

МЕХАНИЗАЦИЯ, ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ, АВТОМАТИЗАЦИЯ / MECHANIZATION, ELECTRIFICATION, AUTOMATION

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.2.404-414>



УДК 631.363.7:535.65.083.6

Применение метода водораздела при определении размеров пересекающихся частиц измельченного зерна

© 2025. С. Ю. Булатов^{1✉}, В. Г., Крестинков¹, Г. С. Малышев², О. А. Тареева¹, А. Е. Шамин¹

¹ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет», г. Княгинино, Российская Федерация,

²АО «Опытное конструкторское бюро машиностроения имени И. И. Африкантова», г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Определение гранулометрического состава измельченного зерна имеет важное значение при кормлении сельскохозяйственных животных и птицы. Традиционно применяется ситовой метод определения гранулометрического состава. С развитием современных цифровых технологий появилась возможность определения гранулометрического состава зерна без использования специальных рассевов. Предложен способ, позволяющий определить размеры частиц измельченного зерна с применением цветовой кластеризации и морфологической сегментации. Но данный способ не решает проблемы наложения частиц, когда несколько соприкасающихся компонентов воспринимаются как одна большая частица, что в конечном итоге влияет на конечный результат анализа и дает серьезную погрешность относительно традиционного способа рассевом. В связи с этим было решено усовершенствовать способ путём дополнительного анализа изображения методом водораздела. В статье представлены результаты оценки размеров частиц измельченного зерна при их пересечении и наложении друг на друга. Методика определения размеров заключалась в реализации следующих операций: получение изображения; энтропийная фильтрация полутонового изображения; вычисление среднего значения цвета для каждого цветового кластера изображения; построение уточнённой бинарной маски; вычисление градиентного представления изображения с зёрнами; вычисление маркеров переднего плана изображения; вычисление фоновых маркеров; удаление из градиентного представления изображения всех локальных минимумов яркости вне построенных маркеров; применение метода водораздела; определение площади и максимального диаметра Ферета и сортировка всех областей по размеру. В результате анализа изображений частиц измельченного зерна по предложенной методике построены гистограммы распределения частиц по их площадям и длинам. Выявлена сложность оценки размеров измельченного зерна существующими классическими методами и установлено, что метод водораздела дает достаточно высокую погрешность (около 32 %) при определении площади частиц, но может быть применен при определении линейных размеров частиц, через которые можно выразить их эквивалентный диаметр.

Ключевые слова: гранулометрический состав, диаметр Ферета, обработка изображений, пересечение, площадь, фон, цветовая сегментация, цветовое пространство

Благодарности: исследование выполнено без финансового обеспечения в рамках инициативной тематики.

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Булатов С. Ю., Крестинков В. Г., Малышев Г. С., Тареева О. А., Шамин А. Е. Применение метода водораздела при определении размеров пересекающихся частиц измельченного зерна. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(2):404–414. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.2.404-414>

Поступила: 20.02.2025

Принята к публикации: 03.04.2025

Опубликована онлайн: 29.04.2025

Using the watershed method in determining the size of intersecting particles of crushed grain

© 2025. Sergey Yu. Bulatov✉, Vasily G. Krestinkov¹, Grigory S. Malyshev², Oksana A. Tareeva¹, Anatoly E. Shamin¹

¹Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Knyaginino, Russian Federation

²JSC "I. I. Afrikantov Experimental Design Bureau of Mechanical Engineering", Nizhny Novgorod, Russian Federation

The determination of the granulometric composition of ground grain is of great importance when feeding farm animals and poultry. The sieve method of determining the granulometric composition is traditionally used. With the development of modern digital technologies, it has become possible to determine the granulometric composition of grain without using special sieves. We have proposed a method for determining the particle sizes of crushed grain using color clustering and morphological segmentation. However, this method does not solve the problem of particle overlap, when several contacting components are perceived as one large particle, which ultimately affects the final result of the analysis and gives a serious error relative to the traditional sieving method. In this regard, it was decided to improve the method by additional image analysis using the watershed method. The article presents the results of estimating the particle sizes of crushed grain when they intersect and overlap each other. The sizing technique consisted in the implementation of the following operations: image acquisition; entropy filtering of a grayscale image; calculation of the average color value for each color cluster of the image; construction of a refined binary mask; calculation of the gradient representation of the image with grains; calculation of foreground markers; calculation of background markers; removal from the gradient representation of the image all local brightness minima outside the constructed markers; application of the watershed method; determination of the area and maximum diameter of the Feret and sorting of all areas by size. As a result of the analysis of images of crushed grain particles, histograms of the particle distribution by their areas and lengths were constructed according to the proposed method. The complexity of estimating the size of crushed grain by existing classical methods has been revealed and it has been established that the watershed method gives a sufficiently high error (about 32 %) in determining the particle area, but can be used to determine the linear particle sizes through which their equivalent diameter can be expressed.

Keywords: granulometric composition, diameter of the Feret, image processing, intersection, area, background, color segmentation, color space

Acknowledgements: the study was carried out without financial support within the framework of an initiative topic.

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors stated no conflict of interest.

For citations: Bulatov S. Yu., Krestinkov V. G., Malyshev G. S., Tareeva O. A., Shamin A. E. Using the watershed method in determining the size of intersecting particles of crushed grain. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(2):404–414. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.2.404-414>

Received: 20.02.2025

Accepted for publication: 03.04.2025

Published online: 29.04.2025

Современные рационы сельскохозяйственных животных не обходятся без такого важного компонента как концентрированные корма [1, 2, 3]. Однако в цельном виде скормливание концентратов не осуществляют в силу особенностей физиологии животных, и для лучшего усвоения таких кормов их предварительно измельчают. Перед скормливанием измельченного зерна проводят оценку его гранулометрического состава о соответствии данной группе животных [4]. ГОСТами прописана методика и требования к определению гранулометрического состава измельченного зерна для конкретных групп животных и птицы, которые предполагают применение набора соответствующих сит и рассев на них отобранных проб [5, 6, 7]. С развитием современных цифровых технологий появилась возможность определения гранулометрического состава зерна без использования специальных рассевов. Нами предло-

жен способ, позволяющий определить размеры частиц измельченного зерна с применением цветовой кластеризации [8] и морфологической сегментации [9, 10]. Однако данный способ не решает проблемы наложения частиц, когда несколько соприкасающихся компонентов воспринимаются как одна большая частица, что в конечном итоге влияет на конечный результат анализа и дает серьезную погрешность относительно традиционного способа рассевом.

Цель исследования – оценить возможность определения размеров пересекающихся частиц измельченного зерна при проведении анализа его гранулометрического состава методом цифровой обработки изображений.

Научная новизна – предложена методика определения размеров пересекающихся частиц измельченного зерна при проведении анализа его гранулометрического состава методом цифровой обработки изображений.

Материал и методы. Выделение компонентов смеси с помощью цветовой сегментации в Lab пространстве. В работе [8] подробно рассказано о применении цветовой кластеризации в Lab пространстве при оценке размеров зерна.

Однако в анализируемой пробе измельченного зерна имеется огромное количество частиц, поэтому становится проблематично исключить соприкосновение и пересечение зёрен на рабочей поверхности. Для определения границ разделения зёрен решено использовать метод водораздела [11], который используется в случае градиентного представления изображения [12] с целью эффективного выделения границ объектов на анализируемом изображении. Именно на этих границах предполагается построение водоразделов.

В целом методика определения размеров пересекающихся частиц измельченного зерна при проведении анализа его гранулометрического состава заключается в следующем:

- получение изображения измельченных частиц;
- энтропийная фильтрация полутонового изображения с зерном с целью построения грубой бинарной маски, захватывающей часть фона (данный пункт реализуется только в том случае, если в пределах зёрен есть цветовые кластеры, ядра которых близки к цвету фона);
- вычисление среднего значения цвета для каждого цветового кластера изображения;
- построение уточнённой бинарной маски для отделения измельчённого зерна от фона;
- вычисление функции сегментации, под которой понимается градиентное представление изображения;
- вычисление маркеров переднего плана изображения, под которыми понимаются связные области на бинарной маске, соответствующие внутренним областям водосбросных бассейнов градиентного представления;
- вычисление фоновых маркеров, являющихся в грубом приближении водораздельными линиями;
- удаление из градиентного представления изображения всех локальных минимумов яркости вне построенных маркеров;

- применение метода водораздела по отношению к скорректированному градиентному представлению.

Для получения маски с маркерами применяли операции морфологической эрозии и расширения [13]. Для этого использовали функции `imerode` (для размытия) и `imdilate` (для расширения) пакета MATLAB¹. В настоящем исследовании для реализации размытия и расширения использовали окно размером 12 x 12, состоящее из булевых единиц `true`. Морфологическое размытие использовали совместно с функцией морфологической реконструкции `imreconstruct`², которая принимает в качестве первого аргумента матрицу, полученную после морфологического размытия, а в качестве второго аргумента – полутоновое изображение исходного.

В случае неудовлетворительного результата при использовании пороговой сегментации к полутоновому изображению применяли энтропийную фильтрацию. Энтропия позволяет количественно оценить текстуру областей изображения (гладкая, грубая, зернистая и т. д.), а также выявить нарушение равномерной структуры изображения и определяется³:

$$E = - \sum_{i=0}^{L-1} p(z_i) \log_2 p(z_i), \quad (1)$$

где z_i – случайная величина, соответствующая яркости элементов изображения, $p(z_i)$, $i = 0, 1, 2, \dots, L-1$ – её нормированная гистограмма, где L означает число различных уровней яркости (для полутонового изображения $L = 256$).

В нашей задаче интересна локальная энтропия, то есть энтропия, вычисленная в пределах некоторого окна: на изображении выделяется прямоугольная область размером M на N пикселей, затем на эту область накладывается матрица (окно) того же размера⁴. В каждой ячейке матрицы хранятся булевы значения: логический ноль или логическая единица. Для вычисления локальной энтропии также используется формула (1), однако, гистограмма строится только для области изображения в пределах окна, причём пиксели, которым соответствует логический ноль окна (`false`), не участвуют в построении гистограммы.

¹Marques O., Borba G. B. Image Processing Recipes in MATLAB. New York: Chapman and Hall/CRC, 2024. 248 с. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003170198>

²Там же.

³Там же.

⁴Там же.

В пакете MATLAB есть функция `entropyfilt`⁵, реализующая энтропийную фильтрацию. Данная функция возвращает двумерную матрицу с элементами типа `double`. Для дальнейшей пороговой обработки такой матрицы и более качественной визуализации распределения энтропии необходимо предварительно пронормировать её элементы с помощью следующей формулы:

$$R_i = \frac{E_i - E_{min}}{E_{max} - E_{min}},$$

где R_i – его нормированное значение;

E_i – текущий элемент указанной матрицы;

E_{min} , E_{max} – минимальный и максимальный элементы матрицы, полученной после энтропийной фильтрации.

В результате нормировки мы получим матрицу, элементы которой будут иметь значения в диапазоне от 0 до 1. Для реализации такой нормировки в пакете MATLAB предусмотрена функция `rescale`⁶. Визуализация данной матрицы реализуется функцией `imshow`. В дальнейшем под изображением, полученным путём

энтропийной фильтрации, мы будем подразумевать матрицу, возвращаемую функцией `rescale`.

Результаты и их обсуждение. Рассмотрим самый сложный случай, когда площади зёрен много меньше площади кадра, при этом зёрна соприкасаются друг с другом. Более того, зёрна имеют сложную структуру: в пределах одного зерна можно выделить два цветовых кластера – условно жёлтый и белый. Белый кластер зёрен практически не отличим по цвету от белого фона (рис. 1). Результат цветовой сегментации такого изображения показан на рисунке 2. Для случая практически белых зёрен на белом фоне качество сегментации значительно ухудшилось: часть фона осталась «не закрыта» маской. Для решения данной проблемы было решено использовать пороговую сегментацию с последующим использованием цветовой сегментации. Непосредственное применение пороговой сегментации к полутонному изображению не дало никаких преимуществ, поэтому сначала была реализована энтропийная фильтрация⁷.



Рис. 1. Изображение с соприкасающимися частицами измельченного зерна разной формы /
Fig. 1. An image with touching particles of crushed grain of different shapes



Рис. 2. Маска, построенная для изображения на рисунке 1 с помощью метода цветовой сегментации в Lab пространстве /

Fig. 2. Mask constructed for the image in figure 1 using the color segmentation method in Lab space

На рисунке 3 показан результат энтропийной фильтрации для случая, когда скользящее окно представляет из себя матрицу 9×9 с логическими единицами.

Результат пороговой сегментации изображения на рисунке 3 представлен на рисунке 4 (величина порога яркости была выбрана 0.5). Далее из полученной маски с помощью морфологических операций⁸ удаляли все мелкие

связные области (меньше 300 пикселей), затем делалась инверсия маски с последующим удалением связных областей, меньших 150 пикселей. Результат повторной инверсии полученной маски показан на рисунке 5 (маска наложена на исходное изображение). Именно к изображению, представленному на рисунке 5, применим цветовую сегментацию.

⁵Marques O., Borba G. B. Указ. соч.

⁶Там же.

⁷Там же.

⁸Там же

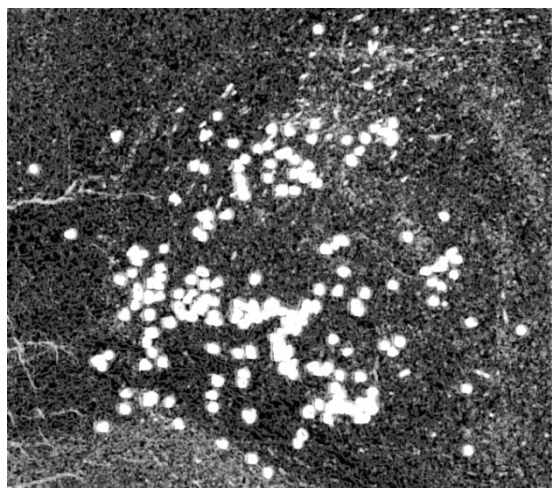


Рис. 3. Результат энтропийной фильтрации, примененной к полутоновому изображению, показанному на рисунке 1 /

Fig. 3. The result of entropy filtering applied to the halftone image obtained from figure 1

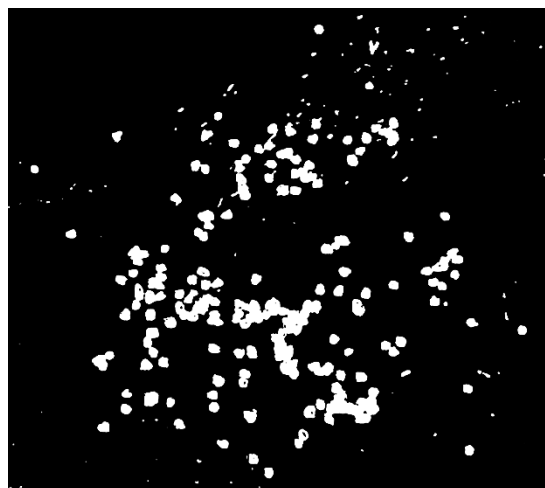


Рис. 4. Бинаризация изображения на рисунке 3 с порогом 0.5 /

Fig. 4. Binarization of the image in figure 3 with a threshold of 0.5



Рис. 5. Маска, полученная из бинарного изображения на рисунке 4 после удаления малых связных областей и дыр /

Fig. 5. Mask obtained from the binary image in figure 4 after removing small connected areas and holes



Рис. 6. Область, выделенная на изображении рисунка 5 с целью определения ядер цветных кластеров /

Fig. 6. The area highlighted in the image in figure 5 for the purpose of determining the cores of color clusters

Для определения ядер цветных кластеров выделим на изображении рисунка 5 область, показанную на рисунке 6. Маски, построенные вручную для «жёлтого» зерна, «белого» зерна и фона (маска для чёрной области не показана) даны на рисунке 7. Вычисляя среднее значение цвета в пределах масок (рис. 7), определяем ядра цветных кластеров и производим цветовую сегментацию для изображения на рисунке 5. Результат представлен на рисунке 8.

При сравнении рисунков 2 и 8 видно, что предварительное использование энтропийной фильтрации позволяет улучшить отделение

зёрен от фона. Однако, часть «белых» зёрен оказывается «накрыта» маской. Тем не менее, по оставшейся «жёлтой» части вполне можно оценить размер исходного зерна.

Применим метод водораздела для изображения на рисунке 8. Для предварительной обработки полутонового изображения использовали медианную фильтрацию с окном 3 x 3, а также операции морфологической эрозии (размытия) и расширения⁹ [14]. Для обеих операций применяли окна размером 4 x 4 с элементами true (структурный элемент `strel(ones(4))` в MATLAB¹⁰).

⁹Marques O., Borba G. B. Указ. соч.

¹⁰Там же.

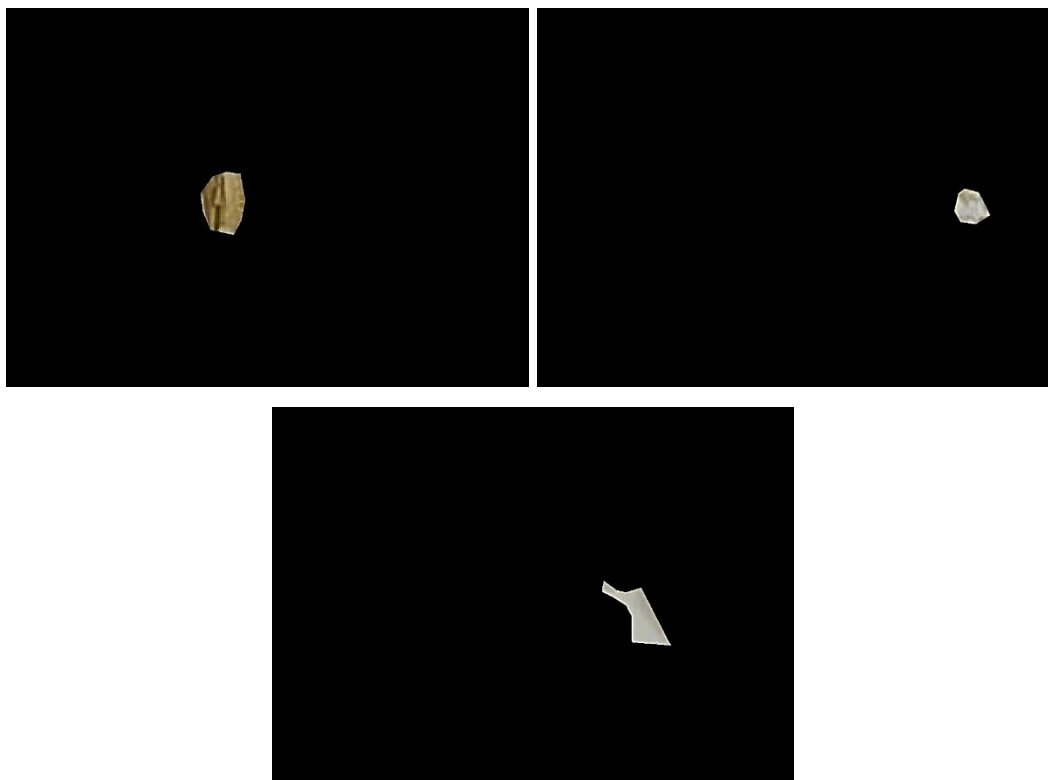


Рис. 7. Маски, построенные вручную для определения цветowych ядер «жёлтого» зерна, «белого» зерна и фона и наложенные на изображение рисунка 6 /

Fig. 7. Masks constructed manually to define the color cores of the “yellow” grain, “white” grain, and background and superimposed on the image of figure 6

После выявления региональных максимумов (функция `imregionalmax` пакета MATLAB) на предварительно обработанном изображении к полученному бинарному изображению была

применена операция морфологического закрытия с окном 6 x 6 (`strel (ones(6))`). Для указанных параметров окон метод водораздела позволил получить результат, представленный на рисунке 9.

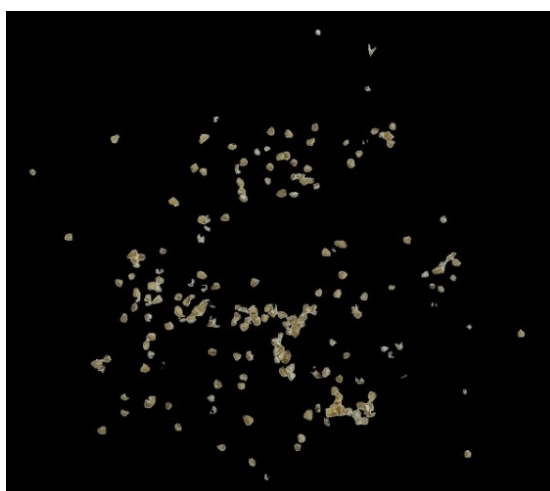


Рис. 8. Результат цветовой сегментации изображения 5, выполненный после построения масок рисунка 7

Fig. 8. The result of color segmentation of image 5, performed after constructing the masks of figure 7

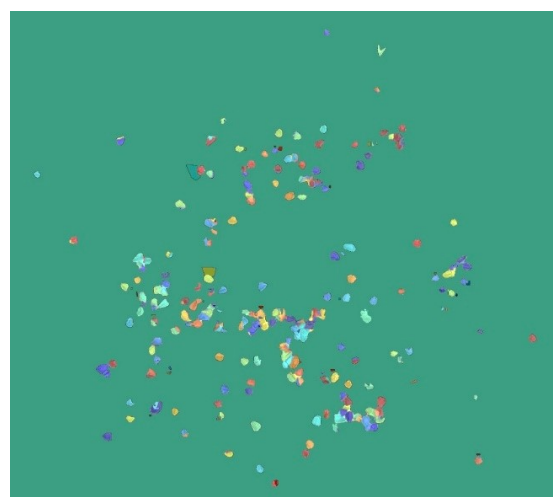


Рис. 9. Результат сегментации изображения рисунка 8 методом водораздела /

Fig. 9. The result of segmentation of the image in figure 8 using the watershed method

В силу малости площади зёрен по сравнению с площадью кадра достаточно сложно зрительно оценить результат, представленный на рисунке 9. Поэтому выделим область изображения, в пределах которой зёрна пересекаются чаще всего (рис. 10).

Из рисунка 11, на котором показаны водоразделы, становится понятен основной недостаток метода водораздела при анализе

зёрен сложной структуры: в пределах одного зерна метод может выделить несколько связанных областей. То есть цветовые кластеры в пределах одного зерна с высокой долей вероятности будут разделены, в результате чего одно зерно воспринимается программой как группа зёрен. Такое дробление вносит высокую погрешность в гранулометрические измерения.

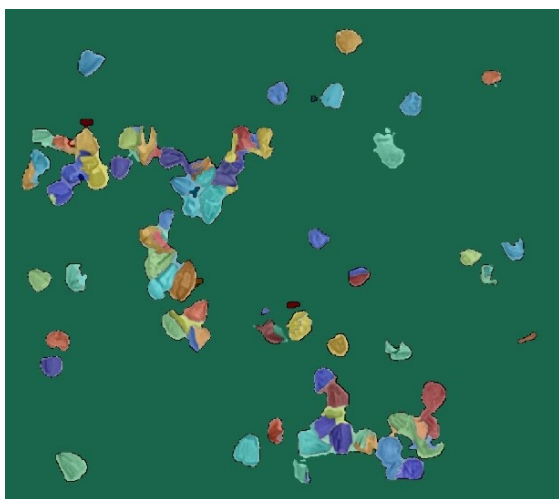


Рис. 10. Небольшой участок изображения на рисунке 9, увеличенный с целью более наглядной демонстрации сегментации изображения рисунка 8 методом водораздела /

Fig. 10. A small section of the image in figure 9, enlarged to better demonstrate the segmentation of the image in figure 8 using the watershed method

Для случая, представленного рисунке 1, достаточно сложно сформулировать критерии, позволяющие исключить из рассмотрения «ложные» зёрна, под которыми понимаются области внутри водоразделов, объединяющие сразу несколько зёрен или захватывающие только часть площади зерна/зёрен. Если в пределах «истинного» зерна находятся несколько водоразделов (это как раз случай нескольких цветовых кластеров в пределах зерна), то связанные области внутри таких водоразделов также считаются ложными компонентами смеси. Наконец, к ложным зёрнам можно отнести области внутри водоразделов, захватывающие большие участки фона. Сложность выявления «ложных» зёрен связана с тем, что размеры и форма компонентов смеси (рис. 1) могут значительно различаться, поэтому будет существенен разброс длин и площадей.

В случае, представленном на рисунке 1, для отбраковки ложных зёрен имеет смысл учитывать форму связанных областей, полученных методом водораздела. Например, на рисунке 12



*Рис. 11. Водоразделы, наложенные на рисунке 10 /
Fig. 11. Watersheds superimposed on figure 10*

цветом показаны примеры связанных областей, форма которых явно не похожа на форму зёрен. Такие области необходимо удалять из маски. Однако выделение областей по признаку их формы – это отдельная сложная задача, которая не рассматривается в рамках настоящей статьи.

Рассмотрим гистограммы распределения связанных областей, выделенных на рисунке 9, по их площадям (рис. 13, а) и длинам (рис. 13, б). Диапазоны изменения площадей и длин делили на 30 сегментов. Гистограмма по площадям не может дать объективных данных для гранулометрического анализа, так как площади построенных связанных областей (рис. 9) существенно зависят от их геометрии. А, как было сказано выше, геометрия областей, полученных методом водораздела, может существенно отличаться от геометрии «истинных» зёрен. Более того, дробление целых зёрен на отдельные связанные области приводит к тому, что количество зёрен с малой площадью должно быть завышено, что и наблюдается на гистограмме рисунка 13, а.



Рис. 12. Примеры «ложных» зёрен, форма которых существенно отличается от естественной /

Fig. 12. Examples of “false” grains, the shape of which differs significantly from the natural one

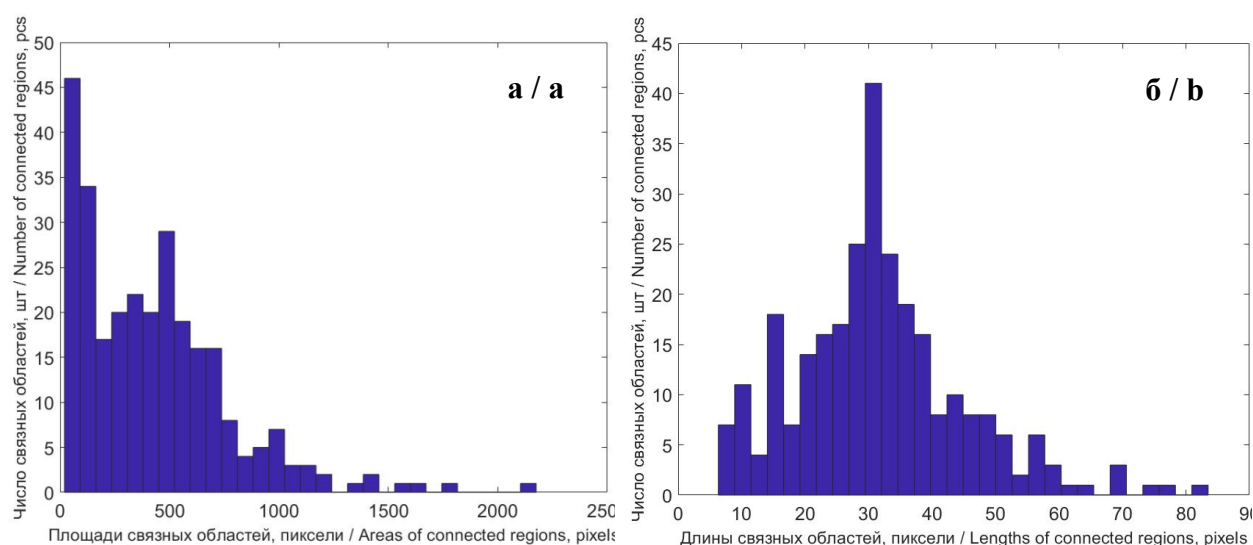


Рис. 13. Гистограмма распределения связанных областей, представленных на рисунке 9: а – по площадям; б – по длинам /

Fig. 13. Histogram of the distribution of connected regions, presented in figure 9: a – by area; b – by length

Тем не менее, гистограмму рисунка 13, а можно скорректировать, если известна статистика распределения зёрен по площадям, полученная в ходе других экспериментов. Такую статистику можно получить с высокой точностью для случая, когда зёрна не пересекаются, и при этом фон, на котором они находятся, отличается от белого. В результате множества экспериментов можно построить гипотезу о распределении зёрен по площадям для конкретного вида смеси. Зная данное распределение, можно убрать столбцы на гистограмме рисунка 13, а, нарушающие гипотезу о распределении. Из маски рисунка 9 нужно будет исключить связанные области, соответствующие удалённым столбцам.

Что касается гистограммы по максимальным диаметрам Ферета, то она в грубом

приближении даёт представление о гранулометрическом составе смеси, показанной на рисунке 1. Дело в том, что хотя связанные области рисунка 9 имеют форму, отличную от формы реальных зёрен, максимальные их длины вполне сопоставимы с длинами реальных зёрен, что демонстрируется примерами на рисунке 14, а – зерно сегментировано на два «ложных» зерна. Хорошо видно, что оба ложных зерна имеют длину, сопоставимую с истинной длиной исходного зерна, в то время как площадь более мелкого «ложного» зерна будет почти в три раза меньше площади истинного зерна. На рисунке 14, б показана связанная область, имеющая длину 52 пикселя. Хотя исходное зерно имеет другую геометрию и площадь, очевидно, что измеренная длина практически совпадает с длиной истинного зерна.

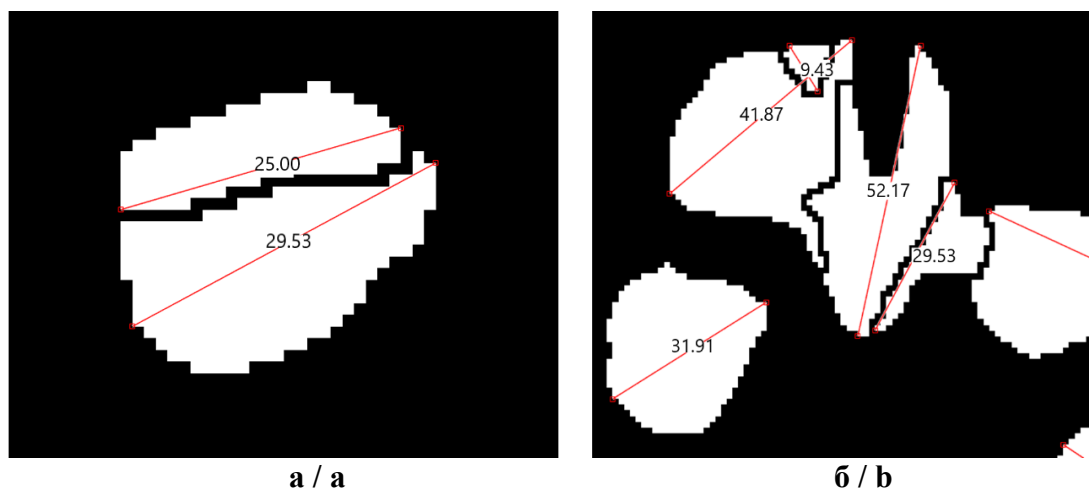


Рис. 14. Связные области, длины которых сопоставимы с длинами реальных зёрен: а – зерно, сегментированное на два «ложных» зерна; б – связная область с длиной 52 пикселя /

Fig. 14. Connected regions whose lengths are comparable to the lengths of real grains: a – grain segmented into two “false” grains; b – connected region with a length of 52 pixels

Также надо отметить, что по данным гистограмм рисунка 13 вполне можно определить ложные зёрна с большими площадями и длинами. Они соответствуют правым частям гистограмм. Таких зёрен крайне мало (это видно из рис. 13), то есть они выпадают из статистики и могут быть исключены из маски, представленной на рисунке 9. На рисунке 15

в качестве примера показаны два ложных зерна с длинами, превышающими 75 пикселей. Из рисунка 13, б видно, что эти зёрна соответствуют последним столбцам гистограммы, что и подтверждает их «ложный статус». Действительно, рассмотренный случай соответствует ситуации, когда водораздел охватил несколько реальных зёрен.

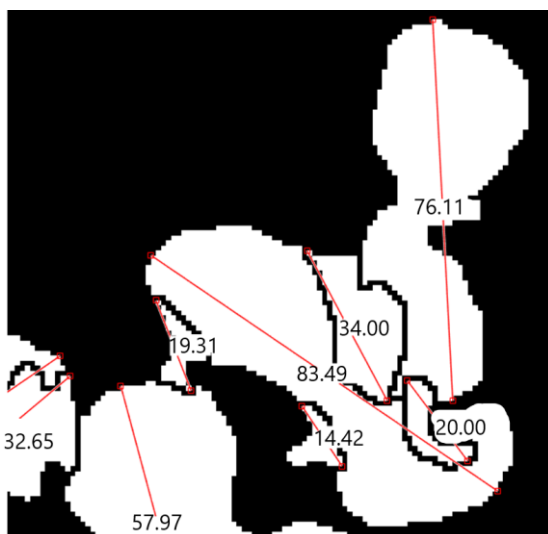


Рис. 15. Пример двух ложных зёрен с длинами, превышающими 75 пикселей /

Fig. 15. Example of two false grains with lengths exceeding 75 pixels

Нами был рассмотрен наиболее сложный случай, когда частицы измельченного зерна имеют цвет, близкий к цвету фона. При этом определено, что при использовании метода водораздела в данном случае участвуют 68 % анализируемых частиц. То есть погрешность в данном случае составила 32 %. Повысить точность применения данного метода возможно за счет применения наиболее оптимального цвета фона.

Заключение. Проведенное исследование показало сложность оценки размеров измельченного зерна существующими классическими методами цифровой обработки изображений. Метод водораздела дает достаточно высокую погрешность (около 32 %) при определении площади частиц в случае близкого цветового соотношения частиц зерна и фона. Однако может быть применен при определении линейных размеров частиц, через которые можно выразить их эквивалентный диаметр.

Список литературы

1. Абуов С. К., Бабаджанова Н. Современные аспекты кормления молочных коров. *Eo ipso*. 2023;(10):89–90. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54623135> EDN: XGXZPM
2. Бурда Т. М. Анализ способов приготовления и раздачи кормовых смесей. Научные исследования студентов в решении актуальных проблем АПК: мат-лы всеросс. студ. научн.-практ. конф. В IV томах. п. Молодежный. Иркутск: Иркутский ГАУ им. А. А. Ежевского, 2022. С. 182–189. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49081866> EDN: LJXJLC
3. Ефимова Д. В., Фёдоров В. Г., Мануриков Я. Н. Кормление скота при роботизированном доении. Актуальные вопросы в развитии агропромышленного, химического и лесного комплексов: сб. тез. научн.-практ. конф. молодых ученых и специалистов. Великий Новгород: Новгородский ГУ имени Ярослава Мудрого, 2021. С. 115–117. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48169518&pff=1> EDN: LKZHKI
4. Тунгучбекова Ж. Т., Ибраева Ж., Мурзубраимов Б. М., Ысманов Э. М., Шабданова Э. А. Определение гранулометрического состава фильтрационного кека методом ситового анализа. *Бюллетень науки и практики*. 2023;9(5):388–394. DOI: <https://doi.org/10.33619/2414-2948/90/48> EDN: DFQQFE
5. Абаляхин А. М., Барабанов Д. В., Крупин А. В., Муханов Н. В. Оценка эффективности работы центробежного измельчителя фуражного зерна. *АгроЭкоИнженерия*. 2024;(1(118)):43–57. DOI: <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-1118-43-56> EDN: CVRDZZ
6. Сабиев У. К., Садов В. В. Показатели эффективности измельчителей фуражного зерна. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2021;(6(200)):93–99. Режим доступа: <https://elibrary.ru/bszfpo> EDN: BSZFPO
7. Савиных П. А., Турубанов Н. В., Мошонкин А. М. Определение оптимальных конструктивно-технологических параметров молотковой дробилки с решетками в торцевых поверхностях. *Агроинженерия*. 2023;25(5):17–22. DOI: <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-5-17-22> EDN: CZVEEL
8. Иванов Ю. А., Булатов С. Ю., Тареева О. А., Малышев Г. С. Применение метода цветовой сегментации в задаче определения однородности кормосмеси. *Техника и технологии в животноводстве*. 2024;(1(53)):54–63. DOI: <https://doi.org/10.22314/27132064-2024-1-54> EDN: MPNWEK
9. Mohanty S. S., Tripathy S. Application of Different Filtering Techniques in Digital Image Processing. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2062:012007. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2062/1/012007>
10. Pierre F., Amendola M., Bigeard C., Ruel T., Villard P.-F. Segmentation with Active Contours. *Image Processing On Line*. 2021;1:120–141. DOI: <https://doi.org/10.5201/ipol.2021.298>
11. Mohanty S. S., Tripathy S. Application of Watershed Algorithm in Digital Image Processing. *Proceedings of the 6th International Conference on Advance Computing and Intelligent Engineering*. 2022;428:401–410. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-2225-1_36
12. Wu Y., Li Q. The algorithm of watershed color image segmentation based on morphological gradient. *Sensors*. 2022;22(21):8202. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22218202>
13. Said K.A.M., Jambek A. B. Analysis of Image Processing Using Morphological Erosion and Dilation. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2071:012033. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2071/1/012033>
14. Zou L., Song L.-T., Weise T., Wang X.-F., Huang Q.-J., Deng R., Wu Z.-Z. A survey on regional level set image segmentation models based on the energy functional similarity measure. *Neurocomputing*. 2021;452:606–622. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2020.07.141>

References

1. Abuov S. K., Babadzhanova N. Modern aspects of dairy cow feeding. *Eo ipso*. 2023;(10):89–90. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54623135>
2. Burda T. M. Analysis of methods of preparation and distribution of feed mixtures. Scientific research of students in solving urgent problems of the agro-industrial complex: Proceedings of the All-Russian student scientific-practical conference. In IV vol. *Molodezhny. Irkutsk: Irkutskiy GAU im. A. A. Ezhevskogo*, 2022. pp. 182–189. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49081866>
3. Efimova D. V., Fedorov V. G., Manurikov Ya. N. Feeding livestock with robotic milking. Current issues in the development of agro-industrial, chemical and forestry complexes: collection of abstracts of scientific research-practical conference of young scientists and specialists. Velikiy Novgorod: *Novgorodskiy GU imeni Yaroslava Mudrogo*, 2021. pp. 115–117. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48169518&pff=1>
4. Tunguchbekova Zh. T., Ibraeva Zh., Murzubraimov B. M., Ysmanov E. M., Shabdanova E. A. Determination of the particular composition of the filter cake by the sieve method. *Byulleten' nauki i praktiki* = Bulletin of Science and Practice. 2023;9(5):388–394. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33619/2414-2948/90/48>
5. Abalikhin A. M., Barabanov D. V., Krupin A. V., Mukhanov N. V. Evaluation of performance efficiency of centrifugal feed grain grinder. *AgroEkoInzheneriya* = AgroEcoEngineering. 2024;(1(118)):43–57. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-1118-43-56>
6. Sabiev U. K., Sadov V. V. Feeding grain grinder efficiency indices. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of Altai State Agricultural University. 2021;(6(200)):93–99. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/bszfpo>

7. Savinykh P. A., Turubanov N. V., Moshonkin A. M. Determination of optimal design and technological parameters of a hammer crusher with sieves in end surfaces. *Agroinzheneriya* = Agricultural Engineering (Moscow). 2023;25(5):17–22. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-5-17-22>

8. Ivanov Yu. A., Bulatov S. Yu., Tareeva O. A., Malyshev G. S. Application of the color segmentation method at the feed mixture uniformity determination task. *Tekhnika i tekhnologii v zhivotnovodstve* = Machinery and technologies in livestock. 2024;(1(53)):54–63. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22314/27132064-2024-1-54>

9. Mohanty S. S., Tripathy S. Application of Different Filtering Techniques in Digital Image Processing. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2062:012007. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2062/1/012007>

10. Pierre F., Amendola M., Bigeard C., Ruel T., Villard P.-F. Segmentation with Active Contours. *Image Processing On Line*. 2021;1:120–141. DOI: <https://doi.org/10.5201/ipol.2021.298>

11. Mohanty S. S., Tripathy S. Application of Watershed Algorithm in Digital Image Processing. *Proceedings of the 6th International Conference on Advance Computing and Intelligent Engineering*. 2022;428:401–410. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-2225-1_36

12. Wu Y., Li Q. The algorithm of watershed color image segmentation based on morphological gradient. *Sensors*. 2022;22(21):8202. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22218202>

13. Said K.A.M., Jambek A. B. Analysis of Image Processing Using Morphological Erosion and Dilation. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2071:012033. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2071/1/012033>

14. Zou L., Song L.-T., Weise T., Wang X.-F., Huang Q.-J., Deng R., Wu Z.-Z. A survey on regional level set image segmentation models based on the energy functional similarity measure. *Neurocomputing*. 2021;452:606–622. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2020.07.141>

Сведения об авторах

✉ **Булатов Сергей Юрьевич**, доктор техн. наук, доцент, профессор кафедры «Технические системы и технологии», ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет», ул. Октябрьская, 22, г. Княгинино, Нижегородская область, Российская Федерация, 606340, e-mail: ngiei-126@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9099-0447>, e-mail: bulatov_sergey_urevich@mail.ru

Крестинков Василий Георгиевич, аспирант, ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет», ул. Октябрьская, 22, г. Княгинино, Нижегородская область, Российская Федерация, 606340, e-mail: ngiei-126@mail.ru

Малышев Григорий Сергеевич, инженер-конструктор, АО «Опытное конструкторское бюро машиностроения имени И. И. Африкантова», Бурнаковский проезд, 15, г. Нижний Новгород, Российская Федерация, 606340, e-mail: grlg0r@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0466-9003>

Тареева Оксана Александровна, кандидат техн. наук, доцент, доцент кафедры «Технические системы и технологии», ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет», ул. Октябрьская, 22, г. Княгинино, Нижегородская область, Российская Федерация, 606340, e-mail: ngiei-126@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2682-1216>

Шамин Анатолий Евгеньевич, доктор экон. наук, профессор, профессор кафедры «Экономика и автоматизация бизнес-процессов», ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет», ул. Октябрьская, 22, г. Княгинино, Нижегородская область, Российская Федерация, 606340, e-mail: ngiei-126@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2382-274X>

Information about the authors

✉ **Sergey Yu. Bulatov**, PhD in Engineering, Associate Professor, Professor of the Department of Technical Service, Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Oktyabrskaya str., 22, Knyaginino, Nizhny Novgorod Region, Russian Federation, 606340, e-mail: ngiei-126@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9099-0447>, e-mail: bulatov_sergey_urevich@mail.ru

Vasily G. Krestinkov, Postgraduate Student, Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Oktyabrskaya str., 22, Knyaginino, Nizhny Novgorod Region, Russian Federation, 606340, e-mail: ngiei-126@mail.ru

Grigory S. Malyshev, Design Engineer, JSC "I. I. Afrikantov Experimental Design Bureau of Mechanical Engineering", Burnakovsky Proezd, 15, Nizhny Novgorod, Russian Federation, 606340, e-mail: grlg0r@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0466-9003>

Oksana A. Tareeva, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technical Systems and Technologies, Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Oktyabrskaya str., 22, Knyaginino, Nizhny Novgorod Region, Russian Federation, 606340, e-mail: ngiei-126@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2682-1216>

Anatoly E. Shamin, DSc in Economics, Professor, Professor of the Department of Economics and Automation of Business Processes, Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Oktyabrskaya str., 22, Knyaginino, Nizhny Novgorod Region, Russian Federation, 606340, e-mail: ngiei-126@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2382-274X>

✉ – Для контактов / Corresponding author