

ИДЕНТИФИКАЦИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЗЕРНА ГРЕЧИХИ МЕТОДАМИ МИКРОФОКУСНОЙ РЕНТГЕНОГРАФИИ И ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

© 2024 г. Ю.Т. Платов^{1,*}, С.Л. Белецкий^{2,**}, Д.А. Метленкин^{1,***},
Р.А. Платова^{1,****}, А.Л. Верещагин^{3,*****}, В.А. Марьин^{3,*****}

¹ФГБОУ ВО «Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова»,
Россия 115054 Москва, Стремянный пер., 36

²Всероссийский научно-исследовательский институт
кондитерской промышленности — филиал ФГБНУ

«Федеральный научный центр пищевых систем имени В.М. Горбатова» РАН,
Россия 107023 Москва, ул. Электрозаводская, 20/3

³Бийский технологический институт АлтГТУ им. И.И. Ползунова,
Россия 659305 Бийск, ул. им. Героя Советского Союза Трофимова, 27

E-mail: *Platov.YT@rea.ru; **grain-miller@yandex.ru; ***dametl@mail.ru;

****Platova.RA@rea.ru; *****val@bti.secna.ru; *****tehbiysk@mail.ru

Поступила в редакцию 20.02.2024; после доработки 01.04.2024

Принята к публикации 02.04.2024

Классификация зерна гречихи имеет большое значение, поскольку отсутствие дефектных зерен является гарантией урожайности и качества. Зерна гречихи были отобраны случайным образом из партии зерна, которые различались по качеству. Идентификация и классификация зерна гречихи по степени выполненности проведена сочетанием анализа микрофокусного рентгеновского и гиперспектрального изображений и методов многомерного анализа. С помощью микрофокусной рентгенографии зерна гречихи были разделены на группы по степени выполненности. Гиперспектральное изображение зерен гречихи в диапазоне 935—1720 нм получено с помощью камеры Specim FX17. С помощью функции отбора полигонов были получены усредненные спектры и сформирована матрица данных образцов зерна. Методом главных компонент выделены полосы спектра, вносящие наибольший вклад в градацию образцов зерна по степени выполненности. Классификационная модель градации зерна гречихи на группы по степени выполненности построена методом дискриминантного анализа при помощи проекции на латентные структуры. Результаты исследования показали, что гиперспектральное изображение является потенциальным инструментом для быстрой и точной идентификации зерен гречихи, который может быть использован при крупномасштабной классификации зерен и определении качества зерен.

Ключевые слова: зерно гречихи, дефекты зерна, микрофокусная рентгенография, гиперспектральное изображение, методы многомерного анализа.

IDENTIFICATION AND CLASSIFICATION OF BUCKWHEAT GRAIN BY MICROFOCUS RADIOGRAPHY AND HYPERSPECTRAL IMAGING METHODS

© 2024 Yu.T. Platov^{1,*}, S.L. Beletskiy^{2,**}, D.A. Metlenkin^{1,***},
R.A. Platova^{1,****}, A.L. Vereshchagin^{3,*****}, V.A. Marin^{3,*****}

¹Plekhanov Russian University of Economics, Russia 115054 Moscow, Stremyanny Lane, 36

²Enterprise, Russia 107023 Moscow, Elektrozavodskaya St., 20/3

³Technological Institute is a Subsidiary of Polzunov Altai State Technical University,
Russia 659305 Biysk, Hero of the Soviet Union Trofimov Street, 27

E-mail: *Platov.YT@rea.ru; **grain-miller@yandex.ru; ***dametl@mail.ru;

****Platova.RA@rea.ru; *****val@bti.secna.ru; *****tehbiysk@mail.ru

Classification of buckwheat grains is important because the absence of defective grains is a guarantee of yield and quality. Buckwheat grains were randomly selected from a batch whose grains varied in quality. The identification and classification of buckwheat grains according to the degree of fulfillment was carried out by a combination of microfocus X-ray and hyperspectral image analysis and multivariate analysis techniques. Using microfocus radiography, buckwheat grains were categorized into groups according to the degree of fulfillment. Hyperspectral image of buckwheat grains in the range of 935-1720 nm was acquired using a Specim FX17 camera. Using the polygon selection function, the averaged spectra were obtained and a data matrix of grain samples was generated. The bands of the spectrum contributing most to the grading of the grain samples by degree of fulfillment were identified using the principal component analysis. The classification model of grading buckwheat grain into groups by degree of fulfillment was constructed by partial least squares discriminant analysis method. The results

showed that hyperspectral image is a potential tool for rapid and accurate identification of buckwheat grains, which can be used in large-scale grain classification and grain quality determination.

Keywords: buckwheat grain, grain defects, microfocus radiography, hyperspectral image, multivariate analysis methods.

DOI: 10.31857/S0130308224040057

ВВЕДЕНИЕ

Зерновые обеспечивают человека необходимыми питательными веществами, а контроль их качества уделяют большое внимание. Пшеница является основным продуктом питания и играет важную роль для здоровья человека. В то же время во многих отраслях гречневая крупа считается альтернативным пищевым продуктом с уникальным набором белков и аминокислотным составом [1]. Состав зерновых культур определяет область их использования в пищевой промышленности. Отклонение ниже рекомендуемых пороговых значений показателей свойств ограничивает область их применения. Другим аспектом, который определяет потенциал использования семян, являются внутренние или внешние дефекты, такие как щуплость, отслоение оболочки, трещиноватость и невыполненность (ГОСТ Р 59603—2021).

В последнее время усилия сосредоточены на использовании именно неразрушающих методов контроля качества пищевой продукции, включая зерна гречихи [2]. Разработка системы отслеживания является важным этапом в цепочке поставок зерновых культур. Управление цепочками поставок позволяет распределить продукт с надлежащей информацией об отслеживании и доставить продукт потребителю [3]. Но для реализации этой разработки требуются инструменты идентификации для отслеживания продукции, включая сбор физикохимических свойств [4].

Неразрушающие методы позволяют измерять и анализировать партии зерна при их хранении, сокращать отходы и проводить повторные измерения одних и тех же зерен с течением времени [5]. Кроме того, классические методы трудоемки, отнимают много времени, требуют специализированной подготовки образцов, включающей использование химических веществ, которые могут вызвать загрязнение окружающей среды, и неприменимы для сортировки в режиме реального времени.

Существует множество неразрушающих методов, которые используются для сортировки зерна. К ним относят рентгеновскую томографию [6] и микрофокусную рентгенографию [7], системы машинного зрения [8], включая спектроскопические системы измерения в ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра (UV-VIS-NIR), мульти- и гиперспектральные системы визуализации. UV-VIS-NIR-спектроскопия является широко используемым инструментом для точной классификации дефектности зерен. Этот метод является быстрым, точным и чувствительным как для зерна гречихи [9], так и для других семян [10]. Гиперспектральное изображение (HSI) в ближнем инфракрасном диапазоне (NIR) может использоваться для контроля зерновых культур, включая зерно гречихи [11, 12].

Метод микрофокусной рентгенографии, по сравнению с используемой контактной рентгенографией, позволяет получить рентгеновские снимки семян и визуализировать мелкие детали структуры семян, которые незначительно отличаются по плотности [13].

Когда для анализа используются технологии анализа изображения, то это, как правило, сопровождается применением методов машинного или глубокого обучения [14]. Эти алгоритмы используются для извлечения признаков изображения и построения цифровых моделей для классификации по сортам или обнаружения дефектных зерен. Однако эти методы требуют мощных вычислительных возможностей, обладают высокими требованиями к программному обеспечению и последующей автоматизации.

Целью исследования является идентификация и классификация зерна гречихи по степени выполненности сочетанием анализа микрофокусного рентгеновского и гиперспектрального изображений и методов многомерного анализа.

МЕТОДИКА

В качестве объекта исследования служили образцы партии зерна гречихи (производство ООО «Бийский элеватор», Алтайский край). Партия зерна не была подвергнута обрушению и гидротермальной обработке. Гречиха посевная (*Fagopyrum Esculentum* Muench) имеет особый тип роста и созревания, все фазы проходят одновременно, накладываются одна на другую и продолжаются до уборки [15]. Поэтому при сборе урожая в одной партии находятся зерна гречихи, различающиеся как по крупности ядра и не характеризуются однородным гранулометрическим составом [16], так

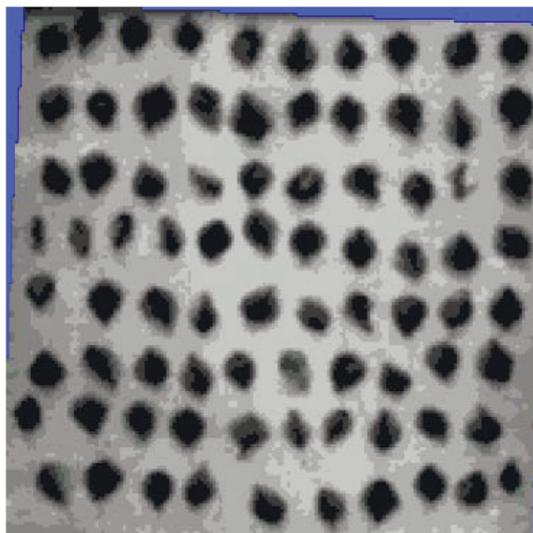


Рис. 1. Изображение образцов зерна гречихи в оттенках серого, полученное с помощью гиперспектральной камеры Specim FX17.

и по зрелости: зерна могут находиться в зрелом, недозревшем и в молочном состоянии [15]. Как следствие, специфика роста и созревания зерна приводит к различию согласно ГОСТ Р 59603—2021 по соотношению нормальных, недовыполненных (несформированных) и невыполненных зерен гречихи из одной партии. Для исследования зерен по признаку «невыполненность» из партии были отобраны 81 зерно гречихи. Зерна были приклеены на прямоугольную картонную рамку с липким верхним слоем (рис. 1).

Скрытую дефектность зерен гречихи определяли по цифровым рентгеновским изображениям особенностей внутреннего строения и степени развития основных структур зерна (ГОСТ Р 59603—2021).

Для микрофокусной рентгенографической съемки зерна гречихи использована передвижная рентгенографическая установка ПРДУ-02 производства ЗАО «Элтех-мед» (Санкт-Петербург) в комплектации с рентгеносканером DIGORA (Soredex, Finland).

В состав установки ПРДУ-02 входят: рентгенозащитная камера для проведения рентгенографических работ; источник рентгеновского излучения моноблочного типа РАП-70М; приемник рентгеновского изображения на основе экрана с фотостимулирующим люминофором (ФСЛ-экран); персональный компьютер с программным обеспечением.

Гиперспектральное изображение образцов зерна гречихи было получено в спектральном диапазоне 935—1720 нм с разрешением 3,5 нм с помощью гиперспектральной камеры Specim FX17 (SPECIM, Finland).

Просмотр полученного гиперспектрального изображения проводили с помощью программного комплекса Альбеда 4.0.23. С помощью функции отбора полигонов были получены усредненные спектры образцов зерна, которые были преобразованы в матрицу X размером 81×224 (81 — количество усредненных спектров образцов, 224 — отсчеты на длинах волн). Анализ матрицы X данных проводили методом главных компонент (РСА) в программном пакете Unscrambler (ver. 10.0.4, Camo Software, Норвегия). Матрица X была также использована для построения модели классификации методом дискриминантного анализа при помощи проекции на латентные структуры (PLS-DA) с применением графического пользовательского интерфейса для программного комплекса MATLAB 2018b [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Идентификация рентгенографических признаков и классификация зерен гречихи по степени выполненности. Идентификация и классификация рентгенографических признаков «невыполненности» зерна проведена на основании анализа рентгеновского изображения 81 зерна гречихи. Невыполненность и ее степень [18] выбраны для определения продуктивности зерна.

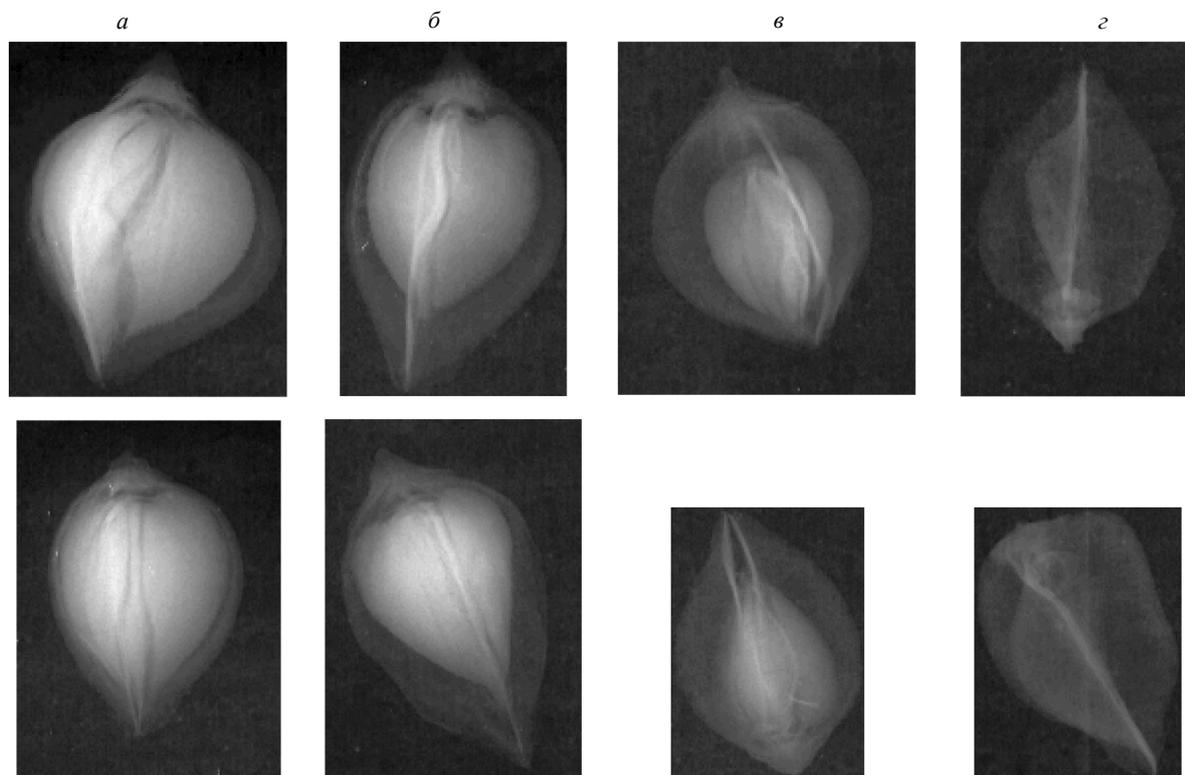


Рис. 2. Рентгеновские изображения зерна гречихи различных групп по степени выполненности: выполненное — 1 группа (а); недовыполненное — 2 группа (б); невыполненное — 3 группа (в); пустое — 4 группа (z).

Анализ цифрового изображения зерна проведен на основе рентгенографических признаков: нерегулярность распределения оптической плотности по площади рентгеновской проекции, обусловленная развитием эндосперма, его отсутствием или неполным развитием. Различные части зерна гречихи: плодовая оболочка, семенная кожура, эндосперм, а также неповрежденные и поврежденные участки, ослабляют рентгеновское излучение в разной степени [19]. На рис. 2 представлены рентгеновские изображения зерна гречихи выполненного и с аномалиями развития.

Выполненные зерна — полностью сформированное без дефектов: эндосперм, область зародыша и оболочки равномерно светлые, без нерегулярных затемнений (рис. 2а). Недовыполненные зерна — в основном жизнеспособные и в отличие от выполненных зерен часть их проекции на рентгенограммах занята темным полем (рис. 2б). Признак «невыполненность» зерна гречихи на цифровом рентгеновском изображении выглядит как полное или частичное потемнение проекции в сравнении с изображением нормальных зерен, что указывает на более низкую плотность или толщину тканей зерна. В случае частичного потемнения видны очертания недоразвившегося зародыша (рис. 2в), а при сплошном потемнении — зерно пустое (рис. 2z), оно имеет незаполненную плодную оболочку, а проекция зерна полностью темная.

По результатам анализа рентгеновского изображения выявлено, что общее количество образцов гречихи разделены на группы по соотношению участков «светлый — темный» рентгеновской проекции зерен следующим образом: 1 группа — выполненное зерно (ядро занимает 80—100 % зерна); 2 группа — недовыполненное зерно (ядро занимает 50—80 % зерна); 3 группа — невыполненное зерно (ядро занимает 30—40 % зерна/рудимент); 4 группа — пустые зерна (отсутствие ядра) [18, 19]. Разделение образцов зерна гречихи на группы проведено следующим образом: в 1 группу было включено 37, во 2 — 32, в 3 группу — 9, в 4 группу — 3 образца. Зерна гречихи из 1 и 2 групп могут быть использованы для дальнейшей переработки и употребления в пищевых целях (доброкачественные), а зерна из 3 и 4 групп являются недоброкачественными.

Таким образом, неразрушающий метод микрофокусной рентгенографии позволяет выявить скрытые (латентные) структурные дефекты зерна гречихи. По результатам анализа рентгеновских изображений образцов зерна гречихи проведена их градация по степени выполненности на четыре группы.

Обработка гиперспектрального изображения. Гиперспектральное изображение зерна гречихи (см. рис. 1) обрабатывали в программном комплексе Альбеда 4.0.23. С помощью встроенной функции отбора полигонов на изображении были отобраны усредненные спектры каждого образца зерна ($n = 81$) в диапазоне 935—1720 нм.

Усредненные спектры образцов зерна гречихи были подвергнуты следующей предварительной обработке: преобразование спектров отражения в спектры поглощения ($A = \lg(1/R)$), нормализация (maximum normalization — альтернатива классической нормализации, при которой каждый ряд делится не на среднее, а на его максимальное абсолютное значение). Проведено сравнение спектров образцов зерна гречихи из каждой группы по степени выполненности (рис. 3).

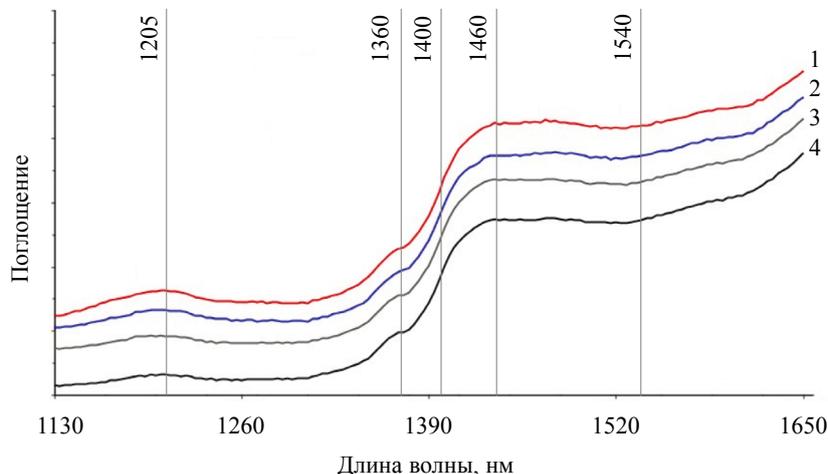


Рис. 3. Профиль усредненных спектров поглощения в диапазоне 1130—1650 нм полигонов образцов зерна гречихи из групп 1—4.

Спектр зерна гречихи состоит из широких полос поглощения, соответствующих главным образом обертонам и комбинациям колебательных мод функциональных групп компонентов состава зерна гречихи (табл. 1). А интенсивность этих полос взаимосвязана с характеристиками количественного состава компонентов зерна гречихи. Средний состав зерна гречихи (масс. %) следующий: крахмал — 52,9 %; вода — 14,0 %; белки — 10,6 %; клетчатка — 10,7 %; жиры — 3,2 %; углеводы (моно- и дисахариды) — 1,5 %; зольность — 2,0 % [20].

Как видно из рис. 3, основное поглощение находится в области 1130—1650 нм, в которой проявляются колебания функциональных групп следующих компонентов состава: крахмала, белков, липидов и влаги (см. табл. 1). В зависимости от степени выполненности зерна, от 1 до 4 группы снижаются значения поглощения в этом диапазоне спектра, что соответствует уменьшению содержания основных компонентов состава в ядре зерна [21—24].

Таблица 1

Назначение полос NIR-спектра функциональным группам компонентов состава зерна гречихи

Полоса, нм	Функциональная группа	Компонент	Источник
977	O—H	Влага	[21]
1205	C=O	Липиды, белки	[21—23]
1360	C=O	Липиды, белки	[22]
1400	Первый обертоны валентных колебаний O—H	Крахмал, влага	[22, 24]
1460	Первый обертоны валентных колебаний O—H и N—H	Крахмал, влага, белок	[24]
1540	Первый обертоны валентных колебаний O—H и C—H	Крахмал	[22, 24]

Данные, полученные методами микрофокусной рентгенографии и гиперспектрального изображения, показывают хорошую сходимость и взаимозаменяемость. Следовательно, для градации

зерна гречихи и определения степени выполненности можно использовать гиперспектральное изображение.

Классификация зерна гречихи по NIR спектрам гиперспектрального изображения. Методом главных компонент проведена декомпозиция X-матрицы усредненных NIR-спектров (после их предварительной обработки) зерна гречихи ($n = 81$) на T-матрицу счетов — координата образцов по главным компонентам (ГК) и P-матрицу факторных нагрузок длин волн NIR спектра поглощения по ГК. Три ГК объясняют 100 % от общей объяснимой дисперсии (95,0, 3,0 и 2,0 % соответственно).

По знаку (+/–) и максимальным значениям факторных нагрузок длин волн спектра, которые информируют о корреляции с ГК, определен их вклад в разделении множества образцов на группы. Спектр поглощения по 1 ГК согласно знаку (+/–) и значениям факторных нагрузок длин волн разделен на три диапазона: знак (+) имеют факторные нагрузки длин волн в диапазоне 935—1130 нм и 1673—1720 нм без явных максимумов; знак (–) — факторные нагрузки длин волн в широком диапазоне 1130—1673 нм.

Вторая ГК разделяет спектр поглощения на аналогичные диапазоны, но с обратным значением знака (+/–) факторных нагрузок длин волн спектра относительно соответствующих факторных нагрузок по 1 ГК. Факторные нагрузки длин волн спектра со знаком (+) имеют два неявных максимума при 1205 и 1365.

По 3 ГК максимумы факторных нагрузок длин волн спектра со знаком (+) в широком диапазоне 935—1673 нм выявлены при 977, 1205, 1360, 1400, 1460 и 1540 нм (см. табл. 1). Эти максимумы длин волн спектра соответствуют функциональным группам основных компонентов состава ядра гречихи.

Образцы зерна гречихи наиболее наглядно разделяются на четыре группы в координатах 1 и 3 ГК следующим образом (рис. 4а):

- образцы из 1 группы («выполненное» зерно) располагаются преимущественно в области координат со знаком (–) по 1 ГК и со знаком (+) по 3 ГК, что соответствует максимуму факторных нагрузок длин волн спектра в диапазоне 1130—1673 нм, соответствующим функциональным группам компонентов состава ядра гречихи (см. рис. 4б, табл. 1);

- образцы из 3 и 4 групп («невыполненное» и пустое зерно) расположены в области координат со знаком (+) по 1 ГК, что соответствует минимальному поглощению в диапазоне 1130—1673 нм спектра (рис. 4б). При этом наблюдается слабое различие по области расположения в этих координатах между образцами из 3 и 4 групп;

- образцы из 2 группы («недовыполненное» зерно) занимают промежуточную область между образцами из 1, 3 и 4 групп.

Следовательно, методом главных компонент спектр разделен на три диапазона: 935 —1130, 1130—1673, 1673—1720 нм (см. рис. 4б). Образцы зерна гречихи разделяются по знаку (+/–) на

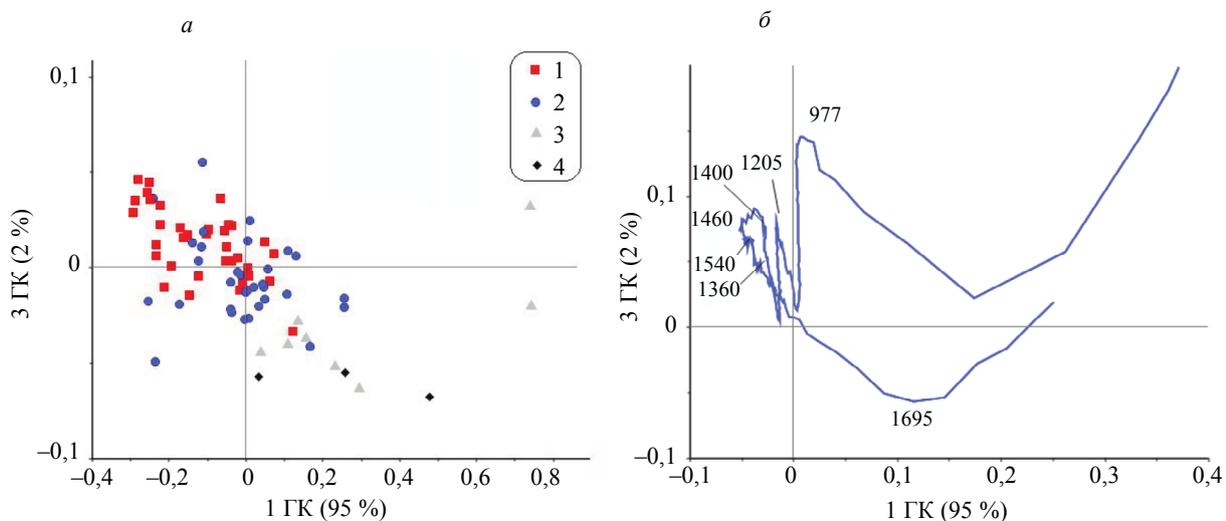


Рис. 4. Расположение точек, соответствующих образцам зерна гречихи из 1—4 групп, в координатах 1 и 3 ГК (а); факторные нагрузки длин волн спектра в координатах 1 и 3 ГК (б), где отмечены максимумы факторных нагрузок длин волн спектра.

группы по степени выполненности, выявленные по данным микрофокусной рентгенографии. При этом наблюдается слабое различие между образцами из 3 и 4 групп зерен гречихи (см. рис. 4а). Идентификация эффективной области, соответствующей диапазону 1130—1673 нм, из всего спектра имеет наиболее важное значение поскольку это позволяет, во-первых, визуализировать различия между группами зерен гречихи по степени выполненности, во-вторых, при дальнейшем исследовании за счет снижения числа каналов снижается стоимость оборудования и вычислительной нагрузки программного обеспечения.

Построение модели классификации зерна гречихи по степени выполненности методом PLS-DA. Матрица X усредненных спектров в диапазоне 935—1720 нм была использована для разработки модели классификации методом PLS-DA. При классификации методом PLS-DA существуют два подхода: мягкий (soft) и жесткий (hard) [17, 25]. В нашем исследовании применен мягкий подход метода PLS-DA. Используя этот подход, образец можно отнести к нескольким классам в отличие от жесткого подхода.

При сортировке зерна могут быть поставлены различные задачи, например, разделить доброкачественное зерно от недоброкачественного, выполненное от невыполненного или просто отделить пустые зерна из выборки. В связи с этим поставлена цель построения различных моделей классификации зерна от их выполненности.

В матрице данных каждому образцу был назначен класс, соответствующий степени выполненности зерна. В результате построено 3 классификационных модели, различающиеся по количеству групп и их сочетанию, входящих в один из классов.

В первой классификационной модели (далее Модель 1) каждому образцу был присвоен класс, соответствующий номеру одной из четырех групп по данным рентгеновского изображения (см. рис. 2). При построении Модели 2 образцы из 3 и 4 групп (невыполненные и пустые зерна) были объединены в один класс и в результате для анализа было использовано 3 класса; в Модели 3 — образцы из групп 1 и 2 (выполненные и невыполненные зерна) объединены в первый класс (доброкачественное зерно) и образцы из групп 3 и 4 объединены во второй класс (недоброкачественное зерно). Это связано с тем, что при разделении партии зерна гречихи ключевым является отделение недоброкачественных зерен от доброкачественных, а пересечение групп 1—2 является допустимым, так как образцы из этих групп являются доброкачественным зерном.

Стоит отметить [25], что в PLS-DA общее количество факторов (латентных переменных) подчиняется следующему нестрогому соотношению: 2-3 фактора для каждого класса + 1-2 фактора для описания внешних связей между классами. Поэтому количество используемых факторов варьировали от 8 до 14 в зависимости от количества заданных классов (см. табл. 2).

Таблица 2

Показатели качества PLS-DA-моделей классификации зерна гречихи на классы по степени выполненности

Модель	Количество факторов	Общая специфичность, %	Общая чувствительность, %	Общая эффективность, %
1	10	84	95	89
1	12	96	89	93
1	14	91	96	94
2	14	99	94	96
2	13	96	93	94
2	12	93	95	94
3	8	100	94	97
3	10	100	95	97
3	12	100	95	97

При оценке качества модели PLS-DA используются следующие показатели качества [25]:

чувствительность класса — процент образцов класса, правильно распознанных как членов этого класса;

специфичность класса — процент образцов из других классов, которые правильно отнесены как несовместимые с целевым классом.

Показатели чувствительности и специфичности рассчитываются для каждого класса отдельно, а для оценки производительности модели определяются показатели общей чувствительности и специфичности. *Общая эффективность* классификации представляет собой среднее геометрическое от произведения общей чувствительности и специфичности [25].

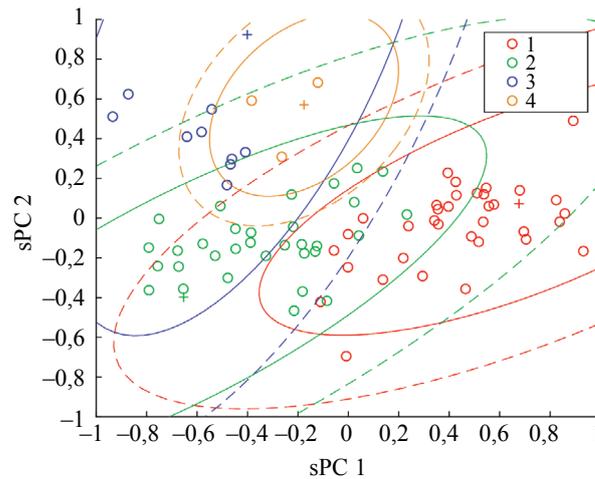


Рис. 5. Расположение точек, соответствующих спектрам образцов 1—4 групп зерна гречихи, в координатах двух плоскостей «суперсчетов» Модели 1, полученной методом PLS-DA.

Расположение координат объектов — образцов зерна гречихи разных классов — в пространстве двух плоскостей «суперсчетов» Модели 1, полученной методом PLS-DA представлено на рис. 5. Область приемлемости для каждого класса представляется в виде эллипсоидов, изображенных вокруг соответствующих центров классов. Визуально заметно разделение образцов на классы в многомерном пространстве двух плоскостей «суперсчетов» Модели 1, полученной методом PLS-DA.

В данном исследовании общая специфичность является более важным показателем при оценке качества моделей классификации. Это объясняется тем, что для эффективной сортировки зерна гречихи важно отделять недоброкачественное зерно от доброкачественного. Поэтому при построении Модели 1 необходимо получение высоких значений специфичности для классов 3 и 4. При таком подходе недопустимым является пересечение 1 и 2 класса против 3 и 4 класса. В результате анализа матрицы данных построена Модель 1 с использованием 12 факторов, которая обладает общей эффективностью 93 %, общая специфичность — 96 %. Важным моментом является то, что специфичность для классов 3 и 4 составила 98 %. Такой результат приемлем для дальнейшего практического применения модели.

ВЫВОДЫ

Показан потенциал сочетания анализа микрофокусного рентгеновского и гиперспектрального изображений и методов многомерного анализа для идентификации и классификации зерна гречихи по степени выполненности.

С помощью микрофокусной рентгенографии зерна гречихи были разделены на группы по степени выполненности. Гиперспектральное изображение зерен гречихи в диапазоне 935—1720 нм получено с помощью камеры Specim FX17, из которого с помощью функции отбора полигонов были получены усредненные спектры и сформирована матрица данных образцов зерна.

Методом главных компонент выделены полосы спектра при 977, 1205, 1360, 1400, 1460 и 1540 нм, вносящие наибольший вклад в градацию образцов зерна по степени выполненности. Методом PLS-DA с использованием матрицы усредненных спектров построена классификационная модель градации зерна гречихи на группы по степени выполненности.

Показано, что HSI является потенциальным инструментом для быстрой и точной идентификации зерен гречихи, который может быть использован при крупномасштабной классификации зерен и определении качества зерен.

Авторы выражают благодарность коллективу ООО «Компания «АЗИМУТ ФОТОНИКС» за возможность проводить измерения на камере SPECIM FX17.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексенко С.С., Казимирова К.О., Штыков С.Н.* Сравнительная оценка содержания свободных фенольных соединений и антиоксидантной активности различных образцов гречихи // Журнал аналитической химии. 2022. Т. 77. № 8. С. 704—713. DOI: 10.31857/S0044450222080023
2. *Wang F.H., Yang J., Zhu H.L.* Research on determination method of starch, protein and total flavonoids content in buckwheat by Near-infrared spectroscopy // Sensor Letters. 2014. V. 12. No. 3—4. P. 888—891.
3. *Wei Z., Alam T., Al Sulaie S., Bouye M., Deebani W., Song M.* An efficient IoT-based perspective view of food traceability supply chain using optimized classifier algorithm // Information Processing & Management. 2023. V. 60. No. 3. P. 103275.
4. *Dyck G., Hawley E., Hildebrand K., Paliwal J.* Digital Twins: A novel traceability concept for post-harvest handling // Smart Agricultural Technology. 2023. V. 3. P. 100079.
5. *Sun Y., Ye Z., Zhong M., Wei K., Shen F., Li G., Yuan J., Xing C.* Rapid and nondestructive method for identification of molds growth time in wheat grains based on hyperspectral imaging technology and chemometrics // Infrared Physics & Technology. 2023. V. 128. P. 104532.
6. *Besançon L., Rondet É., Grabulos J., Lullien-Pellerin V., Lhomond L., Cuq B.* Study of the microstructure of durum wheat endosperm using X-ray micro-computed tomography // Journal of Cereal Science. 2020. V. 96. P. 103115.
7. *Щукина П.А., Архипов М.В., Гусакова Л.П., Прияткин Н.С.* Методика подготовки цифровых рентгеновских изображений семян к визуальному дешифрированию // Агрофизика. 2020. № 3. С. 36—44.
8. *Zhang J., Qu M., Gong Z., Cheng F.* Online double-sided identification and eliminating system of unclosed-glumes rice seed based on machine vision // Measurement. 2022. V. 187. P. 110252.
9. *Platov Y.T., Metlenkin D.A., Platova R.A., Rassulov V.A., Vereshchagin A.L., Marin V.A.* Buckwheat identification by combined uv-vis-nir spectroscopy and multivariate analysis // Journal of Applied Spectroscopy. 2021. V. 88. P. 723—730.
10. *Li X., Feng X., Fang H., Yang N., Yang G., Yu Z., Shen J., Geng W., He Y.* Classification of multi-year and multi-variety pumpkin seeds using hyperspectral imaging technology and three-dimensional convolutional neural network // Plant Methods. 2023. V. 19. No. 1. P. 1—18.
11. *An D., Zhang L., Liu Z., Liu J., Wei Y.* Advances in infrared spectroscopy and hyperspectral imaging combined with artificial intelligence for the detection of cereals quality // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2022. V. 63. No. 29. P. 1—31.
12. *Caporaso N., Whitworth M.B., Fisk I.D.* Near-Infrared spectroscopy and hyperspectral imaging for non-destructive quality assessment of cereal grains // Applied spectroscopy reviews. 2018. V. 53. No. 8. P. 667—687.
13. *Мусаев Ф.Б., Белецкий С.Л.* История и перспективы применения рентгенографии в семеноводстве и семеноведении // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24. № 6. С. 6—15.
14. *Jin B., Qi H., Jia L., Tang Q., Gao L., Li Z., Zhao G.* Determination of viability and vigor of naturally-aged rice seeds using hyperspectral imaging with machine learning // Infrared Physics and Technology. 2022. V. 122. P. 104097.
15. *Важов В.М.* Гречиха на полях Алтая: монография. М.: Изд-во «Дом Академии естествознания», 2013. 188 с.
16. *Марьин В.А., Верещагин А.Л.* Распределение размера ядра во фракциях зерна гречихи // Хранение и переработка сельхозсырья. 2019. № 1. С. 130—138.
17. *Zontov Y.V., Rodionova O.Y., Kucheryavskiy S.V., Pomerantsev A.L.* PLS-DA—A MATLAB GUI tool for hard and soft approaches to partial least squares discriminant analysis // Chemometrics and Intelligent Laboratory System. 2020. No. 203. P. 104064.
18. *Мусаев Ф.Б., Потрахов Н.Н., Белецкий С.Л.* Краткий атлас рентгенографических признаков семян овощных культур. М.: Изд-во ФГБНУ ФНЦО, 2018. 40 с.
19. *Белецкий С.Л., Хаба Н.А., Шилкова О.С.* Новый аппаратно-программный рентгенодиагностический комплекс // Технологии производства и хранения материальных ценностей для государственных нужд. 2018. С. 26—32.
20. *Козьмина Н.П., Гунькин В.А., Сусянок Г.М.* Зерноведение (с основами биохимии растений). М.: Колос, 2006. 464 с.
21. *Dziedzic K., Górecka D., Marques A., Rudzińska M., Podolska G.* The Content of Phytosterols in Raw and Roasted Buckwheat Groats and By-products // Czech Journal of Food Sciences. 2015. V. 33. P. 424—430. <https://doi.org/10.17221/121/2015-CJFS>
22. *Anne Frank Joe A., Gopal A.* Identification of spectral regions of the key components in the near infrared spectrum of wheat grain / 2017 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT). P. 1—5. <https://doi.org/10.1109/ICCPCT.2017.8074207>

23. Ertlen D., Schwartz D., Trautmann M., Webster R., Brunet D. Discriminating between organic matter in soil from grass and forest by near-infrared spectroscopy // *European Journal of Soil Science*. 2010. V. 61. No. 2. P. 207—216.
24. Rosales J.H., Yaptenco K.F., Aguila M.J.B., Armstrong P.R. Rapid Differentiation of Commercially-Available Soy Sauces using Near-Infrared Spectroscopy // *Philippine Journal of Agricultural and Biosystems Engineering*. 2019. V. 15. No. 2. P. 3—12.
25. Pomerantsev A.L., Rodionova O.E. Multiclass partial least squares discriminant analysis: Taking the right way—A critical tutorial // *Journal of Chemometrics*. 2018. V. 32. No. 8. P. e3030.

REFERENCES

1. Aleksenko S.S., Kazimirova K.O., Shtykov S.N. Comparative evaluation of free phenolic compounds content and antioxidant activity of different buckwheat samples // *Zhurnal analiticheskoy himii = Journal of Analytical Chemistry*. 2022. V. 77 (8). P. 704—713. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0044450222080023
2. Wang F.H., Yang J., Zhu H.L. Research on determination method of starch, protein and total flavonoids content in buckwheat by Near-infrared spectroscopy // *Sensor Letters*. 2014. V. 12 (3-4). P. 888—891. DOI: 10.1166/sl.2014.3155
3. Wei Z., Alam T., Al Sulaie S., Bouye M., Deebani W., Song M. An efficient IoT-based perspective view of food traceability supply chain using optimized classifier algorithm // *Information Processing & Management*. 2023. V. 60 (3). P. 103275. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306457323000122> [Accessed 12 February 2024]. DOI: 10.1016/j.ipm.2023.103275
4. Dyck G., Hawley E., Hildebrand K., Paliwal J. Digital Twins: A novel traceability concept for post-harvest handling // *Smart Agricultural Technology*. 2023. V. 3. P. 100079. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772375522000442> [Accessed 15 February 2024]. DOI: 10.1016/j.atech.2022.100079
5. Sun Y., Ye Z., Zhong M., Wei K., Shen F., Li G., Yuan J., Xing C. Rapid and nondestructive method for identification of molds growth time in wheat grains based on hyperspectral imaging technology and chemometrics // *Infrared Physics & Technology*. 2023. V. 128. P. 104532. Available from: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023InPhT.12804532S/abstract> [Accessed 15 February 2024]. DOI: 10.1016/j.infrared.2022.104532
6. Besançon L., Rondet E., Grabulos J., Lullien-Pellerin V., Lhomond L., Cuq B. Study of the microstructure of durum wheat endosperm using X-ray micro-computed tomography // *Journal of Cereal Science*. 2020. V. 96. P. 103115. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S073352102030624X> [Accessed 18 February 2024]. DOI: 10.1016/j.jcs.2020.103115
7. Shchukina P.A., Arhipov M.V., Gusakova L.P., Priyatkin N.S. Methodology of preparation of digital X-ray images of seeds for visual interpretation // *Agrofizika = Agrophysica*. 2020. V. 3. P. 36—44. (In Russ.).
8. Zhang J., Qu M., Gong Z., Cheng F. Online double-sided identification and eliminating system of unclosed-glumes rice seed based on machine vision // *Measurement*. 2022. V. 187. P. 110252. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224121011593> [Accessed 22 February 2024]. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.110252
9. Platov Y.T., Metlenkin D.A., Platova R.A., Rassulov V.A., Vereshchagin A.L., Marin V.A. Buckwheat identification by combined uv-vis-nir spectroscopy and multivariate analysis // *Journal of Applied Spectroscopy*. 2021. V. 88. P. 723—730. DOI: 10.1007/s10812-021-01231-2
10. Li X., Feng X., Fang H., Yang N., Yang G., Yu Z., Shen J., Geng W., He Y. Classification of multi-year and multi-variety pumpkin seeds using hyperspectral imaging technology and three-dimensional convolutional neural network // *Plant Methods*. 2023. V. 19 (1). P. 1—18. DOI: 10.1186/s13007-023-01057-3
11. An D., Zhang L., Liu Z., Liu J., Wei Y. Advances in infrared spectroscopy and hyperspectral imaging combined with artificial intelligence for the detection of cereals quality // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2022. V. 63 (29). P. 1—31. DOI: 10.1080/10408398.2022.2066062
12. Caporaso N., Whitworth M.B., Fisk I.D. Near-Infrared spectroscopy and hyperspectral imaging for non-destructive quality assessment of cereal grains // *Applied spectroscopy reviews*. 2018. V. 53 (8). P. 667—687. DOI: 10.1080/05704928.2018.1425214
13. Musaev F.B., Beletskiy S.L. History and prospects of radiography application in seed production and seed science. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij Rossii. Radioelektronika // Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2021. V. 24 (6). P. 6—15. (In Russ.)
14. Jin B., Qi H., Jia L., Tang Q., Gao L., Li Z., Zhao G. Determination of viability and vigor of naturally-aged rice seeds using hyperspectral imaging with machine learning // *Infrared Physics and Technology*. 2022. V. 122. P. 104097. Available from: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022InPhT.12204097J/abstract> [Accessed 12 March 2024]. DOI: 10.1016/j.infrared.2022.104097
15. Vazhov V.M. Buckwheat in the fields of Altai: monograph. Moscow: Izdatel'stvo «Dom Akademii estestvoznaniya», 2013. 188 p. (In Russ.)

16. *Marin V.A., Vereshchagin A.L.* Kernel size distribution in buckwheat grain fractions // *Hranenie i pererabotka sel'hozsyr'ya = Storage and Processing of Farm Products*. 2019. V. 1. P. 130—138. (In Russ.)
17. *Zontov Y.V., Rodionova O.Y., Kucheryavskiy S.V., Pomerantsev A.L.* PLS-DA—A MATLAB GUI tool for hard and soft approaches to partial least squares discriminant analysis // *Chemometrics and Intelligent Laboratory System*. 2020. V. 203. P. 104064. Available from: <https://vbn.aau.dk/en/publications/pls-da-a-matlab-gui-tool-for-hard-and-soft-approaches-to-partial-> [Accessed 10 March 2024]. DOI: 10.1016/j.chemolab.2020.104064
18. *Musaev F.B., Potrahov N.N., Beletskiy S.L.* A brief atlas of radiographic features of vegetable seeds. Moscow: Izdatel'stvo FGBNU FNCO, 2018. 40 p. (In Russ.)
19. *Beletskiy S.L., Haba N.A., Shilkova O.S.* New hardware and software X-ray diagnostic complex // *Tekhnologii proizvodstva i hraneniya material'nyh cennostej dlya gosudarstvennyh nuzhd*. 2018. P. 26—32. (In Russ.)
20. *Koz'mina N.P., Gun'kin V.A., Suslyanok G.M.* Grain science (with basics of plant biochemistry). Moscow: Kolos, 2006. 464 p. (In Russ.)
21. *Dziedzic K., Górecka D., Marques A., Rudzińska M., Podolska G.* The Content of Phytosterols in Raw and Roasted Buckwheat Groats and By-products // *Czech Journal of Food Sciences*. 2015. V. 33. P. 424—430. DOI: 10.17221/121/2015-CJFS
22. *Anne Frank Joe A., Gopal A.* Identification of spectral regions of the key components in the near infrared spectrum of wheat grain / 2017 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT). P. 1—5. DOI: 10.1109/ICCPCT.2017.8074207
23. *Ertlen D., Schwartz D., Trautmann M., Webster R., Brunet D.* Discriminating between organic matter in soil from grass and forest by near-infrared spectroscopy // *European Journal of Soil Science*. 2010. V. 61 (2). P. 207—216. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2009.01219.x
24. *Rosales J.H., Yaptenco K.F., Aguila M.J.B., Armstrong P.R.* Rapid Differentiation of Commercially-Available Soy Sauces using Near-Infrared Spectroscopy // *Philippine Journal of Agricultural and Biosystems Engineering*. 2019. V. 15 (2). P. 3—12.
25. *Pomerantsev A., Rodionova O.* Multiclass partial least squares discriminant analysis: Taking the right way—a critical tutorial // *Journal of Chemometrics*. 2018. V. 32 (8). P. e3030. Available from: <https://analyticalsciencejournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cem.3030/> [Accessed 10 March 2024]. DOI: 10.1002/cem.3076
-