

Автоматизированный анализ структуры микротекстуры шлифа песчаника

В.М. Сеницына

РГУ нефти и газа (НИУ) им. Губкина, г. Москва

E-mail: v-sin@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрена разработанная автором методика, позволяющая классифицировать обломочные зерна, входящие в состав шлифа, по форме обломков осадочных горных пород. Форма зерна оценивается двумя показателями: соотношением размеров по двум направлениям (длины и ширины) и степенью окатанности. Методика основана на законах нечеткой логики. Предварительно изображения обломков в шлифе сглаживаются, затем нечеткая система разделяет обломочные зерна на группы, вычисляя степени окатанности и удлинненности зерен. Статистический анализ показал, что все параметры можно считать распределенными по логнормальному закону.

Ключевые слова: обломочные зерна, степень окатанности, степень удлинненности, нечеткая логика, нечеткая система, логнормальное распределение.

Для цитирования: Сеницына В.М. Автоматизированный анализ структуры микротекстуры шлифа песчаника // Актуальные проблемы нефти и газа. 2019. Вып. 3(26). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-26.art10>

Введение

В данной работе рассматриваются осадочные обломочные горные породы. Они составляют от 14 до 40% всех осадочных пород, а по подсчетам А.Б. Ронова (1983) – 25%. Обломочные породы распространены на всех континентах, во всех морях и океанах всех геологических возрастов. Обломки образуются как результат процессов выветривания, вулканизма, тектонической и техногенной активности. Сортировка и скругление обломков связаны с их переносом под воздействием потоков воды, ветра и движения льда.

Изучение обломочных пород позволяет решать многие генетические вопросы – устанавливать положение, рельеф и состав пород источников сноса, направление и способы переноса обломочного материала, среду и динамику среды отложения, иногда климат и т. д. [1]. С обломочными породами связано более половины мировых запасов углеводородного сырья.

Обломочные компоненты обладают структурой, которая описывается тремя основными показателями [2]:

- размер обломков;
- форма обломков;
- отсортированность (однородность или близость размеров обломков).

Обломки размером менее 0.05–0.1 мм обычно называют частицами, (0.05–0.1)–(1.0–2.0) мм – зернами, а более крупные – обломками с собственными названиями: гравий, дресва, галька, валун и т.д.

На рис. 1 представлена классификация обломочных зерен по форме обломков. Рассмотрены девять возможных форм обломочных зерен.

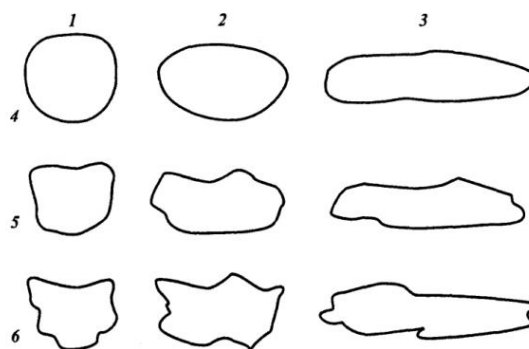


Рис. 1. Формы обломочных зерен

Первичные формы:

1–3 – подразделение по соотношению размеров: 1 – изометричные, 2 – удлиненные, 3 – резко удлиненные;

4–6 – подразделение по степени окатанности: 4 – окатанные, 5 – полуокатанные, 6 – неокатанные (угловатые).

Каждый обломок обладает двумя параметрами – это степень удлинения и степень окатанности. В данной работе будет изучен шлиф песчаника. Песчаники образуются в результате разрушения горных пород, переноса обломков водой или ветром и отложения с последующей цементацией. Степень окатанности обломков и степень отсортированности по величине зерен указывают на протяженность переноса обломков от места первоначального образования.

При обработке изображения шлифа песчаника необходимо изучить все входящие в его состав обломки. Очень часто присутствует шум на границах обломка. Поэтому при обработке входных изображений вначале следует сгладить линии их границ.

Цель работы состоит в том, чтобы по данному изображению шлифа песчаника определить форму обломков, т.е. отнести каждый из них к одному из девяти типов при помощи нечеткой логики, а также провести статистическую обработку результатов.

2. Обработка изображений зерен

2.1. Удаление шумов на исходном изображении

Рассмотрим изображение (рис. 2) шлифа обломочной породы песчаника.

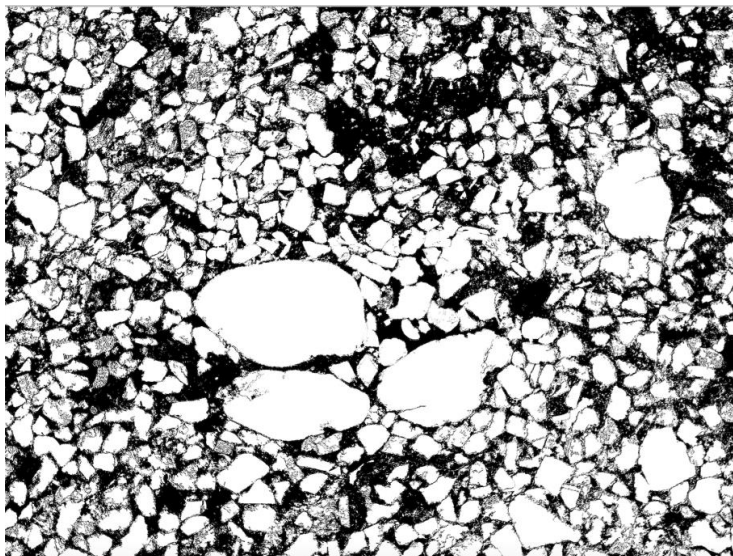


Рис. 2. Образец шлифа песчаника

Черно-белое изображение представляет собой матрицу, состоящую из двух значений: ноль (черный) и единица (белый). Исходный образец шлифа (см. рис. 2) сильно «зашумлен», многие обломки плохо отделяются друг от друга, их трудно различить на взгляд. Для того, чтобы избавиться от шума, необходимо заменить значения граничных пикселей объекта на 0, то есть удалить слой толщиной в 1 пиксель. Результат применения данной маски фильтра представлен на рис. 3.

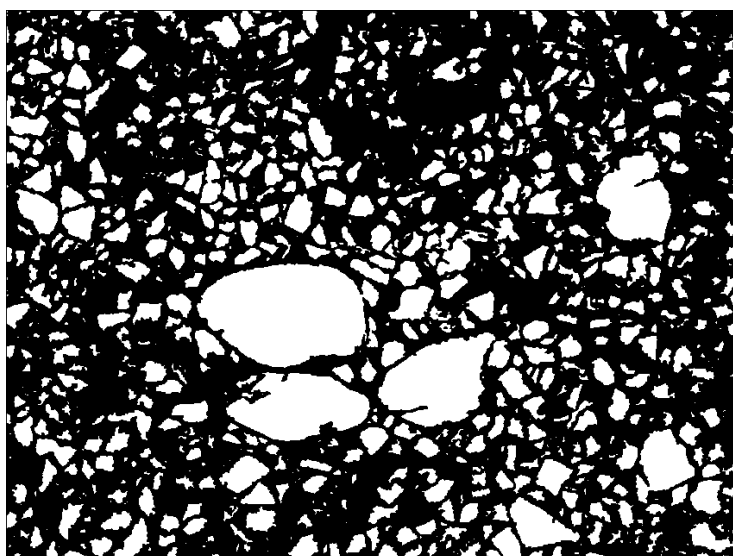


Рис. 3. Образец шлифа после удаления граничного шума

2.2. Вырезание всех обломков песчаника

Для того, чтобы вырезать обломки из изображения, используется следующий алгоритм:

1. Находим первый белый пиксель исходного изображения или первый элемент матрицы, который равен единице, где (x, y) – его координаты, x – номер строки матрицы изображения f , а y – номер столбца матрицы f . Заменяем значение на двойку.

2. Ищем все единицы, которые расположены в ячейках $(x - 1, y)$, $(x + 1, y)$, $(x, y - 1)$, $(x, y + 1)$, и меняем их на двойку. Повторяем данную процедуру для всех полученных ячеек, которые равны двум, до тех пор, пока единицы на границе не закончатся (то есть либо останутся на диагональных элементах, например, в ячейках $(x - 1, y + 1)$, что нам неинтересно, либо вокруг полученных двоек окажутся лишь нули или граница).

3. Все двойки полученного изображения меняем на тройки – это и есть полученный вырезанный обломок. В исходном шрифте заменяем ячейки, равные двум, на нули (закрашиваем черным). Тройки полученного обломка меняем на единицы.

Полученное изображение – вновь бинарное.

Очень важно, чтобы полученный обломок не лежал на границе шрифта, для этого проверяем, какая часть обломка лежит на всех четырех границах (верхняя, нижняя, правая, левая). Если она больше 20% (процент установлен эмпирически), то такое изображение не попадает в рассмотрение. Затем необходимо выделить лишь значимые обломки. Это те изображения, которые содержат более 1500 ячеек. Площадь исходного изображения равна 3120×4164 ячеек. Поэтому искомые изображения составляют более 0.01% (определен также эмпирически) шрифта. Пример полученного обломка представлен на рис. 4.



Рис. 4. Полученный обломок песчаника

Таким образом, последующая обработка происходит с сохраненными изображениями обломков.

2.3. Сглаживание обломков

После вырезания обломков могут возникнуть зашумленные изображения, пример такого обломка представлен на рис. 5.



Рис. 5. Зашумленный обломок

Такие изображения сглаживают [3] для дальнейшей обработки и классификации. Алгоритм сглаживания состоит из трех этапов.

- **Создание рамки вокруг изображения**

Ширина рамки подбирается эмпирически. Рамка нужна для лучшего сглаживания, так как объект будет находиться внутри изображения и ни один пиксель не останется лежать на границе.

- **Выделение границ изображения**

Для того, что сгладить изображение, необходимо первоначально выделить его границы. Будем использовать маску оператора Собеля (рис. 6).

| | | |
|----|----|----|
| -1 | -2 | -1 |
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 2 | 1 |

| | | |
|----|---|---|
| -1 | 0 | 1 |
| -2 | 0 | 2 |
| -1 | 0 | 1 |

Рис. 6. Маски оператора Собеля

Определим матрицу элементов области изображения под маской:

$$\tilde{f} = \begin{bmatrix} f(x-1, y-1) & f(x-1, y) & f(x-1, y+1) \\ f(x, y-1) & f(x, y) & f(x, y+1) \\ f(x+1, y-1) & f(x+1, y) & f(x+1, y+1) \end{bmatrix},$$

где f – матрица изображения.

Преобразованное изображение получается путем свертки масок фильтра и исходного изображения:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} * \tilde{f}$$

$$G_y = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \tilde{f}$$

$$F = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$$

Таким образом, изменяется каждый пиксель изображения. Граничные элементы остаются равными единице, а все остальные становятся нулями.

Пример работы данного оператора представлен на рис. 7.

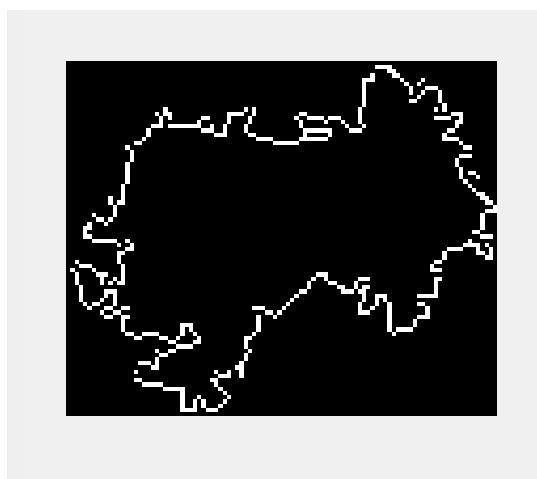


Рис. 7. Границы обломка (см. рис. 5)

- **Заполнение промежутков на границе изображения**

Результат работы представлен на рис. 8.

После сглаживания видно, что обломок следует отнести к группе «неокатанный, резко-удлиненный».

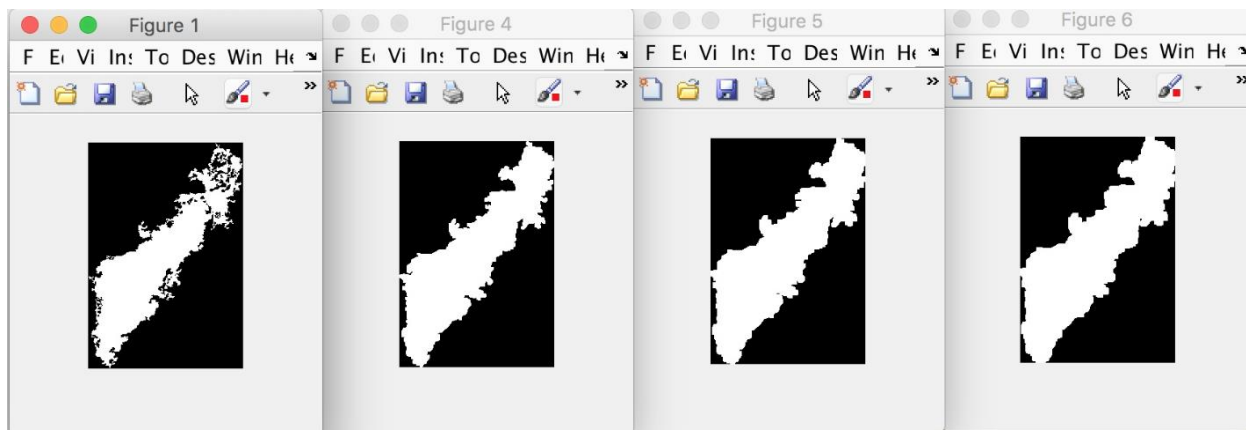


Рис. 8. Сглаживание исходных изображений

2.4. Вычисление параметров сглаженных изображений

После сглаживания полученные изображения обломков готовы к обработке. Вычислим параметры изображения, которые позволят определить меру удлинения и окатанности. Для того, чтобы посчитать форм-фактор обломков F , необходимо знать периметр и площадь обломка:

$$F = \frac{L^2}{S}.$$

Периметр оценивается как количество всех элементов, находящихся на границе изображения, а площадь обломка – как количество всех элементов обломка. После подсчета форм-фактора необходимо вычислить удлинение изображения.

Каждое изображение можно вписать в эллипс (рис. 9), тогда удлинение полученного изображения – это отношение наибольшей оси эллипса к наименьшей.

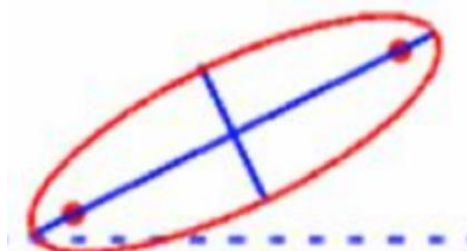


Рис. 9. К расчету удлинения

3. Нечеткая система

3.1. Создание нечеткой системы

Основная цель данной работы – сортировка обломков по одному из девяти типов (см. рис. 1). В решении таких задач помогает нечеткая логика, так как входящие

параметры (форм-фактор и удлинение) – нечеткие. Для их вычисления будем использовать систему Сугено [4].

Для создания нечеткой системы были отобраны образцы, которые явно подходили к одной из 9 групп. Окатанные обломки обычно встречаются в таких породах, как валун, галька и гравий, поэтому в шлифе песчаника их нет. Таким образом, остаются 6 групп. Обучающая выборка [5] представлена на рис. 10.

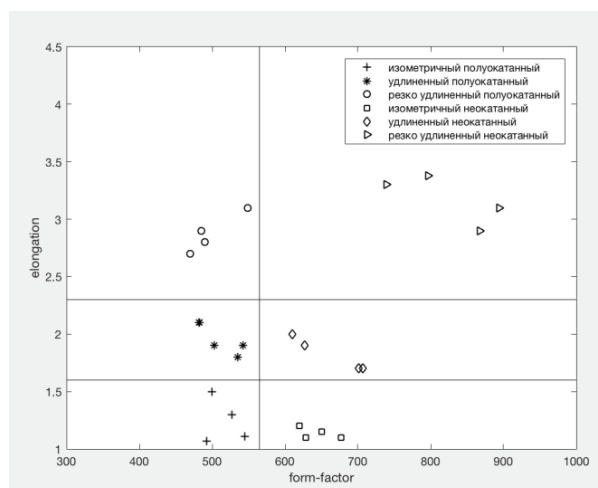


Рис. 10. Обучающая выборка

Входные параметры для нечеткой системы – удлинение и форм-фактор. – На рис. 11 представлены функции принадлежности удлинения обломков. Для обломка с низким удлинением параметры функции принадлежности $[1 \ 1 \ 2.1]$, со средним удлинением – $[1 \ 2.1 \ 2.75]$, с высоким – $[2.1 \ 2.75 \ 6]$.

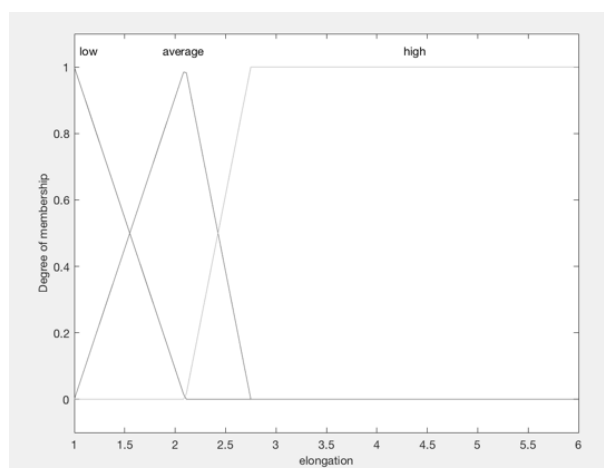


Рис. 11. Удлинение

На рис. 12 представлены функции принадлежности для форм-фактора обломков.

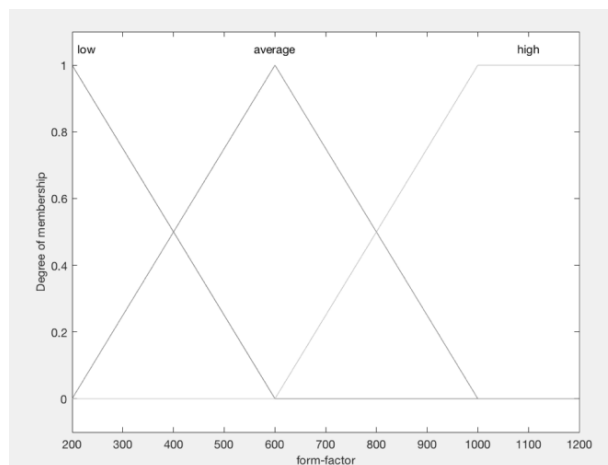


Рис. 12. Форм-фактор

Для обломка с низким значением форм-фактора параметры функции принадлежности $[200 \ 200 \ 600]$, со средним значением форм-фактора – $[200 \ 600 \ 1000]$, с высоким – $[600 \ 1000 \ 1200 \ 1200]$.

В данной задаче используются два выходных параметра, которые определяются четким образом. Первый выходной параметр – степень удлинения. Низкая степень удлинения равна 0, средняя – 0.5, а высокая – 1. Второй выходной параметр – степень окатанности. Низкая степень окатанности равна 0, средняя – 0.5, а высокая – 1. Числа выбраны также эмпирически для удобства использования.

Система состоит из 9-ти правил.

ЕСЛИ удлинение низкое и форм-фактор низкий, ТО степень окатанности маленькая и степень удлинения маленькая.

ЕСЛИ удлинение среднее и форм-фактор низкий, ТО степень окатанности маленькая и степень удлинения средняя.

ЕСЛИ удлинение высокое и форм-фактор низкий, ТО степень окатанности маленькая и степень удлинения большая.

ЕСЛИ удлинение низкое и форм-фактор средний, ТО степень окатанности средняя и степень удлинения маленькая.

ЕСЛИ удлинение низкое и форм-фактор высокий, ТО степень окатанности большая и степень удлинения маленькая.

ЕСЛИ удлинение высокое и форм-фактор высокий, ТО степень окатанности маленькая и степень удлинения большая.

ЕСЛИ удлинение высокое и форм-фактор средний, ТО степень окатанности средняя и степень удлинения большая.

ЕСЛИ удлинение среднее и форм-фактор средний, ТО степень окатанности средняя и степень удлинения средняя.

ЕСЛИ удлинение среднее и форм-фактор высокий, ТО степень окатанности большая и степень удлинения средняя.

3.2. Результаты работы нечеткой системы

Для настройки и проверки качества нечеткой системы были случайно отобраны 20 образцов. Обучение происходило на первых 10-ти образцах, а контрольная проверка – на 10-ти оставшихся. Пример обломка, который относится к обучающей выборке, изображен на рис. 13. Очевидно, что он относится к группе 9 «неокатанный резко-удлиненный», т. е. его выходные параметры для нечеткой системы должны быть равны: 1 – для степени окатанности и 1 – для степени удлиненности.



Рис. 13. Обломок для обучающей выборки

В табл. 1 представлены возможные значения выходных параметров и номера соответствующих групп.

Таблица 1

Параметры для выбора номера группы

| № группы | Окатанность | Удлинение |
|----------|---------------|---------------|
| 1 | 0–0.32 | 0–0.32 |
| 2 | 0–0.32 | 0.33–0.5–0.66 |
| 3 | 0–0.32 | 0.67–1 |
| 4 | 0.33–0.5–0.66 | 0–0.32 |
| 5 | 0.33–0.5–0.66 | 0.33–0.5–0.66 |
| 6 | 0.33–0.5–0.66 | 0.67–1 |
| 7 | 0.67–1 | 0–0.32 |
| 8 | 0.67–1 | 0.33–0.5–0.66 |
| 9 | 0.67–1 | 0.67–1 |

Результаты работы нечеткой системы представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты работы нечеткой системы

| № объекта | Эмпирический номер группы | Степень окатанности | Степень удлиненности | Полученный номер группы |
|-----------|---------------------------|---------------------|----------------------|-------------------------|
| 198 | 7 | 0.835563898 | 0.156987441 | 7 |
| 199 | 8 | 0.743942308 | 0.548357043 | 8 |
| 200 | 8 | 0.790389905 | 0.508085319 | 8 |
| 203 | 4 | 0.63677992 | 0.262281916 | 4 |
| 204 | 7 | 0.712943014 | 0.343399653 | 7 |
| 205 | 7 | 0.663253561 | 0.064779159 | 7 |
| 206 | 4 | 0.546766772 | 0.237596904 | 4 |
| 207 | 5 | 0.580789854 | 0.460314879 | 5 |
| 208 | 7 | 0.775884207 | 0.276818528 | 7 |
| 214 | 8 | 0.679318891 | 0.535555635 | 8 |

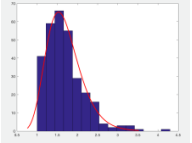
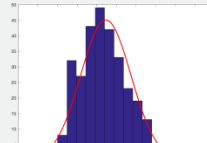
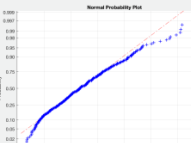
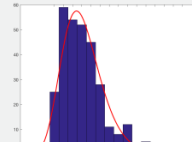
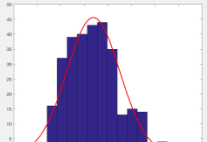
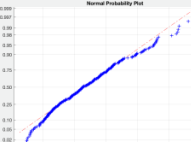
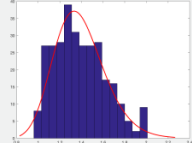
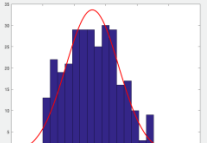
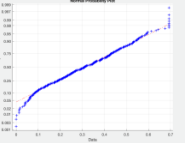
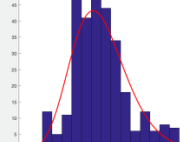
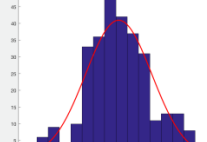
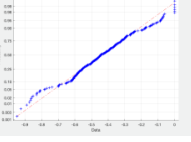
По результатам нечеткой системы все группы определены верно.

4. Статистический анализ

Была проведена статистическая обработка входных и выходных параметров нечеткой системы. Было интересно узнать, распределены ли данные по какому-либо закону, а также возможно ли его подобрать. После различных сравнений гистограмм и функций распределения был сделан вывод, что входные (удлинение и форм-фактор) и выходные (степень окатанности и степень удлиненности) параметры распределены по логнормальному закону. Это подтверждается гистограммами, вероятностной бумагой и двумя статистическими критериями (критерий Хи-квадрат [6] и критерий Лиллиефорса [7], автор которого ссылается на критерий Колмогорова–Смирнова [8]). Результаты исследования представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты статистического исследования

| Название параметра | Гистограмма для исходных данных | Гистограмма для прологарифмированных данных | Вероятностная бумага | p -значение (Хи-квадрат) | p -значение (Лиллиефорс) |
|----------------------|---|---|--|----------------------------|----------------------------|
| Удлинение |  |  |  | 0.4618 | 0.0576 |
| Форм-фактор |  |  |  | 0.0031 | 0.0827 |
| Степень удлиненности |  |  |  | 0.4707 | 0.2577 |
| Степень окатанности |  |  |  | 0.014 | 0.0811 |

Заключение

В результате проделанной работы был создан алгоритм, который из исходного изображения шлифа вырезал входящие в него обломки и обрабатывал их: сглаживал, находил значения удлинения и форм-фактора. Затем была создана нечеткая система, которая рассчитывает степени окатанности и удлиненности. Данная система была протестирована на контрольной выборке из 10 образцов. Далее было проведено статистическое исследование, которое показало, что все входные и выходные параметры распределены по логнормальному закону, что было подтверждено гистограммами, статистическими критериями и вероятностной бумагой.

Дальнейшие исследования позволят найти вероятность попадания в одну из 9 перечисленных групп с учетом нечеткости границ между группами.

Литература

1. *Пустовалов Л.В.* Петрография осадочных пород. Ч. 1. М.–Л.: Гостоптехиздат, 1940. 475 с.
2. *Кузнецов В.Г.* Литология. Осадочные горные породы и их изучение: Учеб. пособие для вузов. М.: ООО «Недра–Бизнесцентр», 2007. 511 с.
3. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
4. *Леоненков А.В.* Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ–Петербург, 2003. 736 с.
5. *Миннихметов И.Р., Пергамент А.Х.* Разработка методов классификации типов пород и автоматического выделения литотипов для карбонатных коллекторов по совокупности определяющих параметров // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика. 2014. Вып. 1(9). 9 с. http://oilgasjournal.ru/vol_9/pergament.pdf (Дата обращения 26.09.2019).
6. *Семенов В.* Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие. СПб.: Питер, 2013. 192 с.
7. *Lilliefors H.W.* On the Kolmogorov–Smirnov test for normality with mean and variance unknown // Journal of the American Statistical Association. 1967. Vol. 62. P. 399–402. <https://doi.org/10.1080/01621459.1967.10482916>
8. *Massey F.J.* The Kolmogorov–Smirnov test for goodness of fit // Journal of the American Statistical Association. 1951. Vol. 46, No. 253. P. 68–78. <https://doi.org/10.1080/01621459.1951.10500769>

Automated analysis of the microtexture structure of sandstone thin section

V.M. Sinitsyna

Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow

E-mail: v-sin@yandex.ru

Abstract. The paper considers a new method developed by the author for classification of the clastic grains of the thin section by the form of the chips of sedimentary rocks. The form of the chips is qualified by two characteristics: by the size of their fragments (width, height) and the degree of their roundness. The method is based on fuzzy logic. Firstly, the images of the chips of the section are smoothed. Next, the fuzzy system divides the clastic grains to several groups, calculating the degree of their roundness and their elongation. Statistical analysis has shown that all parameters can be considered to be distributed according to the lognormal law.

Keywords: clastic grains, degree of roundness, degree of elongation, fuzzy logic, fuzzy system, lognormal distribution.

Citation: Sinitsyna V.M. Automated analysis of the microtexture structure of sandstone thin section // Actual Problems of Oil and Gas. 2019. Iss. 3(26). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-26.art10> (In Russ.).

References

1. *Pustovalov L.V.*, Petrography of sedimentary rocks. Part 1, Moscow–Leningrad: Gostoptekhizdat, 1940. 475 p. (In Russ.).
2. *Kuznetsov V.G.* Lithology. Sedimentary rocks and their study: Textbook manual for universities. Moscow: Nedra–Biznestsentr, 2007. 511 p. (In Russ.).
3. *Gonzalez R., Woods R.* Digital image processing. Moscow: Tekhnosfera, 2005. 1072 p. (In Russ.).
4. *Leonenkov A.V.* Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH. St. Petersburg: BHV–Petersburg, 2003. 736 p. (In Russ.).
5. *Minniakhmetov I., Parchment A.* Development of methods for classifying types and automatic emissions for carbonate reservoirs based on the totality of determining parameters. // Georesources, Geonegetics, Geopolitics. 2014. Iss. 1(9). 9 p. http://oilgasjournal.ru/vol_9/pergament.pdf (Accessed on 26.09.2019). (In Russ.).
6. *Semenov V.* Probability theory and mathematical statistics: Textbook manual. St. Petersburg: Piter, 2019. 192 p. (In Russ.).

7. *Lilliefors H.W.* On the Kolmogorov–Smirnov test for normality with mean and variance unknown // Journal of the American Statistical Association. 1967. Vol. 62. P. 399–402. <https://doi.org/10.1080/01621459.1967.10482916>

8. *Massey F.J.* The Kolmogorov–Smirnov test for goodness of fit // Journal of the American Statistical Association. 1951. Vol. 46, No. 253. P. 68–78. <https://doi.org/10.1080/01621459.1951.10500769>