловидных и мучнистых зерен на экране компью-

тера перед проведением измерений. Еще один недостаток — необходимость использования эталонов для настройки диафаноскопа. Как отмечают и сами разработчики [4], образцы зерна не могут являться эталонными вследствие неоднородности его структуры. На текущий момент данная проблема решается использованием в качестве эталонов оптических фильтров.

Кроме того, следует упомянуть работы [5—7], в которых предлагается метод промышленной сепарации зерна тритикале и пшеницы по показателю стекловидности, основанный на различиях отражательной способности стекловидных, частично стекловидных и мучнистых зерен в видимой области спектра. Однако правомерность использования подобного подхода для разделения зерна вызывает сомнение, поскольку показатель стекловидности физически связан с показателем прозрачности зерна, а не с характеристиками отраженного им излучения.

Таким образом, на сегодняшний день задачу объективного определения показателя стекловидности зерна, без полного отказа от зрительного анализа, нельзя считать решенной.

Коллективом авторов настоящей статьи проводится комплекс исследований для создания измерительного средства на основе технологий технического зрения и обработки изображений для полностью автоматизированной оценки „визуальных“ показателей качества зерна. В работе [8] были рассмотрены вопросы влияния взаимного расположения зерен в зоне анализа на результаты оценки общей стекловидности пробы и предложено решение, базирующееся на использовании ИК-диодов в качестве подсветки.

В настоящей статье исследуется достоверность определения стекловидности пшеницы на основании анализа изображений в видимом и ближнем ИК-спектральных диапазонах.

Постановка задачи. При проведении описанных в работе [8] исследований было замечено, что для разных сортов пшеницы существует разница в рассчитанных значениях показателя стекловидности, не связанная с плотностью расположения зерен. Было выдвинуто предположение, что этот эффект может быть обусловлен различным цветом исследуемых образцов зерна.

Мягкая пшеница традиционно разделяется на белые и красные сорта. За цвет краснозерной пшеницы отвечает, главным образом, пигмент красного или красно-коричневого цвета, содержащийся в плодовых оболочках [9]. У белого зерна данный пигмент отсутствует, вследствие чего за цвет зерновки отвечает в основном цвет эндосперма. Твердые же сорта пшеницы характеризуются желтоватым цветом эндосперма: „от желтого до янтарного“ (ГОСТ 9353-2016).

Таким образом, была поставлена задача поиска достоверного метода определения стекловидности пшеницы.

Условия, материалы и методы. Исследования проводились в Национальном исследовательском университете ИТМО, в Научно-исследовательском центре оптико-электронного приборостроения в период с сентября по декабрь 2019 г.

На рис. 1 представлен вид в разрезе аппаратно-программного комплекса (АПК), на котором проводились измерения, где 1 — модуль верхней подсветки, 2 — телевизионная камера с объективом, 3 — сменная кассета для размещения образцов анализируемого зерна, 4 — рассеивающая пластина, 5 — модуль нижней подсветки.



Рис. 1

Данный АПК является модификацией устройства, описанного в [10]. Он предназначен для анализа показателей качества зерновых культур и содержит сменные модули верхней и нижней подсветки на основе излучающих диодов, телевизионную камеру с объективом, передающую изображения на персональный компьютер, сменную кассету для размещения образцов анализируемого зерна, а также рассеивающую пластину, необходимую для создания равномерной освещенности зоны анализа от модуля нижней подсветки.

Непосредственно перед проведением измерений последовательно выполняются калибровочные процедуры: фотометрическая — для компенсации неравномерности освещения зоны анализа, колориметрическая — для задания точки белого, метрическая — для компенсации дисторсии объектива камеры.

Измерения проводятся следующим образом. Образцы зерна помещаются в специальную кассету на 100 ячеек (рис. 2), с помощью телевизионной камеры получают цифровое изображение зерен. Далее выполняется его обработка: расчет интегрального коэффициента пропускания для каждого зерна в кассете, сравнение полученных значений с заданными порогами, классификация зерен. По завершении процесса обработки на экран компьютера выводятся результаты анализа в виде количества стекловидных, частично стекловидных и мучнистых зерен в исследуемой пробе, а также показатель общей стекловидности пробы, рассчитанный по методике, описанной в ГОСТ 10987-76.



Рис. 2

Материалы для проведения исследований с описанием были предоставлены Всероссийским институтом генетических ресурсов растений им. Н. В. Вавилова (Санкт-Петербург): зерна мягкой пшеницы сортов Лютесценс 275 (красное, стекловидное), Г-39018 (белое, мучнистое), Jo 8149 (красное, мучнистое), HD 1639 (белое, мучнистое), а также зерна твердых сортов — Pinguino “S”, DF-33/777 и Тимирязевская степная, все три сорта — стекловидные. (Исходное описание сортов сохранено и приведено в скобках.)

Из этого материала по методике, описанной в ГОСТ 13586.3-2015, для каждого сорта была отобрана проба пшеницы, содержащая по 100 зерен.

Сначала каждая проба анализировалась с помощью АПК. Затем стекловидность определялась экспертом по методу поперечного разреза в соответствии с ГОСТ 10987-76. Это значение принималось за эталонное. Значения общей стекловидности, полученные двумя методами, сравнивались.

Важно оговорить критерий отнесения зерен к стекловидным, мучнистым и частично стекловидным при проведении анализа с помощью АПК. Для обеспечения единства измерений коэффициентов пропускания зерна необходимо было использовать одни и те же пороги классификации для пшеницы всех сортов. Пороги определялись эмпирически на зерне сорта Лютесценс 275, поскольку оно обладает наименьшим коэффициентом пропускания из всех представленных стекловидных сортов. Верификация порогов осуществлялась методом анализа поперечного среза зерен по ГОСТ 10987-76.

Результаты и обсуждение. В табл. 1 приведены результаты, полученные при анализе зерен пшеницы под излучением источника видимого диапазона на основе белых светодиодов марки ARL-3528NW со спектральным диапазоном излучения 380—780 нм.

Таблица 1

Сорт пшеницы	Характеристики зерна	Общая стекловидность пробы, %	
		Метод технического зрения, видимое излучение	Традиционный метод
Лютесценс 275	Красное, стекловидное	78	78
Г-39018	Белое, мучнистое	83	3
Jo 8149	Красное, мучнистое	48	0
HD 1639	Белое, мучнистое	97	11
Pinguino „S“	Янтарное, стекловидное	100	99
DF-333/77	Янтарное, стекловидное	100	100
Тимирязевская степная	Янтарное, стекловидное	100	98

При анализе на АПК в видимом диапазоне длин волн зерно считалось стекловидным, если его коэффициент пропускания $k > 0,55$; зерно считалось мучнистым при $k < 0,48$; в случае если значение k находилось в диапазоне $[0,48; 0,55]$, зерно считалось частично-стекловидным.

Как видно из табл. 1, единый подход к определению стекловидности зерна на основании измерения его коэффициента пропускания, без учета особенностей мягкости и цвета, позволил установить, что краснозерная пшеница с высокой стекловидностью (в данном случае это сорт Лютесценс 275) может обладать меньшим коэффициентом пропускания по сравнению с образцами белозерной пшеницы мучнистой консистенции (сорта Г-39018 и HD 1639). Возможно, данное различие в способности пропускать свет связано с наличием красно-коричневого пигмента, содержащегося во внешних оболочках зерна краснозерной пшеницы.

Для проверки предположения о влиянии цвета на определение показателя стекловидности и для изучения возможности его компенсации в АПК источник нижней подсветки на основе белых светодиодов был заменен на источник на основе излучающих ИК-диодов марки КА-3528F3С с пиковой длиной волны 940 нм.

Повторный эксперимент проводился по аналогичной методике, результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сорт пшеницы	Характеристики зерна	Общая стекловидность пробы, %	
		Метод технического зрения, ИК-излучение	Традиционный метод
Лютесценс 275	Красное, стекловидное	77,5	78
Г-39018	Белое, мучнистое	2,5	3
Jo 8149	Красное, мучнистое	0	0
HD 1639	Белое, мучнистое	17	11
Pinguino "S"	Янтарное, стекловидное	100	99
DF-333/77	Янтарное, стекловидное	100	100
Тимирязевская степная	Янтарное, стекловидное	99	98

При анализе в ИК-диапазоне длин волн зерно считалось стекловидным, если его коэффициент пропускания $k > 0,24$; зерно считалось мучнистым при $k < 0,2$; в случае если значение k находилось в диапазоне $[0,2; 0,24]$, зерно считалось частично-стекловидным.

Как видно из табл. 2, при использовании ИК-диодов в качестве источника нижней подсветки для обоих методов были получены близкие результаты, самое большое отклонение составило 6 % для сорта HD 1639. Таким образом, использование ИК-источника оказалось полностью оправданным.

Для определения повторяемости результатов измерений с помощью АПК была проведена серия из 5 повторных измерений двух проб пшеницы сортов Лютесценс-275 и HD 1639. Полученные результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Номер измерения	Количество стекловидных зерен, шт		Количество частично-стекловидных зерен, шт		Количество мучнистых зерен, шт		Общая стекловидность пробы, %	
	Лютесценс-275	HD 1639	Лютесценс-275	HD 1639	Лютесценс-275	HD 1639	Лютесценс-275	HD 1639
1	82	12	12	10	6	78	88	17
2	86	14	10	8	4	78	91	18
3	83	13	9	7	8	80	87,5	16,5
4	84	13	11	6	5	81	89,5	16
5	80	12	14	11	6	77	87	18,5
СКО	0,37	0,16						

Как видно из приведенных в табл. 3 данных, можно говорить о высокой повторяемости результатов. Некоторый разброс по количеству зерен, классифицированных в одну из групп согласно анализу в АПК, может быть связан с влиянием позиционирования зерна (вверх или вниз бороздкой) относительно системы регистрации. Тем не менее даже в этом случае коэффициент вариации не превысил 0,9%.

Заключение. Проведенные исследования показали значительное влияние цвета зерна пшеницы на определение показателя общей стекловидности пробы при анализе в видимом диапазоне длин волн.

Поскольку в применяемых в настоящее время диафаноскопах использован аналогичный принцип, при проведении анализа качества зерна на предприятиях зерновой промышленности могут возникать похожие ситуации. Особенно при наличии в пробах зерна пшеницы разных сортов.

Таким образом, существующие инструментальные средства для оценки стекловидности зерна пшеницы не гарантируют достоверности результатов.

Установлено, что данную проблему возможно решить, проводя анализ в ближнем ИК-диапазоне длин волн. Такой подход позволяет избежать субъективности визуального анализа и реализовать оценку стекловидности зерна пшеницы посредством измерения коэффициента пропускания зерна в соответствии со стандартами Государственной системы обеспечения единства измерений.

В свою очередь, это позволит реализовать объективное сравнение показателей стекловидности разных сортов зерна, а также открывает возможность по внесению изменений в ГОСТ 10987-76 за счет добавления в него объективных количественных параметров, характеризующих стекловидность зерна.

В настоящее время коллектив авторов продолжает работу по оцифровке показателей качества зерна пшеницы и других зерновых культур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sieber A., Würschum T., Longin C. F. H. Vitreosity, its stability and relationship to protein content in durum wheat // J. Cereal Sci. 2015. Vol. 61. P. 71—77.
2. Bin Xiao Fu, Kun Wang, Dupuis B. et al. Kernel vitreousness and protein content: Relationship, interaction and synergistic effects on durum wheat quality // J. Cereal Sci. 2018. Vol. 79. P. 210—217.
3. Антонов Р. Ю. Экспресс-анализатор стекловидности пшеницы — диафаноскоп „Январь“ // Хлебопродукты. 2019. № 5. С. 36—38.

4. Антонов Р. Ю., Рутковская Т. С. Измерительная сеть на основе электронного диафаноскопа „Янтарь“ // Хлебопродукты. 2019. № 11. С. 34—36.
5. Зверев С. В., Панкратьева И. А., Политуха О. В. и др. Спектрофотометрический метод повышения качества зерна пшеницы // Хлебопродукты. 2018. № 3. С. 46—48.
6. Зверев С. В., Политуха О. В., Панкратьева И. А. и др. Оценка стекловидности зерна тритикале и пшеницы по спектральным характеристикам // Хлебопродукты. 2017. № 9. С. 54—55.
7. Зверев С. В., Политуха О. В., Панкратьева И. А. и др. Фотосепарирование зерна тритикале по признаку стекловидности // Хранение и переработка зерна. 2017. № 3. С. 24—25.
8. Трошкин Д. Е., Горбунова Е. В., Алехин А. А. и др. Количественная оценка стекловидности пшеницы методом технического зрения // Хлебопродукты. 2019. № 6. С. 52—56.
9. Noriko Kohyama, Makiko Chono, Hiroyuki Nakagawa et al. Flavonoid compounds related to seed coat color of wheat // Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry. 2017. Vol. 81, iss. 11. P. 2112—2118.
10. Чертов А. Н., Горбунова Е. В., Перетягин В. С. и др. Аппаратно-программный комплекс для оценки качества сырья цветных камней, его классификации и сертификации // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 1. С. 55—60.

Сведения об авторах

- Дмитрий Евгеньевич Трошкин** — аспирант; Университет ИТМО; факультет прикладной оптики; E-mail: dimatroskin@mail.ru
- Елена Васильевна Горбунова** — канд. техн. наук; Университет ИТМО; научно-исследовательский центр оптико-электронного приборостроения; E-mail: evgorbunova@itmo.ru
- Александр Николаевич Чертов** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; факультет прикладной оптики; E-mail: a.n.chertov@mail.ru
- Елена Александровна Сычева** — канд. техн. наук; Университет ИТМО; отдел государственной аккредитации; E-mail: easycheva@itmo.ru
- Артем Андреевич Алехин** — канд. техн. наук; Университет ИТМО; факультет прикладной оптики; E-mail: alekhin.a.a@mail.ru
- Игорь Градиславович Лоскутов** — д-р биол. наук; Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова, отдел генетических ресурсов овса, ржи, ячменя; заведующий отделом; E-mail: i.loskutov@vir.nw.ru
- Евгений Валерьевич Зувев** — канд. с.-х. наук; Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова, отдел генетических ресурсов пшеницы; E-mail: e.zuev@vir.nw.ru

Поступила в редакцию
06.05.2020 г.

Ссылка для цитирования: Трошкин Д. Е., Горбунова Е. В., Чертов А. Н., Сычева Е. А., Алехин А. А., Лоскутов И. Г., Зувев Е. В. Определение стекловидности пшеницы методом технического зрения в ближнем ИК-диапазоне длин волн // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 7. С. 666—672.

**DETERMINATION OF WHEAT VITREOSITY
WITH MACHINE VISION IN THE NEAR IR WAVELENGTH RANGE**

**D. E. Troshkin¹, E. V. Gorbunova¹, A. N. Chertov¹, E. A. Sycheva¹,
A. A. Alekhin¹, I. G. Loskutov², E. V. Zuev²**

¹ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: a.n.chertov@mail.ru

²N. I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources,
190031, St. Petersburg, Russia

The problem of improvement of wheat vitreosity assessment method using technical vision and image processing technologies is considered. Results of experimental studies of seven hard and soft wheat varieties with different color and vitreosity performed with developed hardware and software complex are verified using the standard method of visual inspection of the grain. The grain color is found to have

a strong negative effect on vitreosity measurement in the visible wavelength range. This fact casts doubt on the reliability of results obtained using current methods of vitreosity assessment. To eliminate the influence of grain color, vitreosity analysis in the near-infrared wavelength range is proposed. The assumption is confirmed a set of experiments: high convergence of results obtained by technical vision and visual analysis is noted. The repeatability of measurement results is shown to be 5 %, and thus meet the State Standard requirements.

Keywords: wheat, vitreosity, technical vision, image processing, color, infrared radiation

REFERENCES

1. Sieber A.-N., Würschum T., Longin C.F.H. *J. Cereal Sci.*, 2015, vol. 61, pp. 71–77.
2. Bin Xiao Fu, Kun Wang, Dupui B. et al. *J. Cereal Sci.*, 2018, vol. 79, pp. 210–217.
3. Antonov R.Yu. *Khleboprodukty*, 2019, no. 5, pp. 36–38. (in Russ.)
4. Antonov R.Yu., Rutkovskaya T.S. *Khleboprodukty*, 2019, no. 11, pp. 34–36. (in Russ.)
5. Zverev S.V., Pankrat'yeva I.A., Politukha O.V. et al. *Khleboprodukty*, 2018, no. 3, pp. 46–48. (in Russ.)
6. Zverev S.V., Politukha O.V., Pankrat'yeva I.A. et al. *Khleboprodukty*, 2017, no. 9, pp. 54–55. (in Russ.)
7. Zverev S.V., Politukha O.V., Pankrat'yeva I.A. et al. *Khreneniye i pererabotka zerna*, 2017, no. 3, pp. 24–25. (in Russ.)
8. Troshkin D.E., Gorbunova E.V., Alokhin A.A. et al. *Khleboprodukty*, 2019, no. 6, pp. 52–56. (in Russ.)
9. Noriko Kohyama, Makiko Chono, Hiroyuki Nakagawa et al. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 2017, no. 11(81), pp. 2112–2118.
10. Chertov A.N., Gorbunova E.V., Peretyagin V.S. et al. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 1(63), pp. 55–60. (in Russ.)

Data on authors

- Dmitry E. Troshkin** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Applied Optics; E-mail: dimatroskin@mail.ru
- Elena V. Gorbunova** — PhD, ITMO University, Research Center of Optoelectronic Instrument Engineering; E-mail: evgorbunova@itmo.ru
- Aleksander N. Chertov** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Applied Optics; E-mail: a.n.chertov@mail.ru
- Elena A. Sycheva** — PhD, ITMO University, State Certification Department; E-mail: easycheva@itmo.ru
- Artem A. Alekhin** — PhD, ITMO University, Faculty of Applied Optics; E-mail: alekhin.a.a@mail.ru
- Igor G. Loskutov** — Dr. Sci.; N. I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Department of Genetic Resources of Oats, Rye, Barley; Head of the Department; E-mail: i.loskutov@vir.nw.ru
- Evgeny V. Zuev** — PhD; N. I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Wheat Genetic Resources Department; E-mail: e.zuev@vir.nw.ru

For citation: Troshkin D. E., Gorbunova E. V., Chertov A. N., Sycheva E. A., Alekhin A. A., Loskutov I. G., Zuev E. V. Determination of wheat vitreosity with machine vision in the near IR wavelength range. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 7. P. 666–672 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-7-666-672