

И. С. Ухов**Новая методика определения окатанности песчаных кварцевых зерен**

В данной статье рассмотрены основные проблемы, касающиеся определения окатанности песчаных зерен. Проанализированы различные подходы, ранее применявшиеся к определению и вычислению данного параметра. На основе проведенного анализа выявлена и обоснована необходимость новой методики по вычислению окатанности.

Ключевые слова: окатанность, сферичность, округленность, угловатость, кварцевое зерно, палеогеография, седиментация.

I. S. Ukhov**A new technique to define roundness of sandy quartz grains**

This article examines the main issues relating to the definition of roundness of sand grains. Different approaches, previously applied to the determination and calculation of this parameter, are analyzed. Basing on the conducted analysis, the necessity of a new method of roundness calculating is also revealed.

Keywords: roundness, sphericity, rotundity, angularity, a quartz grain, paleogeography, sedimentation.

Словарные и монографические определения термина «окатанность» очень различны. Тем не менее, в геологии постоянно приходится пользоваться при описании осадочного вещества понятием «окатанность» [9, с. 522]. Форма и окатанность зерен осадка являются очень важным коллекторским и палеогеографическим фактором [5, с. 147; 7, с. 219].

Впервые попытка количественной характеристики формы обломочных частиц была произведена У. Мэкки в 1833 г. [7, с.22] Оценка формы выполнялась по трехбалльной шкале, в которой округлые частицы характеризовались баллом 1, полуугловатые – 2 и угловатые – 3.

Первым, кто разграничил понятия о первоначальной форме зерен и степени их округленности, был Г. Уодделл [7, с.22]. Он предложил использовать два коэффициента – сферичность (степень приближения формы частиц к шару) и округленность (степени сглаженности углов на поверхности зерна). Коэффициент округленности определяется как частное среднего значения радиуса дуг, вписанных в углы проекции зерна и радиуса максимальной вписанной окружности. Сферичность определяется частным радиусов максимально вписанной и минимально вписанной окружностей.

Несмотря на свою сложность, данная методика до сих пор применяется зарубежными исследователями для решения литологических задач [10, 11].

Для визуальной оценки степени окатанности Р. Рассел и Р. Тейлор предложили пятибалльную шкалу. Обломкам с совершенно несглаженными ребрами присваивается балл 0, со следами сглаживания ребер – 1, со сглаженными углами – 2, хорошо окатанным – 3, идеально окатанным – 4 [7, с. 223].

Для визуальной оценки окатанности У. Крамбейн предложил использовать эталоны силуэтов зерен, где окатанность измеряется в десятых долях. Он же отметил, что степень окатанности является функцией разности между окатанностью в любой точке поверхности зерна и неким значением предельной окатанности – показателем, в известной степени зависящим от материала и гидрогеологического режима обстановки осадконакопления [7, с.223]. Для ускорения и упрощения определения радиуса зерен У. Крамбейн предложил стандартные зарисовки формы обломков с известными значениями радиуса.

Более перспективным оказалось изучение формы зерен с помощью наклонных поверхностей. Первые опыты в этой области были проведены Д. Ламаром и И. А. Преображенским Они были основаны на измерении формы зерен по длине пробега на наклонной плоскости при разных углах наклона. Данный метод не нашел широкого применения на практике [9, с. 529].

Окатанность как функция всех геометрических свойств обломка зерна

Окатанность – степень сглаженности первоначальных ребер обломков осадочных горных пород или минералов при транспортировке или переотложении. Степень окатанности изменяется в зависимости от степени изометричности, угловатости и округленности [2, с. 553].

Классическое определение окатанности выглядит следующим образом:

$$O \sim (C, Y, L) [1, \text{Т. II, с. 28}].$$

Где: O – окатанность; C – изометричность формы зерна, степень, которой чаще всего определяется как:

$$\psi = (a+c)/2b,$$

где a , b и c соответственно максимальная, средняя и минимальная оси зерна [1, Т. I, с. 366]; Y – угловатость ($Y = \sum a/S$, где $\sum a$ – сумма всех ребер обломка, S – площадь обломка) [3, с. 444]; L – округленность – степень сглаженности первоначальных ребер ее оценивают либо визуально, либо путем измерений с вычислением коэффициента ($L = \sum r/Rn$, где r – радиусы закруглений на контуре частицы, R – радиус круга, вписанного в ее изображение, n – количество измеренных закруглений) [1, Т. 2, с. 30].

Окатанность как предел формы песчаного зерна

Окатанность можно рассматривать как предел формы песчаного зерна, стремящийся к наиболее равновесной и устойчивой фигуре.

Пределом формы песчинок, образующейся в результате их обработки при переносе, чаще всего является трехосный эллипсоид [4, с. 109]. Эллипсоидальная форма песчаных зерен является лишь пределом, к которому она стремится в результате истирания. Чем меньше песчинка окатанна, тем больше в ее форме чувствуется форма и угловатость первоначального материала; чем больше она окатывается, тем больше в ней чувствуется формула трехосного эллипсоида. В основном песчаные кварцевые зерна — это трехосные эллипсоиды. В среднем отношение длин трех осей составляет $a:b:c = 1.3:1.0:0.74$ [7, с. 14].

Исходя из всего вышесказанного, можно подразделить окатанность на морфологическую (как совокупность геометрических свойств) и динамическую (как свойство частицы, стремящейся к наиболее устойчивой форме). И если с вычислением морфологической окатанности вопрос более или менее ясен, то с вычислением динамической не так все просто.

Методика вычисления показателя окатанности

В идеале надо определять окатанность частицы как трехмерного объекта (эллипсоид), но для простоты, а, следовательно, и экономии времени можно воспользоваться двухмерной моделью (эллипс). Прежде всего, требуется получить достаточное количество изображений кварцевых зерен (микрофотография или USB-микроскоп). Обработка полученных изображений проводится в программе CorelDraw с помощью подключенного плагина PlotCalc – выбирается кварцевое, над которым проводятся следующие действия [Рис. 1]:

- 1) Вычисление площади самой частицы – S .
- 2) Вычисление Площади вписанного эллипса (вписанный эллипс должен занимать максимально возможную площадь внутри исследуемого зерна) – $S_{\text{вп.элл.}}$.
- 3) Вычисление площади описанного эллипса (описанный эллипс должен занимать минимально возможную площадь вокруг исследуемого зерна) – $S_{\text{опис.элл.}}$.

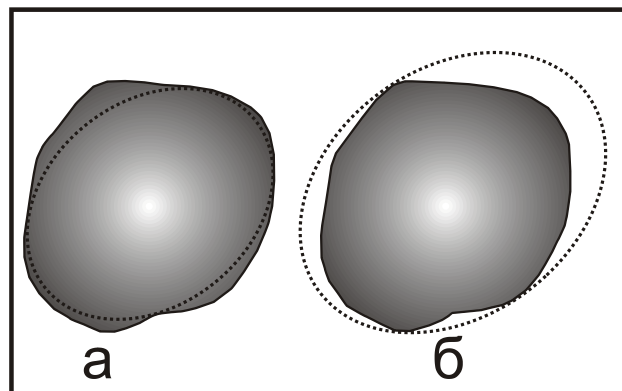


Рис.1. Схема вычисления коэффициента окатанности кварцевого зерна.

Для вычисления самой окатанности предлагается следующая формула:

$$O = \frac{S^2_{\text{впис. элл.}}}{S_{\text{опис. элл.}} \times S_{\text{част.}}} \times 100\% \quad (1)$$

Поскольку величины окатанности частиц составляют ряд непрерывно меняющихся величин, нужна градационная шкала.

Естественная шкала должна быть логарифмической, поскольку различия на несколько процентов, весьма значительны, когда речь идет о неокатанных или плохо окатанных песчаных зернах, мало существенных для хорошо окатанных частиц.

Лабораторные исследования показали, что окатанность осадка зависит от исходного размера материала: гравийные зерна истираются и окатываются довольно быстро, тогда как окатывание

частиц происходит чрезвычайно медленно, даже в одном гранулометрическом классе быстрее окатываются наиболее крупные частицы [8, с. 79].

Ввиду вышесказанного предлагается следующая формула:

$$\Omega = \log_{2.15} O, (2),$$

где O – окатанность зерен в процентах, полученная с помощью формулы (1). В итоге получается пять классов окатанности, основные особенности которых рассматриваются ниже [Табл.1].

Предлагаемая методика вычисления окатанности не учитывает мелкие детали строения поверхности частицы, следовательно, происходит частичная потеря информации об энергетике среды осадконакопления. Как говорилось ранее, частицы во время переноса стремятся приобрести наиболее равновесную форму – трехосного эллипсоида или же, если рассматривать двумерную модель, эллипса с соотношением осей

$a:b=1.3:1.0$ (такой эллипс в дальнейшем будет именоваться правильным) [4, с. 109; 7, с. 14]. Так как нами рассматриваемые частицы редко имеющую столь совершенную окатанность, но стремящиеся приобрести подобную, логичным будет введение поправочного коэффициента – коэффициент эллипсоидальности. Коэффициент высчитывается как частное двух показателей, где первый показатель равен отношению квадрата периметра эллипса идеально окатанной частицы ($a:b=1.3:1.0$) к его площади (он равен 12.86), а второй представляет собой отношение квадрата периметра частицы к ее площади. Далее значение окатанности умножается на поправочный коэффициент, полученная величина, по мнению автора, является наиболее точной оценкой окатанности кварцевой частицы.

Таблица 1. Основные особенности классов окатанности, полученных при помощи новой методики.

№ класса Ω	Значение окатанн. в %	Общий характер очертаний контура зерен	Углы в очертаниях контура зерна	Линии контура зерна	Название группы зерен по абрису
1	0–4.6	Контур зерна составлен преимущественно ломаными линиями.	Практически все углы имеют явную, четко очерченную вершину.	Контур зерна весь очерчен резкими кривыми линиями.	Резко угловатые зерна
2	4.6-9.9	Большая часть контура имеет угловатые очертания.	Многие углы обладают явственно очерченными вершинами.	Контур зерна почти целиком очерчен резкими изгибами.	Угловатые зерна
3	9.9-21.4	Очертания сглажены. Угловатые участки очень хорошо.	Вершины углов, более или менее округлены,	Прямые и почти прямые линии преобладают над плавными кривыми.	Полуугловатые зерна
4	21.4-45.9	Очертания контура смягченные, но несколько угловатые.	Преобладают тупые углы, они значительно округлены.	Преобладают плавные кривые линии, большей частью слабо выпуклые.	Полукруглые зерна
5	45.9-100.0	Общие очертания зерна плавные, мягкие.	Изредка встречаются вершины углов, которые сильно сглаженные.	Все линии плавные. Форма очень близка к правильному эллипсу.	Округлые зерна

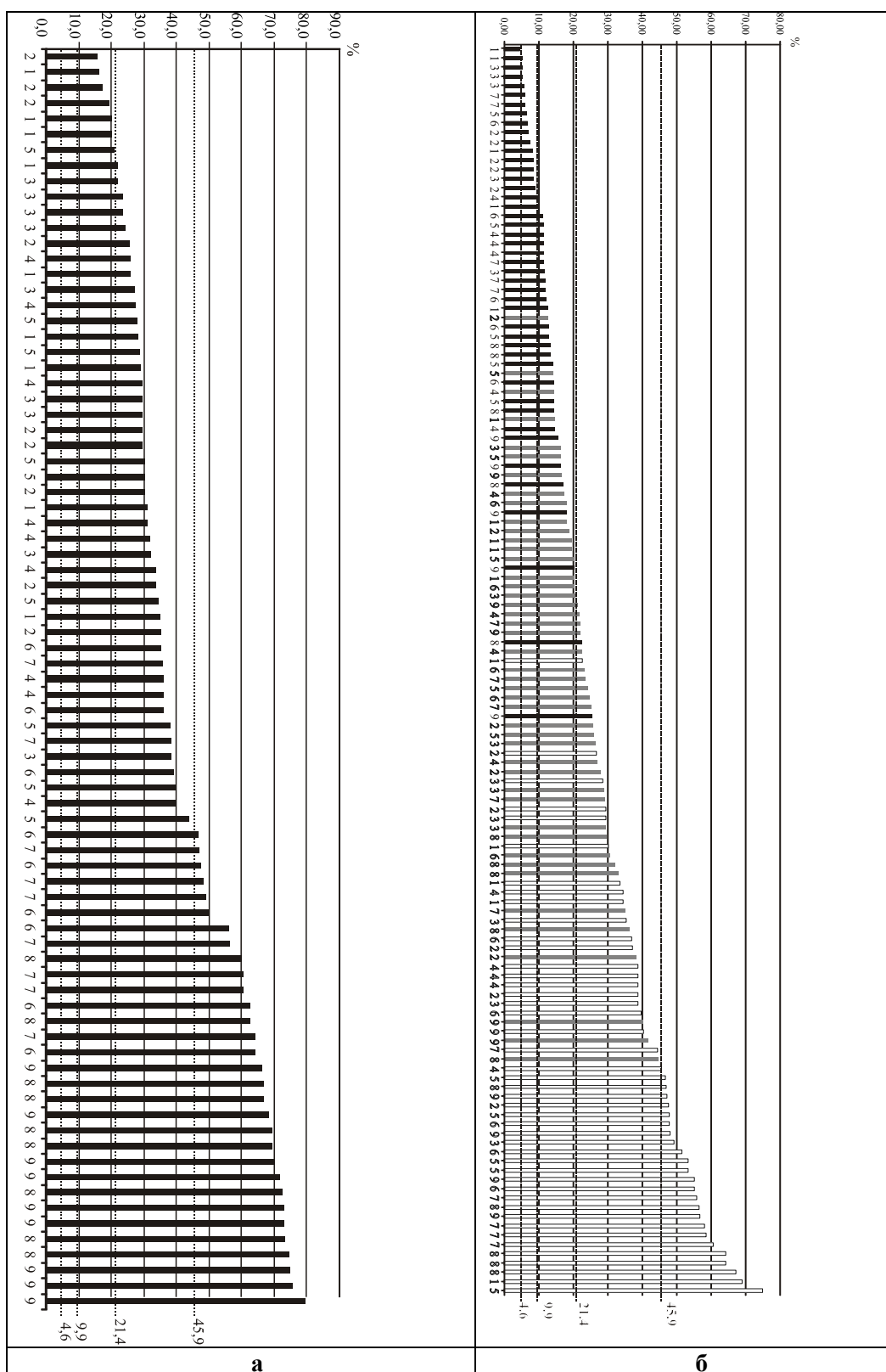


Рис.2. Распределение значений окатанности частиц, вычисленных с помощью новой методики по трафарету, предложенному: а) У. Крумбейном. [6, с. 99]. б) Д Риттенхаузом [6, с. 99].

Цифрами обозначены классы окатанности (Крумбейн) и сферичности (Риттенхауз) по автору. Пунктиром отмечены границы классов окатанности, по предлагаемой методике. Для диаграммы, отображающей распределение значений сферичности частиц, вычисленных с помощью новой методики по трафарету, предложенному Д. Риттенхаузом, обозначения следующие: черным цветом закрашены столбцы, означающие частицы со значением сферичности от 0.45–0.61, серым от 0.63–0.79, белым с черной обводкой 0.81–0.97 (по автору).

На Рис. 2 отчетливо видно, что песчаные зерна причисляемые авторами к одному и тому же классу окатанности на самом деле имеют разную степень обработки, различаясь порой в пределах одного класса на порядок значений. Наилучшая картина распределения значений окатанности в пределах одного класса характерна для классификации Крумбейна, в среднем размах значений (Y) для одного класса, выделяемого автором, составляет 22 % (14–31 %), при среднем стандартном отклонении (σ_{cp}) для всей группировки трафаретов равном 7.5 (4.2–11.5). Для группировки трафаретов предлагаемых Риттенхаузом $Y_{cp}=19\%$ (колеблется в пределах от 5 до 55 %), $\sigma_{cp}=7.8$ (1.9–21.3).

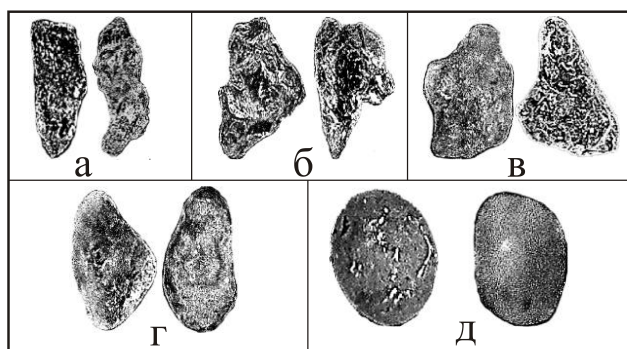


Рис.3 Классификация окатанности кварцевых зерен, полученная по новой методике.

(Образец псаммита взят в Крестовском разрезе Ярославской области из меловой системы, валанжинского яруса, верхнего подъяруса, зона *Prodichotomites ivanovi*, увеличение $\times 20$).

а) резко угловатые зерна; б) угловатые зерна; в) полуугловатые зерна; г) полуокруглые зерна; д) округлые зерна.

Выводы.

- Общим недостатком методов визуальной оценки окатанности является низкая воспроизводимость результатов, определяемая субъективностью восприятия формы одних и тех же зерен не только у разных наблюдателей, но даже у одного и того же.

- Предлагаемые ранее методы определения окатанности не отличаются особой точностью, либо связаны с трудоемкими вычислениями (методика Уоделла). Чаще всего предлагаемые методы основываются на методе сравнения зерен с определенными трафаретами. Подобный подход не обеспечивает достаточной точности и достоверности информации.

- Метод трафаретов не отличается достаточной достоверностью, так как зерна, визуально относимые автором к одному и тому же классу окатанности или имеющие равные значения сферичности, отличаются друг от друга и порой значительно (до десятков %).

- Большинство ранее предлагаемых методов также не учитывали характер строения кристаллической решетки кварцевых зерен. Считалось, что формой, к которой стремится кварцевое зерно, является шар, хотя на самом деле этой формой является трехосный эллипсоид.

- Предлагаемая методика полностью исключает субъективность восприятия наблюдателем, так как большая часть действий автоматизирована.

- Наиболее точное (до сотых долей процента) вычисление показателя окатанности.

- Новая методика позволяет получить качественную числовую информацию об окатанности зерен, которую можно обработать статистическими методами.

Библиографический список.

1. Геологический словарь в двух томах [Текст]. – М. : изд-во Недра, 1978. – С. 446 – 486.
2. Горная энциклопедия [Текст]. Т. 5. – М. : Советская энциклопедия, 1987. – С. 592.
3. Петрографический словарь [Текст]. – М. : изд-во Недра, 1981. – С. 496.
4. Билибин, Ю. А. Основы геологии россыпей [Текст] / Ю. А. Билибин. – М. : изд-во АН СССР, 1955 – С. 468.
5. Градзьинский, Р. Седиментология [Текст] / Р. Градзьинский. – М. : изд-во Недра, 1980. – С. 646.
6. Гриффитс, Дж. Научные методы исследования осадочных пород [Текст] / Дж. Гриффитс. – М. : изд-во Мир, 1971. – С. 411.
7. Гроссгейм, В. А. Методы палеогеографических реконструкций [Текст] / В. А. Гроссгейм. – М. изд-во Недра, 1984. – С. 272.
8. Петтиджон, Ф. Дж. Осадочные породы [Текст] / Ф. Дж. Петтиджон. – М. : изд-во Недра, 1981. – С. 751.
9. Рухин, Л. Б. Основы литологии. Учение об осадочных породах [Текст]: Л. Б. Рухин. – 3-е изд. – Л. : изд-во Недра, 1969. – С. 703

10. Alvin John Lim Meng Siang and others «The Integration of the Morphological Aspects of Sand to It's Shear Strength and Dilatancy Characteristics» – International Journal of Integrated Engineering, Vol. 4 No. 2, P. 77-87.

11. Gye-Chun Cho and others « Particle Shape Effects on Packing Density, Stiffness, and Strength Natural and Crushed Sands» – Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, May 2006, P. 591–602.

Bibliograficheskij spisok.

1. Geologicheskij slovar' v dvuh tomah [Tekst]. – M. : izd-vo Nedra, 1978. – S. 446 – 486.

2. Gornaja jenciklopedija [Tekst]. T. 5. – M. : Sovetskaja jenciklopedija, 1987. – S. 592.

3. Petrograficheskij slovar' [Tekst]. – M. : izd-vo Nedra, 1981. – S. 496.

4. Bilibin, Ju. A. Osnovy geologii rossypej [Tekst] / Ju. A. Bilibin. – M. : izd-vo AN SSSR, 1955 – S. 468.

5. Grad'zinskij, R. Sedimentologija [Tekst] / R. Grad'zinskij. – M. : izd-vo Nedra, 1980. – S. 646.

6. Griffiths, Dzh. Nauchnye metody issledovanija osadochnyh porod [Tekst] / Dzh. Griffiths. – M. : izd-vo Mir, 1971. – S. 411.

7. Grossgejm, V. A. Metody paleogeograficheskikh rekonstrukcij [Tekst] / V. A. Grossgejm. – M. izd-vo Nedra, 1984. – S. 272.

8. Pettidzhon, F. Dzh. Osadochnye porody [Tekst] / F. Dzh. Pettidzhon. – M. : izd-vo Nedra, 1981. – S. 751.

9. Ruhin, L. B. Osnovy litologii. Uchenie ob osadochnyh porodah [Tekst]: L. B. Ruhin. – 3-e izd. – L. : izd-vo Nedra, 1969. – S. 703.

10. Alvin John Lim Meng Siang and others «The Integration of the Morphological Aspects of Sand to It's Shear Strength and Dilatancy Characteristics» – International Journal of Integrated Engineering, Vol. 4 No. 2, R. 77-87.

11. Gye-Chun Cho and others « Particle Shape Effects on Packing Density, Stiffness, and Strength Natural and Crushed Sands» – Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, May 2006, R. 591-602.