
**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРИБОРОВ
И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МЕТОДИК**

УДК 681.785.472+681.785.433

© Р. Ю. Антонов, 2021

**ОПИСАНИЕ ЗЕРНА МОДЕЛЮ СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНОЙ
ОПТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ С ЦЕЛЮ МЕЖЛАБОРАТОРНОГО
СОГЛАСОВАНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЯ СТЕКЛОВИДНОСТИ**

В настоящее время за счет появления инструментальных объективных методов определения стекловидности зерна возникает возможность обеспечить единство измерений данного показателя в разных лабораториях. В статье предлагается модель описания зерна как неоднородной оптической среды и интерпретация показателя стекловидности как характеристики рассеяния света. Приводится способ вычисления параметров математической модели и оценки коэффициента рассеяния с использованием RGB-камеры. Показано, что реализация оценки стекловидности зерна на основе коэффициента рассеяния позволяет получать удовлетворительный результат согласования при измерениях в разных лабораториях.

Кл. сл.: автоматизация измерений, согласование измерений, стекловидность, математическое моделирование, оптические свойства зерна

ВВЕДЕНИЕ

Вопросам автоматизации органолептических измерений сейчас уделяется большое внимание. В частности, публикуются исследования о возможностях различных методов оценки стекловидности зерна. Авторы работ получают результаты, показывающие техническую возможность определять стекловидность методами ИК спектроскопии [1], техническим зрением [2], рентгенографией [3], спектроскопии в видимой области [4]. Компанией "Экан", в свою очередь, предлагается метод оптико-компьютерной диагностики, реализованный на базе диафаноскопа "Янтарь". Метод доказал свою состоятельность в задаче рутинного анализа стекловидности в лабораториях [5]. Т.е. задачу автоматизации процедуры анализа на данный момент можно считать решенной. Следующая актуальная проблема, которая возникает при использовании инструментальной объективной оценки стекловидности, заключается в обеспечении единства измерений в разных лабораториях.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Для решения практической задачи целесообразно дать определение стекловидности в технических терминах, т.к. существующее определение дано для зрительного восприятия человека [6]. Когда говорят о стекловидности, имеют в виду соотношение мучнистого и стекловидного эндосперма зерна. Именно количество мучнистых вкраплений

в значительной степени определяет технологические свойства зерна. С точки зрения оптики стекловидный эндосперм можно описать как однородную прозрачную среду с постоянным коэффициентом преломления. Эндосперм мучнистого зерна можно смоделировать порошком с частицами случайной формы. Т.е. в стекловидном зерне ослабление потока падающего света происходит только за счет процесса поглощения, а в мучнистом — за счет процессов рассеяния и поглощения. Таким образом, стекловидность зерна предполагается оценивать с помощью характеристики рассеяния (больше рассеяние — меньше стекловидность, см. рис.).

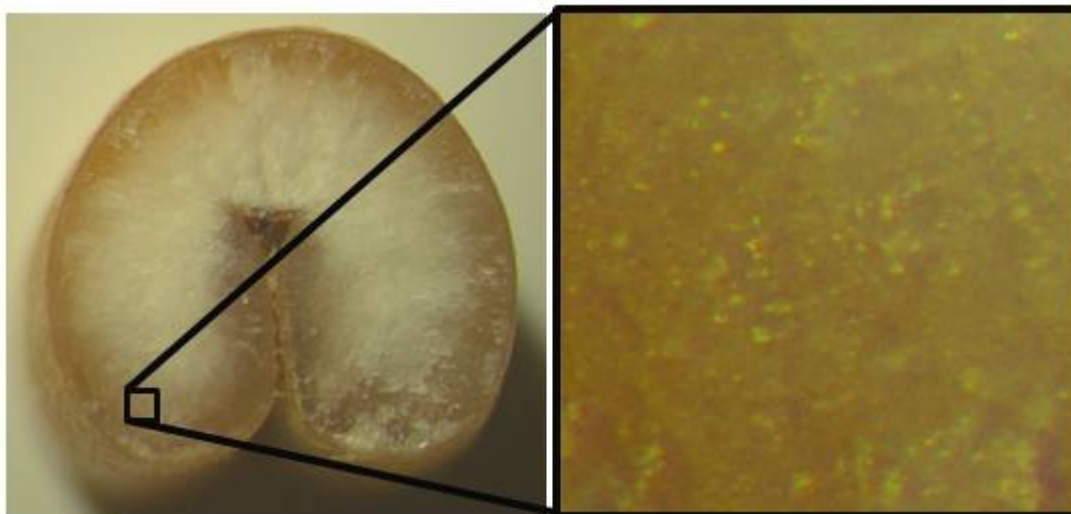
Для оценки характеристики рассеяния нужно отметить, что в данном случае речь идет об объемной доле рассеивающих частиц от 0% (абсолютно стекловидное зерно) до 100% (абсолютно мучнистое зерно); освещение образца зерна применяется диффузное. В таких условиях для численной оценки коэффициента рассеяния рационально применить теорию Кубелки и Мунка [7]; [8]. В данной теории поток проходящего излучения для конечной среды описывается уравнением:

$$F(\tau) = C_1 e^{a\tau} + C_2 e^{-a\tau}, \quad (1)$$

где F — поток излучения, τ — оптическая длина, C_1, C_2 — постоянные коэффициенты.

$$a = \sqrt{K(K + 2S)}, \quad (2)$$

где K — коэффициент поглощения, S — коэффициент рассеяния.



Рассеивающие мучнистые частицы в зерне пшеницы

Коэффициенты C_1 , C_2 вычисляются экспериментально один раз. При определении стекловидности пробы фактически необходимо вычислить K и S . Для оценки степени стекловидности каждого зерна при анализе на нескольких длинах волн (λ_1 , λ_2 , ..., λ_N) можно записать систему уравнений

$$\begin{cases} F_1(\tau) = C_{11}e^{\tau\sqrt{K_1(K_1+2S)}} + C_{21}e^{-\tau\sqrt{K_1(K_1+2S)}}, \\ F_2(\tau) = C_{12}e^{\tau\sqrt{K_2(K_2+2S)}} + C_{22}e^{-\tau\sqrt{K_2(K_2+2S)}}, \\ \dots \\ F_N(\tau) = C_{1N}e^{\tau\sqrt{K_N(K_N+2S)}} + C_{2N}e^{-\tau\sqrt{K_N(K_N+2S)}}, \end{cases} \quad (3)$$

где K_1 , K_2 , ..., K_N — коэффициенты поглощения на длинах волн λ_1 , λ_2 , ..., λ_N .

При этом если длины волн падающего излучения близки и много меньше размера рассеивающих частиц, то можно сделать допущение, что коэффициент рассеяния S одинаков для всех длин волн.

Предполагается, что стекловидность зерна пропорциональна S .

Второе допущение состоит в том, что все зерна одной пробы имеют одинаковый коэффициент поглощения на N -й длине волны (одинаковый "цвет").

Пользуясь вторым допущением, можно записать общую систему уравнений для всей пробы из M зерен:

$$\begin{cases} F_{11}(\tau_1) = C_{11}e^{\tau_1\sqrt{K_1(K_1+2S_1)}} + C_{21}e^{-\tau_1\sqrt{K_1(K_1+2S_1)}}, \\ \dots \\ F_{1N}(\tau_1) = C_{1N}e^{\tau_1\sqrt{K_N(K_N+2S_1)}} + C_{2N}e^{-\tau_1\sqrt{K_N(K_N+2S_1)}}, \\ \dots \\ \dots \\ F_{M1}(\tau_M) = C_{11}e^{\tau_M\sqrt{K_1(K_1+2S_M)}} + C_{21}e^{-\tau_M\sqrt{K_1(K_1+2S_M)}}, \\ \dots \\ F_{MN}(\tau_M) = C_{1N}e^{\tau_M\sqrt{K_N(K_N+2S_M)}} + C_{2N}e^{-\tau_M\sqrt{K_N(K_N+2S_M)}}. \end{cases} \quad (4)$$

При решении системы уравнений (4) вычисляются коэффициенты S_1 , S_2 , ..., S_M , характеризующие стекловидность зерен 1, 2, ..., M .

Для того чтобы согласовать измерения на нескольких приборах, необходимо измерить начальный световой поток $F(0) = F_0$ (разный для каждого прибора). Прямое измерение не всегда возможно, т.к. величина F_0 превышает световой поток после прохождения зерна более чем на порядок. Поэтому для измерения F_0 предлагается предварительно ослабить световой поток с помощью эталонных образцов с нулевым рассеянием. При наличии двух таких эталонов разной толщины t_1 и t_2 с одинаковым коэффициентом поглощения K , пользуясь законом поглощения Бугера—Ламберта—Бера, можно записать систему уравнений

$$\begin{cases} F_{R1} = F_0 e^{-K t_1}, \\ F_{R2} = F_0 e^{-K t_2}. \end{cases} \quad (5)$$

Тогда

$$K = -\frac{\ln(F_{R2}/F_{R1})}{t_2 - t_1}, \quad (6)$$

$$F_0 = \frac{F_{R1}}{e^{-Kt_1}} = \frac{F_{R2}}{e^{-Kt_2}}, \quad (7)$$

где F_{R1} — световой поток после прохождения первого эталона, F_{R2} — световой поток после прохождения второго эталона, K — коэффициент поглощения эталонов.

Для учета разного начального светового потока приборов предполагается найти связь между F_0 и коэффициентами C_1 , C_2 таким образом, чтобы вычисленные на разных приборах значения S_1 , S_2 , ..., S_M из системы (4) были одинаковы.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Практическая реализация проводилась на базе диафаноскопа "Янтарь" производства фирмы "Экан". Принцип работы диафаноскопа заключается в просвечивании пробы зерна равномерным диффузным световым потоком в видимой области спектра с дальнейшим получением цифрового изображения, его программной обработкой и выдачей результата определения стекловидности. Суть предварительной программной обработки, связанная с сегментированием и коррекцией яркости изображения, изложена в [5].

В качестве меры светового потока F , прошедшего через зерно, используется его средняя скорректированная яркость [5]. В качестве оценки оптической длины τ принимается ширина проекции изображения зерна, т.к. существует связь между линейными размерами зерна. Для оценки коэффициентов C_1 , C_2 был поставлен эксперимент. Были взяты 20 образцов зерна с разной стекловидностью, разных сортов, регионов произрастания. Для каждой пробы было записано и численно решено уравнение (4). Анализ результатов вычисления показал, что слагаемое $C_1 e^{\tau \sqrt{K(K+2S)}}$ вносит несущественный вклад в оцениваемый световой поток F . Поэтому для практического применения рационально упростить модель и считать $C_1 = 0$. Тогда

$$F(0) = C_2 = F_0, \quad (8)$$

$$F(\tau) = F_0 e^{-\tau \sqrt{K(K+2S)}}. \quad (9)$$

Также расчет показал, что для оценки коэффициента рассеяния целесообразно использовать яркость красного и зеленого каналов RGB-камеры. Коэффициент поглощения зерна для синего цвета значительно больше коэффициента рассеяния, по-

этому включение дополнительных уравнений для синего цвета не улучшает результат вычислений.

Таким образом, система уравнений (4) принимает вид

$$\begin{cases} R_1(w_1) = R_0 e^{-w_1 \sqrt{K_R(K_R+2S_1)}}, \\ G_1(w_1) = G_0 e^{-w_1 \sqrt{K_G(K_G+2S_1)}}, \\ \dots \\ \dots \\ R_M(w_M) = R_0 e^{-w_M \sqrt{K_R(K_R+2S_M)}}, \\ G_M(w_M) = G_0 e^{-w_M \sqrt{K_G(K_G+2S_M)}}, \end{cases} \quad (10)$$

где R_i , G_i , $i = 1, 2, \dots, M$ — оцененный световой поток, прошедший через i -е зерно для красного и зеленого каналов соответственно; w_i , $i = 1, 2, \dots, M$ — ширина проекции i -го зерна; R_0 , G_0 — оцененный начальный световой поток для красного и зеленого каналов соответственно.

Оценка коэффициентов рассеяния зерна на конкретном приборе сводится к измерению начальных световых потоков R_0 , G_0 и численному решению системы уравнений (10). Физический смысл использования уравнений для двух длин волн заключается в компенсации разного цвета зерна. Например, одинаковую математическую модель можно использовать для оценки стекловидности как краснозерной, так и белозерной пшеницы.

Для измерения F_0 на разных приборах используются эталоны на основе двух нейтральных светофильтров. Все светофильтры изготовлены из одной пластины, поэтому имеют одинаковый коэффициент поглощения. Периодически эталон устанавливается в прибор, и программа оценки сохраняет значение F_0 для красного и зеленого каналов. Далее в ходе работы для пробы зерна строится система уравнений (10). В ходе решения вычисляются S_1 , S_2 , ..., S_M , характеризующие стекловидность зерен 1, 2, ..., M .

АПРОБАЦИЯ

Впервые такой подход был апробирован на базе ФГБГУ "Россельхозцентр". В составе организации находятся 14 филиалов, оснащенных диафаноскопами "Янтарь". Филиалы расположены на большом удалении друг от друга, поэтому идея согласования измерений стекловидности без транспортировки калибровочных образцов зерна актуальна. Диафаноскопы были оснащены идентичными эталонами и программным обеспечением, реализующим оценку стекловидности описанным способом. Далее были проведены межлабораторные сравнительные испытания (МСИ). В качестве критерия

Результаты МСИ

Номер участника	Z (стекловидность) для твердой пшеницы	Z (стекловидность) для мягкой пшеницы	Оценка результатов измерений
1	1.0	−0.5	Удовл.
2	−1.5	0.9	Удовл.
3	−0.8	0.7	Удовл.
4	−1.2	0.4	Удовл.
5	−1.3	1.0	Удовл.
6	1.2	1.1	Удовл.
7	0.4	0.8	Удовл.
8	0.9	−0.4	Удовл.
9	0.2	−1.3	Удовл.
10	0.4	−1.7	Удовл.
11	0.9	−0.1	Удовл.
12	−1.3	−0.9	Удовл.
13	0.4	0.1	Удовл.
14	0.8	1.5	Удовл.

для оценивания результатов МСИ был выбран z -индекс

$$z = (x_i - x_{pt}) / \sigma_{pt}, \quad (11)$$

где: x_i — результат измерений лаборатории, %; x_{pt} — приписанное значение, %; σ_{pt} — стандартное отклонение для оценки квалификации, рассчитанное в соответствии с ГОСТ Р 50779.60-2017 [9].

Качество результатов измерений показателей оценивалось в соответствии с ИСО/МЭК 17043:2010 [10] и ГОСТ Р 50779.60-2017 [9] путем сравнения значения z -индекса с установленным нормативом контроля:

1) при $|z| \leq 2.0$ — результаты измерений признают удовлетворительными и не требующими выполнения действий;

2) при $2.0 < |z| < 3.0$ — результаты измерений признают сомнительными и требующими выполнения предупреждающих действий (сигнал предупреждения);

3) при $|z| \geq 3.0$ — результат измерений признают неудовлетворительным (неприемлемым)

и требующим выполнения корректирующих действий (сигнал к действиям).

Таким образом, все участвующие лаборатории показали удовлетворительный результат как для твердой, так и для мягкой пшеницы.

ВЫВОДЫ

В ходе работы были получены следующие результаты.

1. Подобрана математическая модель, описывающая прохождение света в зерне.

2. Дано определение показателя стекловидности как характеристики рассеяния света в зерне и приведен способ определения коэффициента рассеяния.

3. Подобран спектральный состав излучения, наиболее подходящий для определения стекловидности.

4. На основе математического описания стекловидности был предложен и реализован способ согласования измерений стекловидности в разных

лабораториях с использованием оптического эталонного образца.

5. Проведена апробация способа согласования измерений, который показал удовлетворительный результат, позволяющий рекомендовать его к использованию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dowell F.E.* Differentiating vitreous and non-vitreous durum wheat kernels by using near-infrared spectroscopy // *Cereal Chemistry*. 2000. Vol. 77, no. 2: P. 155–158. DOI: 10.1094/CCHEM.2000.77.2.155
2. *Трошкин Д.Е., Горбунова Е.В., Чертов А.Н., Сычева Е.А., Алёхин А.А., Лоскутов И.Г., Зуев Е.В.* Определение стекловидности пшеницы методом технического зрения в ближнем ИК диапазоне длин волн // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2020. Т. 63, № 7. С. 666–672.
3. *Neethirajan S., Karunakaran C., Symons S., Jayas D.S.* Classification of vitreousness in durum wheat using soft X-rays and transmitted light images // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2006. Vol. 53. P. 71–78. DOI: 10.1016/j.compag.2006.03.001
4. *Зайцев В.Б., Зверев С.В.* Способ разделения зерна мукомольно-крупяных культур по показателю стекловидности. Патент RU 2708159 C1 B07C 5/342. Заявка 2018143686. Дата публикации 04.12.2019. Бюллетень № 34. 18 с.
5. *Антонов Р.Ю.* Возможности автоматической оценки стекловидности пшеницы методом анализа цифрового изображения // *Научное приборостроение*. 2020. Т. 30, № 3. С. 63–74.
URL: <http://iairas.ru/mag/2020/abst3.php#abst8>
6. ГОСТ 10987-76. Зерно. Методы определения стекловидности. М.: Изд-во стандартов, 1976. 5 с.
7. *Kubelka P., Munk F.* Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche // *Zs. Tech. Phys.* 1931. 12. P. 593–601.
8. *Исимару А.* Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах, т. 1. М.: Мир, 1981. 280 с.
9. ГОСТ Р 50779.60-2017 (ИСО 13528:2015) Статистические методы. Применение при проверке квалификации посредством межлабораторных испытаний.
10. ГОСТ ISO/IEC 17043-2013 Оценка соответствия. Общие требования к проверке квалификации лабораторий.

ООО "ЭКАН", Санкт-Петербург

Контакты: *Антонов Роман Юрьевич*,
roman.ekan@yandex.ru

Материал поступил в редакцию 03.03.2021

GRAIN DESCRIPTION BY A RANDOMLY INHOMOGENEOUS OPTICAL MEDIUM MODEL FOR THE INTERLABORATORY MATCHING OF VITREOUSNESS MEASUREMENTS

R. Yu. Antonov

Ekan Ltd, Saint Petersburg, Russia

Currently, due to the appearance of instrumental objective methods for determining grain vitreousness, it is possible to ensure the uniformity of measurements of this indicator in a number of laboratories. The article proposes a model for describing grain as an inhomogeneous optical medium and an interpretation of the vitreousness index as a characteristic of light scattering. A method for calculating the parameters of mathematical model and estimating the scattering coefficient using an RGB camera is presented. It is shown that the implementation of the grain vitreousness measurements based on the scattering coefficient makes possible to obtain a satisfactory reproducibility in between-lab measurements.

Keywords: measurement automation, measurement matching, vitreousness, math simulation, optical properties of grain

INTRODUCTION

Much attention is now paid to the automation of organoleptic measurements. In particular, studies on the possibilities of various methods for assessing the vitreousness of grain are published. The authors of the works obtain results showing the technical ability to determine the vitreousness degree by means of IR spectroscopy [1], technical vision [2], X-ray diffraction [3], spectroscopy in the visible region [4]. The Ekan company offers a method of optical-computer diagnostics on the basis of the Yantar diaphanoscope. The method has proven its worth in the cases of routine vitreousness analysis in laboratories [5]. So, the task of automating the analysis procedure can be considered solved at the moment. The next actual problem that arises when using an instrumental objective assessment of vitreousness is to ensure the uniformity of measurements in different laboratories.

THEORETICAL PART

To solve a practical problem, it is reasonable to give a definition of vitreousness in technical terms, since the existing definition is given for human visual perception [6]. When talking about vitreousness, they mean the ratio of the mealy and vitreous endosperm of the grain. It is the amount of mealy inclusions that largely determines the technological properties of grain. From the point of view of optics, the vitreous endosperm can be described as a homogeneous transparent medium with a constant refractive index. The endosperm of a mealy grain can be modeled with

a randomly shaped powder. So, in a vitreous grain, the weakening of the flux of incident light occurs only due to the absorption process, and in a mealy grain — due to scattering and absorption processes. Thus, the vitreousness of a grain is supposed to be estimated using the scattering characteristic (more scattering — less vitreousness, see Fig. "Scattering mealy particles in wheat grain").

To assess the scattering characteristics, it should be noted that in this case we are talking about the volume fraction of scattering particles from 0% (absolutely vitreous grain) to 100% (absolutely mealy grain); the applied lighting of the grain sample is diffuse. Under such conditions, it is reasonable to apply the Kubelka—Munk theory [7], [8] to numerically estimate the scattering coefficient. In this theory, the flux of transmitted light for a finite medium is described by the equation:

$$F(\tau) = C_1 e^{a\tau} + C_2 e^{-a\tau}, \quad (1)$$

where F is the light flux, τ is the optical length, C_1 , C_2 are the constant coefficients.

$$a = \sqrt{K(K + 2S)}, \quad (2)$$

where K is the absorption coefficient, S is the scattering coefficient.

Coefficients C_1 , C_2 are calculated experimentally once. When determining the vitreousness of a sample, it is actually necessary to calculate K and S . To assess the degree of vitreousness of each grain when analyzing at several wavelengths (λ_1 , λ_2 , ..., λ_N), one can write a system of equations

$$\begin{cases} F_1(\tau) = C_{11}e^{\tau\sqrt{K_1(K_1+2S)}} + C_{21}e^{-\tau\sqrt{K_1(K_1+2S)}}, \\ F_2(\tau) = C_{12}e^{\tau\sqrt{K_2(K_2+2S)}} + C_{22}e^{-\tau\sqrt{K_2(K_2+2S)}}, \\ \dots \\ F_N(\tau) = C_{1N}e^{\tau\sqrt{K_N(K_N+2S)}} + C_{2N}e^{-\tau\sqrt{K_N(K_N+2S)}}, \end{cases} \quad (3)$$

where $K_1, K_2, \dots, K_N$ are the absorption coefficients at the wavelengths $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$.

In this case, if the wavelengths of the incident light are close and much smaller than the size of the scattering particles, then it can be assumed that the scattering coefficient S is the same for all wavelengths. It is assumed that the vitreousness of the grain is proportional to S .

The second assumption is that all grains of one sample have the same absorption coefficient at N -th wavelength (the same "color").

Using the second assumption, one can write a general system of equations for the entire grain sample of M quantity of grains:

$$\begin{cases} F_{11}(\tau_1) = C_{11}e^{\tau_1\sqrt{K_1(K_1+2S_1)}} + C_{21}e^{-\tau_1\sqrt{K_1(K_1+2S_1)}}, \\ \dots \\ F_{1N}(\tau_1) = C_{1N}e^{\tau_1\sqrt{K_N(K_N+2S_1)}} + C_{2N}e^{-\tau_1\sqrt{K_N(K_N+2S_1)}}, \\ \dots \\ \dots \\ F_{M1}(\tau_M) = C_{11}e^{\tau_M\sqrt{K_1(K_1+2S_M)}} + C_{21}e^{-\tau_M\sqrt{K_1(K_1+2S_M)}}, \\ \dots \\ F_{MN}(\tau_M) = C_{1N}e^{\tau_M\sqrt{K_N(K_N+2S_M)}} + C_{2N}e^{-\tau_M\sqrt{K_N(K_N+2S_M)}}. \end{cases} \quad (4)$$

When solving the system of equations (4), the coefficients $S_1, S_2, \dots, S_M$, are calculated to characterize the vitreousness of grains 1, 2, ..., M .

In order to match measurements on several devices, it is necessary to measure the initial luminous flux $F(0) = F_0$ (different for each device). Direct measurement is not always possible because the value F_0 exceeds the luminous flux after passing through the grain by more than an order of magnitude. Therefore, for measurement F_0 , it is proposed to preliminarily attenuate the luminous flux using reference samples with zero scattering. Considering two such standards of different thicknesses t_1 and t_2 with the same absorption coefficient K and using the Beer—Lambert—Bouguer absorption law, one can write the system of equations

$$\begin{cases} F_{R1} = F_0 e^{-K t_1}, \\ F_{R2} = F_0 e^{-K t_2}. \end{cases} \quad (5)$$

Then

$$K = -\frac{\ln(F_{R2}/F_{R1})}{t_2 - t_1}, \quad (6)$$

$$F_0 = \frac{F_{R1}}{e^{-K t_1}} = \frac{F_{R2}}{e^{-K t_2}}, \quad (7)$$

where F_{R1} is the luminous flux after passing the first standard, F_{R2} is the luminous flux after passing the second standard, K is the absorption coefficient of the standards.

To take into account different initial luminous flux of devices, it is supposed to find a relationship between F_0 and the coefficients C_1, C_2 so that the values $S_1, S_2, \dots, S$ from system (4) calculated on different devices would be the same.

PRACTICAL IMPLEMENTATION

The practical implementation was carried out on the basis of the Yantar diaphanoscope, manufactured by the Ekan company. The principle of operation of the diaphanoscope is to transilluminate a grain sample with a uniform diffuse light beam in the visible region of the spectrum with the further acquisition of a digital image, its software processing and the issuance of the result of determining the vitreousness degree. The essence of preliminary software processing associated with segmentation and image brightness correction is described in [5].

As a measure of the luminous flux F that has passed through the grain, we will use its average corrected brightness [5]. As an estimate of the optical length τ , we will use the projection width of the grain image, since there is a relationship between the linear dimensions of the grain. An experiment was carried out to estimate the coefficients C_1, C_2 . 20 samples of grain with different vitreousness degrees, of different types and regions of growth were taken. For each sample, equation (4) was recorded and solved numerically. Analysis of the calculation results showed that the term $C_1 e^{\tau\sqrt{K(K+2S)}}$ makes an insignificant contribution into the estimated luminous flux F . Therefore, for practical use, it is sensible to simplify the model and consider $C_1 = 0$. Then

$$F(0) = C_2 = F_0, \quad (8)$$

$$F(\tau) = F_0 e^{-\tau\sqrt{K(K+2S)}}. \quad (9)$$

The calculation also showed that to estimate the scattering coefficient, it is advisable to use the brightness of the red and green channels of an RGB camera. The grain absorption coefficient for the blue color is significantly greater than the scattering coefficient, so

the inclusion of additional equations for the blue color does not improve the calculation result.

Thus, the system of equations (4) takes the form

$$\begin{cases} R_1(w_1) = R_0 e^{-w_1 \sqrt{K_R(K_R+2S_1)}}, \\ G_1(w_1) = G_0 e^{-w_1 \sqrt{K_G(K_G+2S_1)}}, \\ \dots \\ R_M(w_M) = R_0 e^{-w_M \sqrt{K_R(K_R+2S_M)}}, \\ G_M(w_M) = G_0 e^{-w_M \sqrt{K_G(K_G+2S_M)}}, \end{cases} \quad (10)$$

where R_i , G_i , $i = 1, 2, \dots, M$ is the estimated luminous flux that has passed through the i -th grain, for the red and green channels, respectively; w_i , $i = 1, 2, \dots, M$ — projection width of the i -th grain; R_0 , G_0 — estimated initial luminous flux for red and green channels, respectively.

Estimation of the grain scattering coefficients on a specific device is reduced to measuring the initial light fluxes R_0 , G_0 and numerically solving the system of equations (10). The physical meaning of using equations for two wavelengths is to compensate for different grain colors. For example, the same mathematical model can be used to assess the vitreousness of both red and white wheat.

To measure F_0 on different instruments, standards based on two neutral light filters are used. All light filters are made of one plate and therefore have the same absorption coefficient. Periodically, the reference is installed in the instrument, and the evaluation software program stores the F_0 value for the red and green channels. Further, in the course of work, a system of equations (10) is constructed for a grain sample. When solving the above equations, S_1 , S_2 , ..., S_M , characterizing the vitreousness of grains, are being calculated.

APPROBATION

For the first time, this approach was tested on the basis of the Federal State Budgetary Institution Ros-

selkhoztsentr. The organization includes 14 branches equipped with Yantar diaphanoscopes. Branches are located at a great distance from each other, so the idea of coordinating vitreousness measurements without transporting calibration grain samples is relevant. The diaphanoscopes were equipped with identical standards and software, realizing the assessment of vitreousness in the described way. Further, interlaboratory comparison tests were carried out (see Tab.). The z -index was chosen as a criterion for evaluating the results of these tests.

$$z = (x_i - x_{pt}) / \sigma_{pt}, \quad (11)$$

where: x_i is the result of laboratory measurements, %; x_{pt} — assigned value, %; σ_{pt} is the standard deviation for qualification assessment, calculated in accordance with GOST/State Standard R 50779.60-2017 [9].

The quality of the results of measurements of indicators was assessed in accordance with ISO/IEC 17043: 2010 [10] and GOST/State Standard R 50779.60-2017 [9] by comparing the z -index value with the established control standard:

- 1) for $|z| \leq 2.0$ — the measurement results are considered satisfactory and do not require action;
- 2) for $2.0 < |z| < 3.0$ — the measurement results are considered doubtful and require preventive action (warning signal);
- 3) for $|z| \geq 3.0$ — the measurement result is considered unsatisfactory (unacceptable) and requiring corrective action (signal to action).

Thus, all participating laboratories showed satisfactory results for both durum and soft wheat.

CONCLUSIONS

Thus, in the course of the work, the following results were obtained:

1. A mathematical model has been selected that describes the passage of light through grain.
2. A definition of the vitreous index as a characteristic of light scattering in grain as well as a method for determining the scattering coefficient are given.

Results of between-lab tests

Number of lab	Z (vitreousness) for durum wheat	Z (vitreousness) for soft wheat	Evaluation of measurement results
1	1.0	-0.5	satisfactorily
⋮			
14	0.8	1.5	satisfactorily

3. The spectral composition of the light emission, that is the most suitable for determining the vitreousness, is selected.

4. On the basis of the mathematical description of vitreousness, a method was proposed and implemented for matching vitreous measurements in various laboratories using an optical reference sample.

5. The approbation of the measurement matching method was carried out, which showed a satisfactory result to be recommended for use.

REFERENCES

1. Dowel F.E. Differentiating vitreous and non-vitreous durum wheat kernels by using near-infrared spectroscopy. *Cereal Chem.*, 2000, vol. 77, no. 2, pp. 155–158. DOI: 10.1094/CCHEM.2000.77.2.155
2. Troshkin D.E., Gorbunova E.V., Chertov A.N., et al. [Determination of wheat vitreosity with machine vision in the near ir wavelength range]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2020, vol. 63, no. 7, pp. 666–672. (In Russ.).
3. Neethirajan S., Karunakaran C., Symons S., Jayas D.S. Classification of vitreousness in durum wheat using soft X-rays and transmitted light images. *Computers and electronics in agriculture*, 2006, vol. 53, is. 1, pp. 71–78. DOI: 10.1016/j.compag.2006.03.001
4. Zajcev V.B., Zverev S.V. *Sposob razdeleniya zerna mukomol'no-krupnykh kul'tur po pokazatelju steklovidnosti*. Patent RF no. 2708159 C1 B07C 5/342. [Patent for Processing Grain Separation Method by Glassy Index]. Prioritet 04.12.2019. (In Russ.).
5. Antonov R.Yu. [Possibilities of automatic wheat vitreousness determination by digital image analysis]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2020, vol. 30, no. 3, pp. 63–74. DOI: 10.18358/np-30-3-i6374. (In Russ.).
6. *GOST 10987-76. Zerno. Metody opredeleniya steklovidnosti* [Grain. Methods for determination of vitreousness]. Moscow, Standards Publ., 1976. 5 p. (In Russ.).
7. Kubelka P., Munk F. Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche. *Zs. Tech. Phys.*, 1931, vol. 12, pp. 593–601.
8. Isimaru A. *Rasprostranenie i rassejanie voln v sluchajno-neodnorodnykh sredah, tom. 1* [Wave propagation and scattering in randomly heterogeneous environments, vol. 1]. Moscow, Mir Publ., 1981. 280 p. (In Russ.).
9. *GOST R 50779.60-2017 (ISO 13528:2015) Statisticheskie metody. Primenenie pri proverke kvalifikazii posredstvom mezhlaboratornykh ispytaniy* [Statistical methods. Application in qualification testing by interlaboratory tests]. (In Russ.).
10. *GOST ISO/IEC 17043-2013 Ozenka sootvetstviya. Obshchie trebovaniya k proverke kvalifikazii laboratoriy* [General requirements for laboratory qualification verification]. (In Russ.).

Contacts: Antonov Roman Yurievitch,
roman.ekan@yandex.ru

Article received by the editorial office on 03.03.2021