

Возможности цифрового контроля и классификации зерновых культур

Д.Е. Трошкин¹, А.Н. Чертов¹, Е.В. Горбунова¹, А.А. Алёхин¹

¹ Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Представлены результаты исследований по определению параметров качества зерна пшеницы и пивоваренного ячменя методом компьютерного зрения, подтверждающие возможность перехода от субъективного визуального анализа к цифровому контролю.

Ключевые слова: компьютерное зрение, зерновые культуры, контроль качества, пшеница, ячмень, стекловидность.

1 Введение

Обеспечение продовольственной безопасности - одна из наиболее актуальных глобальных задач, стоящих на сегодняшний день перед человечеством. И одним из ее существенных элементов является контроль безопасности и качества пищевого сырья и готовых продуктов питания.

Основой рациона питания современного человека являются зерновые культуры и продукты их переработки, поэтому технологические процедуры анализа и сортировки зерна по показателям качества крайне важны.

Все методы, используемые для определения показателей качества зерна, можно условно разделить на две группы: физико-химические и органолептический контроль.

Физико-химические методы используются для определения широкого спектра показателей качества, таких как содержание белка и крахмала, качество клейковины, зольность и др. Данные методы отличаются достаточно высокой точностью, но часто требуют значительного времени на проведение экспертизы и наличия химических реагентов. Кроме того, объект исследования в большинстве случаев разрушается, что делает невозможными арбитражные процедуры. Альтернативой является использование автоматизированных аналитических комплексов, однако они дают усредненную информацию по пробе или партии, не позволяя оценить диапазон изменений показателей качества зерна, а значит и принять объективное и эффективное решение о его дальнейшем использовании.

Органолептические методы применяются для определения внешнего вида, вкуса, запаха. Как понятно из названия, эти методы опираются на сенсорные ощущения человека, что автоматически делает их субъективными, а значит ненадежными, поскольку восприятие человека зависит как от физического и морально-психологического состояния эксперта на момент проведения анализа,

так и от внешних условий контроля. Данное утверждение в полной мере касается и работы зрительного аппарата человека. Между тем, по визуальным критериям анализируются такие показатели качества зерновых культур как цвет, стекловидность, размеры и форма, засоренность и даже зараженность [1].

Цвет зерна связан с его генетическими особенностями и указывает на сорт и тип. Изменение цвета может свидетельствовать о наличии механических повреждений, несоблюдении условий хранения и переработки, а также на зараженность зерна различными вредителями и патогенами [2]. При этом зерно является сложным объектом для визуального анализа ввиду малых размеров, неоднородности формы, внешнего и внутреннего строения, а также неоднородной и часто не ярко выраженной окраски поверхности.

Стекловидность – один из наиболее интересных и важных показателей качества. Зерно с плотной упаковкой белковых зерен лучше пропускает свет, чем зерно с рыхлой структурой, содержащее большее количество крахмала. Таким образом, данный показатель качества связывает способность зерна пропускать оптическое излучение с особенностями его внутренней структуры и пищевой ценностью. Традиционно стекловидность определяется на специальных приборах - диафаноскопах. Анализ стекловидности сводится к подсчету оператором стекловидных и частично стекловидных зерен, лучше пропускающих свет, чем мучнистые. Другим методом определения данного показателя качества является метод визуального осмотра поперечного среза зерна [3]. Разумеется, в обоих случаях полученные результаты критически зависят от человеческого фактора.

Несмотря на очевидные недостатки, визуальный метод контроля, наряду с другими органолептическими методами, прочно закреплен в национальных и межгосударственных стандартах на зерновые культуры. Безусловно, данный факт препятствует развитию зерновой отрасли российского АПК и принятой Национальной программе «Цифровая экономика Российской Федерации».

Современный уровень развития информационных и оптических технологий позволяет решить задачи объективного контроля качества зерновых культур и в перспективе заместить до сих пор широко используемые методы визуального контроля технологиями компьютерного зрения.

Еще одним существенным преимуществом объективного контроля является возможность выявления корреляционных зависимостей между физико-техническими показателями качества зерновых культур и характеризующими их информационными параметрами, а также и между различными показателями качества. Прогнозные модели, построенные на подобных зависимостях, в свою очередь, позволяют оптимизировать технологические процессы сбора, подработки, хранения, переработки и использования зерна.

В материалах данной работы обобщены результаты исследований коллектива авторов, проведенных в 2019-2020 гг. на зерне пшеницы и пивоваренного ячменя. В первую очередь, исследованию подлежал показатель качества «стекловидность» и принципы обеспечения его объективного контроля для единичного зерна. Подобный фокус исследования был обусловлен, в том числе, наличием подтвержденной корреляционной связи стекловидности с содержанием в зерне

белка и качеством клейковины [4, 5], а значит, и возможностями более точного их определения.

2 Материалы и методы решения задач

Для проведения экспериментальных исследований использовались образцы пшеницы, предоставленные Всероссийским Институтом Растениеводства им. Н.И. Вавилова (г. Санкт-Петербург), а также образцы пивоваренного ячменя, предоставленные ООО «Ностерс» (г. Санкт-Петербург). Пробы зерна отбирались в соответствии с ГОСТ 13586.3-2015 [6].

Для проведения экспериментальных исследований использовалось устройство собственной разработки, вид в разрезе которого представлен на рис. 1. Оно содержит два источника, верхний и нижний, излучающие в видимом диапазоне длин волн, рассеивающую пластину, специальную кассету на 100 ячеек для размещения образцов зерна и телевизионную камеру с объективом, передающую цифровые изображения зерен на персональный компьютер для дальнейшей обработки.



Рис. 1. Аппаратно-программный комплекс: 1 – верхний источник излучения, 2 – камера с объективом, 3 – кассета для размещения образцов зерна, 4 – светорассеивающая пластина, 5 – нижний источник излучения

Для обеспечения объективности результатов анализа перед проведением измерений проводились колориметрическая, фотометрическая и метрическая калибровки.

Измерения проводились следующим образом. Анализируемые зерна пшеницы и ячменя помещались в специальную кассету на 100 ячеек, как показано на рис. 2. Кассета с образцами помещалась в зону анализа, производилась съемка зерен в режиме «на пропускание» с использованием нижнего источника излучения.

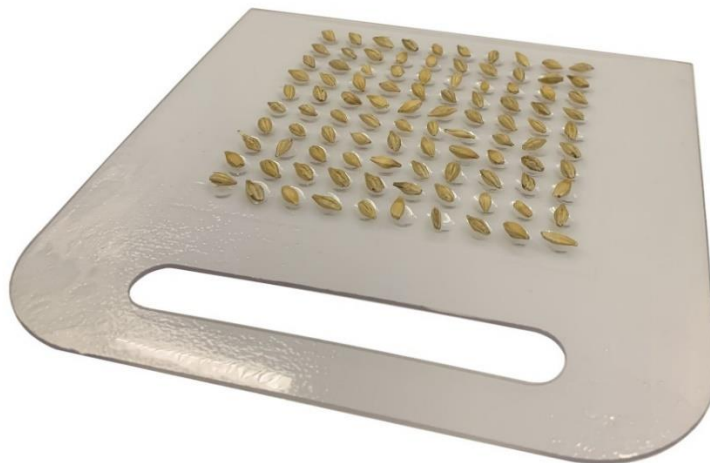


Рис. 2. Размещение исследуемых образцов в кассете

Полученные изображения обрабатывались алгоритмом, реализованным в среде MATLAB. Алгоритм обработки цифровых изображений зерен осуществлял предобработку (устранение шумов, неравномерности облученности зоны анализа, увеличение контрастности), выполнял сегментацию. В результате данной процедуры находили области изображения, соответствующие зерновкам.

Далее выполнялся расчет общей стекловидности пробы. Анализ стекловидности предполагает разделение зерна на три группы: стекловидное, частично-стекловидное и мучнистое. Для этого рассчитывался показатель стекловидности каждой зерновки, полученные значения сравнивались с пороговыми значениями для каждой из трех групп, определенными эмпирически, методом осмотра поперечного разреза [3]. По результатам сравнения каждая зерновка относилась к одной из указанных групп.

Расчет показателя стекловидности выполнялся с использованием областей, полученных при сегментации цифровых изображений зерен. В каждой из полученных областей оригинального изображения, переведенного в градации серого, показатель стекловидности каждой зерновки рассчитывался как:

$$V_i = \frac{\sum_{n=1}^N Int_n}{N}, \quad (1)$$

где V_i – показатель стекловидности i -го объекта, Int_n – значение пикселя изображения, принадлежащее объекту, N – количество пикселей на цифровом изображении, принадлежащих данной зерновке.

После разделения всех зерновок по трем группам рассчитывалась общая стекловидность пробы зерна по формуле (2) из ГОСТ 10987-76 [3]:

$$O = F + \frac{P}{2}, \quad (2)$$

где O – общая стекловидность пробы, F – количество стекловидных зерен, P – количество частично-стекловидных зерен.

3 Результаты экспериментальных исследований

3.1 Особенности цифрового анализа стекловидности зерна пшеницы

Влияние плотности размещения зерен на результаты анализа

Первоначально предполагалось, что, помимо оговоренной субъективности, единственным недостатком стандартного метода анализа стекловидности с использованием диафаноскопа является обязательное размещение исследуемых образцов в кассете на сто отдельных ячеек. Для проведения исследований стекловидности без разделения зерен был реализован алгоритм определения стекловидности пробы пшеницы по цифровым изображениям зерен с функцией сегментации. Для проверки работоспособности алгоритма была проведена серия из 10 измерений пробы краснозерной пшеницы сорта Лютеценс 275.

Измерения проводились при постепенном увеличении плотности размещения зерен (рис. 3).



Рис. 3. Изменение плотности размещения зерен: измерение №1 – слева и измерение №10 – справа

Результаты определения общей стекловидности пробы при различной кучности расположения зерен представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчета общей стекловидности пробы пшеницы при различной кучности расположения зерен в зоне анализа

№	Кол-во стекловидных зерен, шт	Кол-во частично-стекловидных зерен, шт	Кол-во мучнистых зерен, шт	Общая стекл-ть, %
1	52	39	9	72
2	51	37	12	70
3	46	39	15	66
4	37	39	24	57
5	33	44	23	55
6	41	36	23	59
7	30	46	24	53
8	41	44	15	63
9	37	40	23	57
10	19	55	26	47

Как видно из таблицы 1, при увеличении плотности размещения зерен в зоне анализа происходит снижение интенсивности оптического излучения, проходящего через них. Данное снижение интенсивности происходит вследствие уменьшения светового потока, достигающего поверхности зерна в результате его частичного поглощения соседними зернами. Поскольку достоверность полученных результатов зависит от плотности размещения, при анализе стекловидности без кассеты в видимом диапазоне длин волн необходимо обеспечить достаточное расстояние между зернами.

Влияние цвета зерен на результаты анализа стекловидности

При анализе стекловидности в пробе пшеницы могут оказаться зерна разных сортов, красные и белые. При этом в явном виде в ГОСТ не указывается, стоит ли определять стекловидность для красного и белого зерна отдельно. По всей видимости, причиной является отсутствие объективной методики неразрушающего контроля цвета зерна. Тем не менее, было решено провести соответствующее исследование с использованием проб пшеницы двух разных сортов: Лютеценс 275 (стекловидная, краснозерная) и HD 1639 (мучнистая, белозерная). Цветные изображения проб представлены на рис. 4.

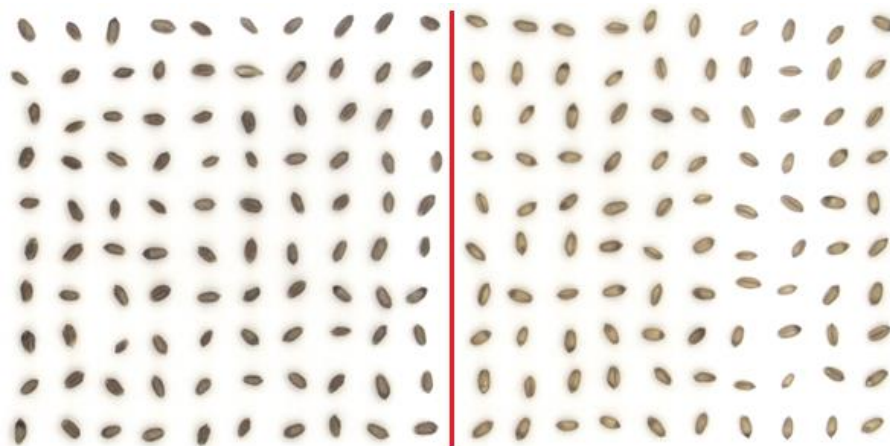


Рис. 4. Краснозерная и белозерная пшеницы: Лютесценс 275 (слева) и HD 1639 (справа)

После проведения измерений стекловидность проб определялась методом осмотра поперечного среза. Значения общей стекловидности, полученные при помощи алгоритма и по стандартной методике представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты расчета общей стекловидности пробы пшеницы методом разрезания и при помощи алгоритма

Сорт	Цвет	Общая стекловидность по ГОСТ, %	Общая стекловидность, рассчитанная алгоритмом, %
Лютесценс-275	красный	86	80
HD 1639	белый	14	88

Из таблицы 2 видно, что при расчете общей стекловидности проб пшеницы разработанным авторами алгоритмом получили завышенное значение для белозерной пшеницы сорта HD 1639. Данный эффект возник вследствие наличия красного пигмента в плодовых оболочках краснозерной пшеницы, обладающего большим поглощением в видимой области, и отсутствия данного пигмента у образцов белозерного сорта.

Поскольку в партиях зерна практически всегда присутствует смесь обоих типов (красной и белой) пшеницы, результаты оценки стекловидности, получаемые в видимом диапазоне длин волн, не надежны, и могут давать большую ошибку.

Использование источника излучения ближнего ИК-диапазона для анализа стекловидности.

В качестве решения проблем влияния плотности размещения и цвета зерна было предложено использовать источник излучения ближнего ИК-диапазона в модуле нижней подсветки. При этом были продублированы эксперименты, описанные выше.

Данные по исследованию влияния плотности размещения представлены в таблице 3. Визуализация опытов с максимальной и минимальной плотностью размещения зерен краснозерной пшеницы в зоне анализа представлена на рисунке 5.

Таблица 3. Результаты расчета общей стекловидности пробы краснозерной пшеницы в ИК-диапазоне

№	Стекл-х зерен, шт	Частично-стекл-х, шт	Мучнистых, шт	Общ. стекл., %
1	82	12	6	88
2	86	10	4	91
3	83	9	8	87,5
4	84	11	5	89,5
5	80	14	6	87
6	80	15	5	87,5
7	84	10	6	89
8	84	9	7	88,5
9	85	8	7	89
10	83	14	3	90

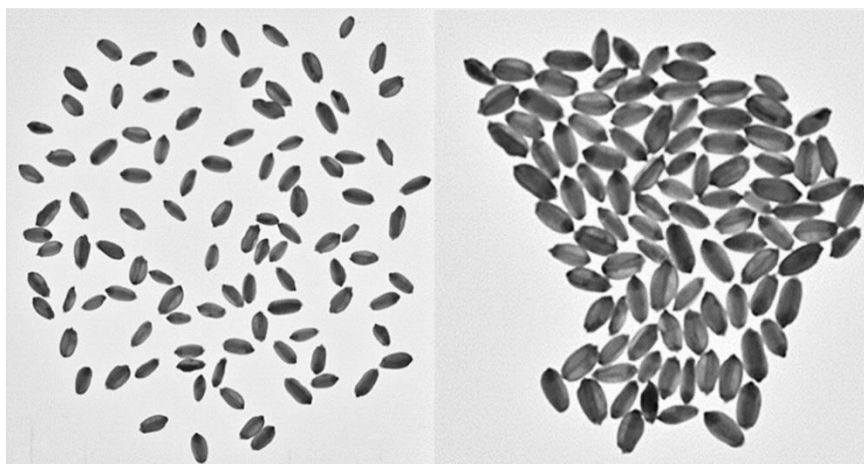


Рис. 5. Изменение плотности размещения зерен при съемке в ИК-диапазоне

Для оценки повторяемости результатов работы алгоритма определения общей стекловидности было рассчитано среднеквадратичное отклонение (СКО), полученное значение составило 1.1. Максимальный разброс значений, полученных в ходе эксперимента, составил 4%, что соответствует требованиям ГОСТ [3].

При определении влияния цвета зерна на показатель стекловидности исследование проводилось отдельно для красной и белой пшениц в серии из 5 повторных опытов. Результаты представлены в таблицах 4 – 5.

Таблица 4. Результаты расчета общей стекловидности пробы краснозерной пшеницы в ИК-диапазоне

№	Кол-во стекловидных зерен, шт	Кол-во частично-стекловидных зерен, шт	Кол-во мучнистых зерен, шт	Общая стекловидность, %
1	82	12	6	88
2	86	10	4	91
3	83	9	8	87,5
4	84	11	5	89,5
5	80	14	6	87
СКО	0,37			

Таблица 5. Результаты расчета общей стекловидности пробы белозерной пшеницы в ИК-диапазоне

№	Кол-во стекловидных зерен, шт	Кол-во частично-стекловидных зерен, шт	Кол-во мучнистых зерен, шт	Общая стекловидность, %
1	12	10	78	17
2	14	8	78	18
3	13	7	80	16,5
4	13	6	81	16
5	12	11	77	18,5
СКО	0,16			

Как видно из таблиц 4-5, для стекловидного (красного) и мучнистого (белого) сортов пшеницы получили адекватные значения общей стекловидности, соответствующие действительности. Кроме того, разброс полученных значений общей стекловидности исследуемых проб при проведении повторных измерений составил менее 5%, что соответствует требованиям ГОСТ 10987-76 [3]. Таким образом, можно сделать вывод, что использование источника ИК-излучения в модуле нижней подсветки позволяет практически полностью исключить влияние плотности размещения образцов и их цвета на результаты анализа стекловидности.

3.2 Использование технологий компьютерного зрения для анализа качества пивоваренного ячменя

Определение стекловидности пивоваренного ячменя в настоящее время не регламентируется государственными стандартами. Для решения этой задачи используется ГОСТ 10987-76 [3] для определения стекловидности пшеницы и риса. Между тем, данный показатель широко применяется в работе пивоварен и

солодовен, так как позволяет быстро оценить качество исходного сырья для солодоращения [7]. Данный показатель также используется при оценке friability и выравненности пробы, которые, в свою очередь, связаны со способностью к прорастанию: более плотное стекловидное зерно прорастает медленнее мучнистого, поэтому для изготовления качественного сула нужно, чтобы зерна были примерно одинаковы по стекловидности – так они прорастут примерно в одинаковое время и сопутствующие физико-химические процессы, такие, как например, превращение крахмала в простые сахара, пройдут максимально полно и эффективно. Почему же стекловидность ячменя не включена в указанный ГОСТ? Дело в том, что ячмень отличается наличием плотных плодовых оболочек, сильно поглощающих любое падающее на них излучение.

Таким образом, при анализе на диафаноскопе разницы между мучнистыми и стекловидными зернами практически не будет видно невооруженным глазом. Но при использовании систем компьютерного зрения возможно увеличить экспозицию, тем самым расширив динамический диапазон. При проведении соответствующего анализа по методике, описанной ранее, можно получить численные значения показателя стекловидности для каждого из зерен (рис. 6).

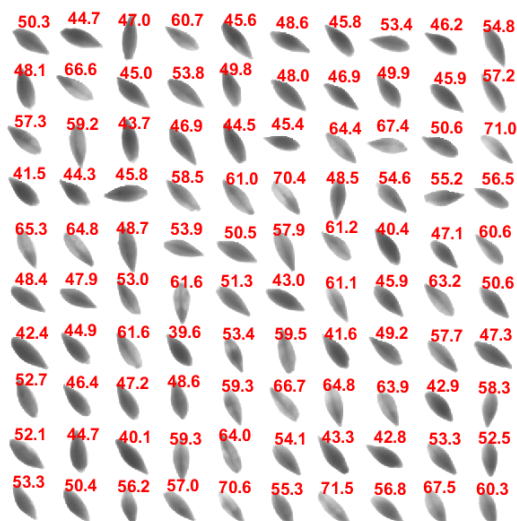


Рис. 6. Показатели стекловидности для пробы ячменя

Таким образом, становится возможным определение единых пороговых значений по показателю стекловидности для разделения зерен ячменя на стекловидные, частично-стекловидные и мучнистые, по аналогии с тем, как это сделано для зерна пшеницы [8].

Кроме того, совокупность полученных данных по одной или нескольким пробам может быть использована для получения распределений зерен по показателю стекловидности. Пример подобной гистограммы по пробе, состоящей из 100 зерен, приведен на рис. 7.

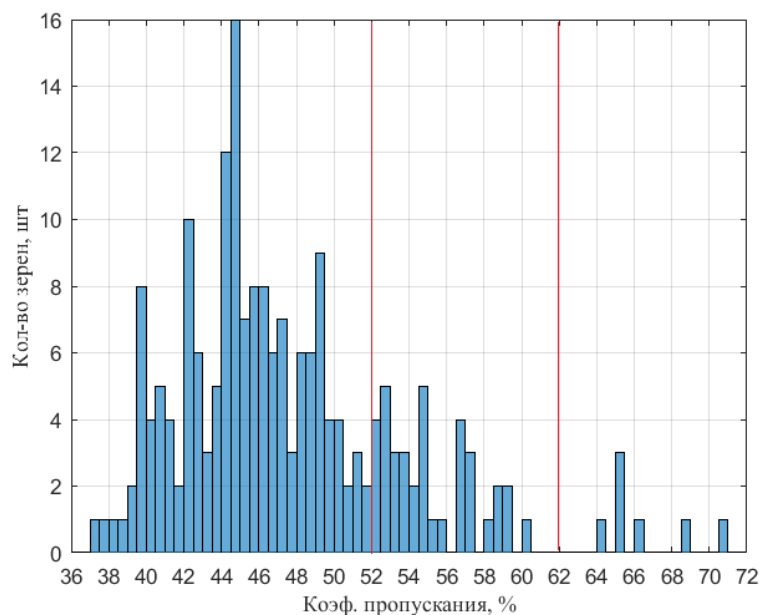


Рис. 7. Пример распределения зерен пробы ячменя по показателю стекловидности

Такая гистограмма очень полезна для оценки выравненности пробы и позволяет определять качество уже не только в усредненном, выраженном одним числом, виде, но и более детально. В частности, данный инструмент может быть полезен для выявления недобросовестного подмешивания в партию зерна низкого качества.

3.3 Иные показатели, определяемые методом компьютерного зрения, перспективы использования

Компьютерное зрение, безусловно, может быть полезно и для определения параметров размера и формы. Наличие метрической калибровки позволяет определять размеры зерен с высокой точностью. В устройстве, описанном в разделе 2, точность определения размера составляет 0,001 мм. А зная длину и ширину зерна, возможно определить и его индекс формы, а также и выравненность пробы по данному показателю (рис. 8).

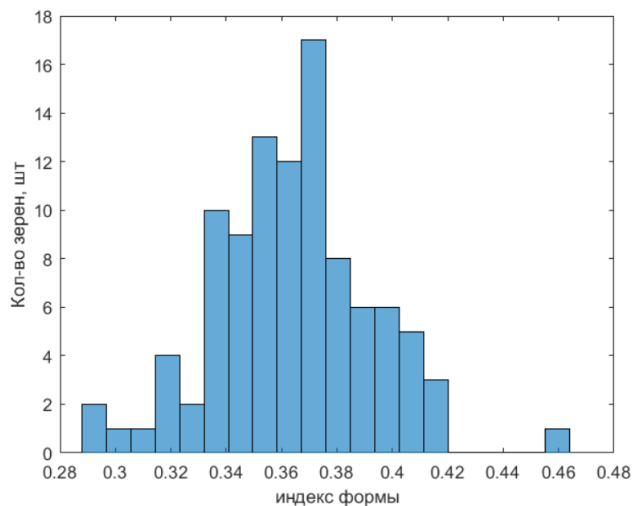


Рис. 8. Пример распределения зерен пробы ячменя по индексу формы

Метрическая информация может быть использована при определении процента мелких зерен в партии, поврежденных зерен, наличия примесей, а также при решении задач селекции и генетики.

4 Заключение

Описанные результаты исследований, полученные коллективом авторов, являются основой для цифровизации контроля показателей качества зерновых культур на принципах обеспечения единства измерений в соответствии с метрологическими стандартами.

Научная новизна проведенных исследований заключается:

- в предложенном принципе неразрушающей объективной оценки стекловидности каждого зерна пробы на примере пшеницы и пивоваренного ячменя;
- в выявленных зависимостях результата определения стекловидности пробы зерна методом компьютерного зрения от плотности расположения зерен в зоне анализа и цвета зерна;
- во впервые предложенном подходе к оценке выравненности пробы зерна по стекловидности и параметрам размера и формы.

Следует отметить практическую важность полученных результатов не только для задач лабораторного контроля, но и для промышленной сортировки, т.к. при наличии объективных критериев классификации зерна по качеству появляется возможность и для решения на их основе задач целевой подработки уже очищенного от сорных примесей зерна.

В настоящее время коллектив авторов проводит исследования с целью установления устойчивых корреляционных зависимостей между стекловидностью зерна и другими показателями качества, в том числе, содержанием белка в отдельном зерне, фриабильностью и стекловидностью пивоваренного солода и др.

Литература

1. ГОСТ 9353-2016 Пшеница. Технические условия
2. Комышев Е., Генаев М., Афонников Д.: Анализ цветовых и текстурных характеристик зерен злаков на цифровых изображениях // Вавиловский журнал генетики и селекции 2020, vol 24(4), pp. 340-347, doi:10.18699/VJ20.626
3. ГОСТ 10987-76. Зерно. Методы определения стекловидности.
4. Bin Xiao Fu, Kun Wang, Brigitte Dupuis, Dale Taylor, Shin Nam. Kernel vitreousness and protein content: Relationship, interaction and synergistic effects on durum wheat quality // Journal of Cereal Science. 2018. Vol. 79. PP. 210-217. doi: 10.1016/j.jcs.2017.09.003.
5. Alisa-N. Sieber, Tobias Würschum, C. Friedrich H. Longin. Vitreosity, its stability and relationship to protein content in durum wheat // Journal of Cereal Science. 2015. Vol. 61. PP. 71-77. doi: 10.1016/j.jcs.2014.10.008.
6. ГОСТ 13586.3-2015. Зерно. Правила приемки и методы отбора проб
7. Н. И. Васько, М. Р. Козаченко, П. Н. Солонечный, О. В. Солонечная, О. Е. Важенина, А. Г. Наумов, А. В. Зимогляд, Т. А. Шелякина Стекловидность эндосперма и содержание белка в зерне сортов пленчатого и голозерного ячменя // Зернобобовые и крупяные культуры. 2018. №4 (28).
8. Трошкин Д.Е., Горбунова Е.В., Алёхин А.А., Горбачёв А.А., Чертов А.Н., Лоскутов И.Г., Зуев Е.В. Количественная оценка стекловидности пшеницы методом технического зрения // Хлебопродукты -2019. - № 6.- С. 52-56.