

УДК 551

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ОКАТАННОСТИ ЗЕРЕН ОБЛОМОЧНОГО ЦИРКОНА: ПРИМЕР ОСАДОЧНЫХ ТОЛЩ КИММЕРИД ГОРНОГО КРЫМА

© 2024 г. Т. В. Романюк<sup>а, \*</sup>, П. Д. Котлер<sup>б, с, \*\*</sup>

<sup>а</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,  
ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Москва, 123242 Россия

<sup>б</sup> Казанский федеральный университет, ул. Кремлевская, 18, Казань, 420111 Россия

<sup>с</sup> Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,  
просп. Акад. Коптюга, 3, Новосибирск, 630090 Россия

\* e-mail: t.romanyuk@mail.ru

\*\* e-mail: pkotler@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.09.2023 г.

После доработки 23.11.2023 г.

Принята к публикации 28.12.2023 г.

В работе представлена методика оценки степени окатанности зерен детритового циркона по пятибальной шкале согласно степени сохранности вершин, ребер и граней кристаллов. По результатам степени окатанности отдельных зерен рассчитывается интегральный индекс для наборов зерен из различных стратиграфических подразделений. Получаемые данные позволяют определить долю зерен разного класса окатанности в различных толщах, оценить степень сходства/различия наборов зерен, что может служить дополнительным критерием при расчленении осадочных разрезов. Предлагаемая методика применена для сопоставления характеристик окатанности обломочного циркона из некоторых осадочных толщ киммерид Горного Крыма. Показано, что для песчаников ченкской толщи относительно песчаников флишевых толщ характерна более высокая доля неокатанных и слабоокатанных зерен циркона и практически отсутствие полностью окатанных зерен. Величины интегрального индекса окатанности  $SO_{\text{выб}}$  для зерен циркона из песчаников толщ таврической серии показали значения 3.41 и 3.95, а для ченкской толщи – 2.55. Таким образом, зафиксировано существенное различие  $SO_{\text{выб}}$  между исследуемыми толщами, что также подтверждается значениями взаимных парных коэффициентов  $p$ , рассчитанных с помощью теста Колмогорова–Смирнова.

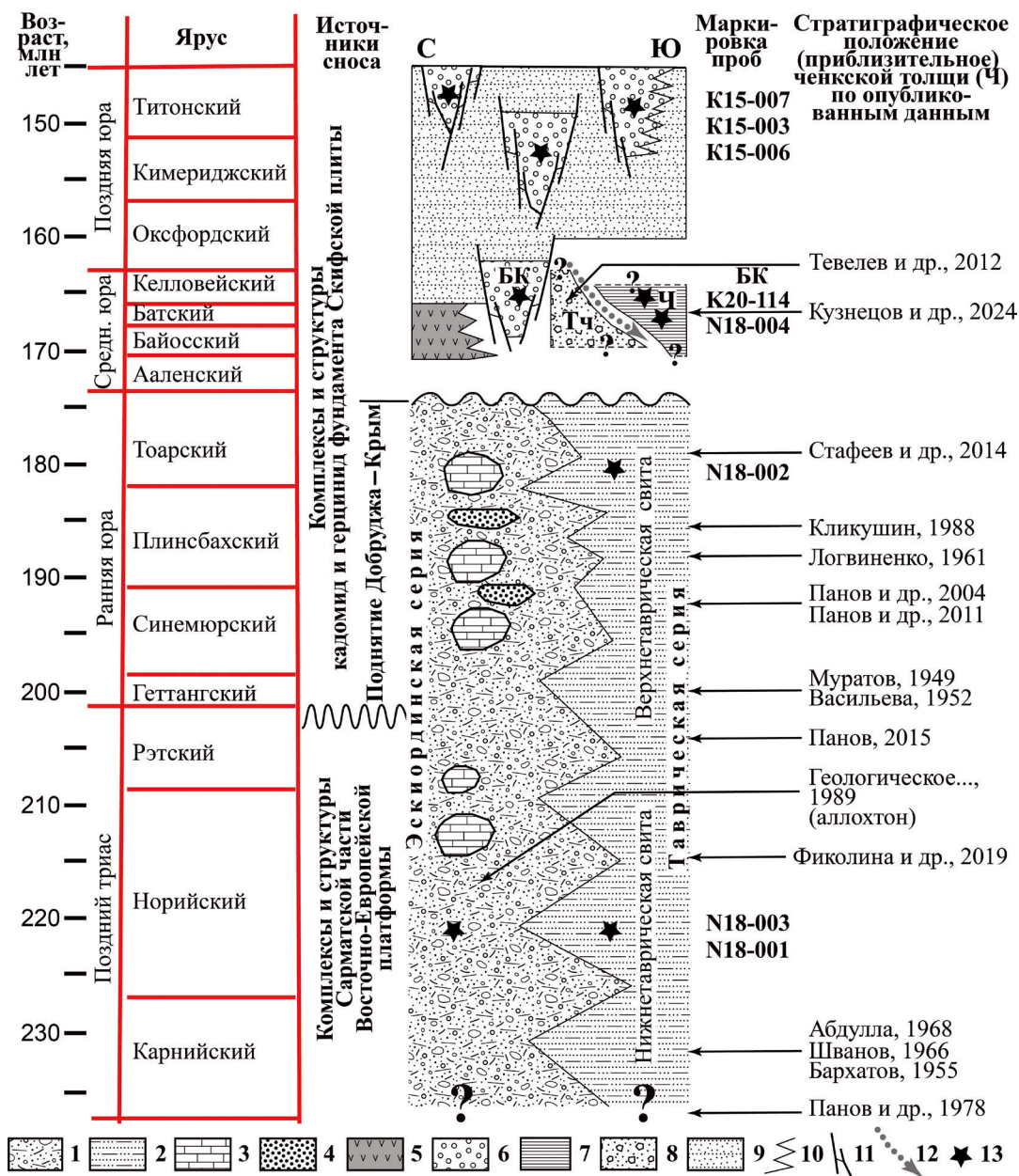
**Ключевые слова:** зерна обломочного циркона, окатанность, интегральный индекс окатанности, киммериды Горного Крыма, ченкская толща

**DOI:** 10.31857/S0024497X24030041, **EDN:** xvyicw

В пределах областей развития верхнетриасово-среднеюрских образований киммерийского комплекса Горного Крыма на локальных участках выделяют ченкскую толщу (в некоторых работах в ранге свиты) [Панов и др., 1978; 2011, Геологическое ..., 1989; Тевелев и др., 2012; Стафеев и др., 2014 и ссылки там]. Ченкская толща – фактически фаунистически немая. Поэтому, несмотря на длительную историю ее изучения (см. обзор в работе [Кузнецов и др., 2024]), в понимании стратиграфического положения ченкской толщи консенсус отсутствует, и в разных публикациях оценки ее возраста варьируют от среднего триаса до средней юры (рис. 1). Важность получения любой новой информации по этой толще

с применением современных методов и технологий трудно переоценить.

В последнее десятилетие в арсенал методов, применяемых при геологических исследованиях, все шире входит метод массового U–Pb-изотопного датирования зерен циркона из обломочных пород. Этот метод позволяет получить ранее фактически недоступную информацию о возрасте кристаллических комплексов, которые служили источниками изученных зерен обломочного циркона. Сопоставление наборов значений возрастов зерен обломочного циркона из разновозрастных отложений в одном районе позволяет проследить для этого района эволюцию



**Рис. 1.** Концептуальная упрощенная, обобщенная стратиграфическая схема триасово-юрских флишевых и юрских грубообломочных толщ Горного Крыма – по [Кузнецов и др., 2024]. Выделение нижнетаврической и верхнетаврической свит в таврической серии – по [Панов и др., 2011; Стафеев и др., 2014]. Стратиграфическая шкала – по [International ..., 2020].

Ч – ченкская толща, БК – битакские конгломераты, Тч – темир-чаирская толща. Справа от разреза стрелками и надписями показаны имеющиеся в литературе примерные оценки стратиграфического положения ченкской толщи.

1 – эскиординская серия; 2 – таврическая серия; 3, 4 – блоки (пластовые отторженцы), олистолиты и олистоплаки в олистостромах эскиординской серии: 3 – каменноугольные, пермские и триасовые известняки; 4 – триасовые(?) и юрские песчаники; 5 – вулканогенные и туфогенные образования района мыса Фиолент, Трудолубовка (бодракская свита), пос. Форос, горного массива Карадаг (карадакская серия); 6 – песчаные и грубокластические (конгломератовые) аллювиальные, дельтовые и мелководно-морские отложения, местами с прослоями углей, сформированные в небольших тектонически ограниченных пулл-апарт суб-бассейнах и в дельтах гильбертова типа; 7 – ченкская толща; 8 – темир-чаирская толща; 9 – нерасчлененные образования шельфа, мелководных бассейнов и прибрежных зон; 10 – фациальные переходы; 11 – тектонические ограничения суб-бассейнов; 12 – поверхность тектоногравитационного надвига в основании ченкского тектоногравитационного покрова; 13 – приблизительная стратиграфическая привязка проб на U–Pb датирование обломочного циркона, номер пробы указан в колонке “Маркировка проб”.

питающих провинций во времени. В некоторых случаях изучение обломочного циркона может помочь уточнить стратиграфическую принадлежность толщ, не охарактеризованных палеонтологическими остатками, быть использовано для региональных и межрегиональных стратиграфических корреляций и др. [Gehrels, 2000, 2014; Davis et al., 2003; Dickinson, Gehrels, 2009; Cawood, 2012].

К настоящему времени некоторые стратиграфические образования Горного Крыма уже охарактеризованы результатами изучения обломочного циркона. Так, в работе [Nikishin et al., 2015] представлены суммарные результаты U–Pb-датирования зерен обломочного циркона из набора проб песчаников, попадающих в стратиграфический интервал от средней юры до неогена, в работах [Никишин и др., 2016; Рудько и др., 2018, 2019; Kuznetsov et al., 2019; Романюк и др., 2020] – из песчаников средне- и верхнеюрских грубообломочных (конгломератовых) толщ, в работах [Никишин и др., 2020; Кузнецов и др., 2022a] – из песчаников таврической и эскиординской серий, в работе [Кузнецов и др., 2024] – из песчаников ченкской толщи.

Сопоставление результатов U–Pb-изотопного датирования зерен обломочного циркона из толщ разного возраста и литологического облика, принимающих участие в строении киммерийского комплекса Горного Крыма, показало их существенное различие [Кузнецов и др., 2024]. Вместе с другими геологическими данными это свидетельствует о том, что питающие провинции ченкской толщи и верхнетриасовых и нижнеюрских флишевых толщ таврической и эскиординской серий существенно различны.

При подготовке к U–Pb-датированию (при выборе областей в зернах без дефектов, чужеродных включений и др.) для каждого зерна циркона были получены и проанализированы серии микрофотографий. Они включали микрофотографии зерна, сделанные с помощью оптического микроскопа в отраженном свете, а также в проходящем поляризованном и неполяризованном свете с разной глубиной фокусировки (от полированной поверхности вглубь до внешних границ зерна). Кроме того, использовались изображения зерна, полученные с помощью электронного микроскопа в режимах рассеянных и отраженных электронов, а также в катодных лучах (катодолюминесцентные изображения).

Накопленная база данных изображений зерен циркона из разных толщ Горного Крыма фиксирует существенное различие наборов зерен не только по U–Pb-возрастам, но также по другим характеристикам зерен – цвету, прозрачности, морфологическим особенностям, наличию/отсутствию и/или количеству инородных включений. Также в наборах зерен заметно варьируют пропорции зерен разной степени окатанности. Чаще всего общее количество выделенных из пробы песчаника зерен обломочного циркона, для которых получены серии оптических и электронных микрофотографий, существенно (иногдакратно) больше, чем количество зерен, которое может быть датировано дорогостоящим U–Pb-изотопным методом исследования. И таким образом, значительное количество визуальной информации о зернах циркона остается не использованной. Так, например, для песчаников ченкской толщи в совокупности получено и проанализировано более 410 зерен циркона (соответственно, 410 серий микрофотографий), а в конечной содержательной интерпретации использовано только 156 U–Pb-датировок.

При изучении зерен циркона из песчаников ченкской толщи нельзя было не заметить бросающуюся в глаза особенность – необычно высокую долю практически неокатанных зерен. Предпринятая попытка найти в литературе методику, позволяющую количественно оценивать степень окатанности как единичных зерен обломочного циркона, так и их выборки, не дала результата. В настоящей статье описана предлагаемая авторами методика, позволяющая оценивать степень окатанности единичных зерен циркона. На этой основе далее можно получать количественные характеристики для произвольной выборки: (i) определять в выборке циркона долю зерен разного класса окатанности, (ii) с помощью стандартных статистических методов количественно оценивать степень сходства/различия выборок и (iii) рассчитать интегральный индекс окатанности выборки –  $SO_{\text{выб}}$ . Эти количественные характеристики позволяют графически сравнивать выборки и ранжировать их по  $SO_{\text{выб}}$ .

С помощью предложенной методики выполнено сопоставление характеристик окатанности обломочного циркона из киммерид Горного Крыма: ченкской толщи (2 выборки), верхнетриасовых-нижнеюрских флишевых толщ (3 выборки) и верхнеюрских грубообломочных толщ (конгломератов) (3 выборки).

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОКАТАННОСТИ ЕДИНИЧНОГО ЗЕРНА ЦИРКОНА

Термин “окатанность” в работе [Горная ..., 1987, стр. 553] определен следующим образом – “Окатанность – степень сглаженности первоначальных ребер обломков осадочных (обломочных) горных пород или минералов вследствие их обламывания, истирания и вообще разрушения при транспорте или переотложении, главным образом, текучими (реками) и волнующимися водами (озерами, морями в береговой зоне), ледниками или ветром, а также при гравитационном оползании, обваливании или осыпании”.

Первые работы литологической направленности, в которых были предприняты попытки определить окатанность отдельных обломков/галек/зерен, количественно ее описать и использовать эту характеристику при изучении осадочных пород, по-видимому, появились в 1930–1940 гг. [Wadell, 1932, 1933; Хабаков, 1933, 1946; Russell, Taylor, 1937; Krumbein, 1941; Кухаренко, 1947 и др.]. В 1950–1980 гг. термин “окатанность” уже прочно вошел в справочники, атласы и учебники [Pettijohn, 1957; Атлас ..., 1962; Рухин, 1969; Fisher, Bridgland, 1986], а использование количественных показателей окатанности обломков в комплексе с другими характеристиками при изучении осадочных пород геологи стали широко применять в практике своих исследований. Появились версии классификаций окатанности обломочных зерен отдельных минералов, например зерен кварца [Griffiths, Currey, 1955].

Для оценки окатанности отдельных обломков/зерен, как правило, используют шкалу с подразделением на 5 классов. Например, в работе [Атлас ..., 1962] классы обломков определены как: 0 – угловатые, 1 – почти угловатые, 2 – почти окатанные, 3 – окатанные, 4 – хорошо окатанные. Классификация проводится путем визуальной оценки формы обломков/минералов, иногда с помощью палеток/трафаретов [Рухин, 1969]. В практике количественных оценок окатанности обломочного материала эту пятибалльную шкалу иногда несущественно модифицируют за счет небольших вариаций в числе классов (например, увеличении их до 6), определении признаков классов и их названий [Powers, 1953; Beat, Shepard, 1956; Crofts, 1974; Benn, Ballantyne, 1993; Blott, Pye, 2008].

За основу предлагаемой нами шкалы для оценки окатанности отдельного зерна циркона принята пятибалльная шкала. Главным отличительным признаком неокатанного обломка/

зерна в обычной шкале является наличие несглаженного ребра. В обломочных породах у отдельных обломков и зерен не твердых минералов фактически никогда нельзя наблюдать вершины.

Большая часть кристаллов циркона сгенерирована в магматических процессах во время кристаллизации кремнекислых пород и пород среднего состава. В этом процессе происходит формирование правильных кристаллов циркона, в которых можно отчетливо идентифицировать не только грани и ребра, но и вершины. Циркон имеет высокую твердость (~7.5 по шкале Мооса), устойчив к окатыванию, поэтому не только в магматических, но и в осадочных породах довольно часто можно найти зерна с хорошо сохранными выраженными вершинами.

В процессе окатывания сначала происходит сглаживание вершин кристаллов, потом ребер и только потом граней. Поэтому в предлагаемой нами шкале оценки степени окатанности отдельного зерна циркона, сохранность вершин – это признак принадлежности зерна к самому низкому 1 классу, сохранность фрагментов ребер – ко 2 классу, а наличие уплощенных поверхностей (реликтов граней кристалла) – к 3 классу. Наличие в неокатанных зернах циркона вершин – это главное отличие предлагаемой шкалы окатанности для зерен циркона от обычной шкалы окатанности для произвольных обломков в которой для принадлежности обломка к самому низкому классу, достаточно сохранности ребер. К 5 классу предлагается относить полностью окатанные зерна шарообразной формы, к 4 классу – зерна, имеющие промежуточную форму между полностью окатанной шарообразной (5 класс) и кристаллами с сохранными гранями (3 класс). То есть в зернах, относимых к 4 классу, сохранены реликты исходного габитуса, но нет выраженных плоских граней. Сводка признаков и примеры изображений зерна циркона каждого класса приведены на рис. 2.

По набору признаков для каждого зерна циркона определяется класс окатанности I, который может варьировать от 1 до 5. Для неокатанного кристалла  $I = 1$ , для наиболее частого случая среднеокатанного кристалла  $I = 3$ , для полностью окатанного зерна фактически сферической формы  $I = 5$ .

Пробные попытки выполнить классификацию отдельных зерен циркона по степени окатанности показали, что, как правило, сложностей с отнесением их к классам 1 или 5 не возникает. Однако возникают затруднения с отнесением зерен циркона к классам 2, 3 или 4.

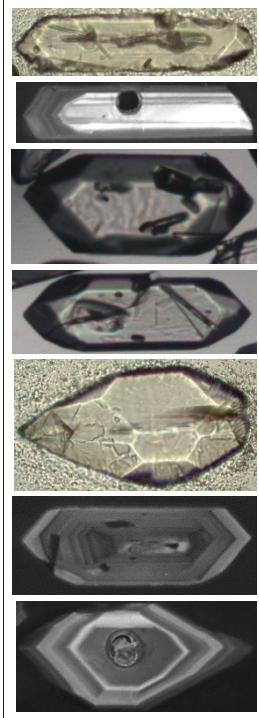
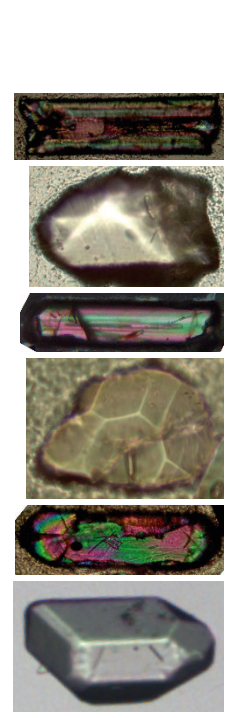
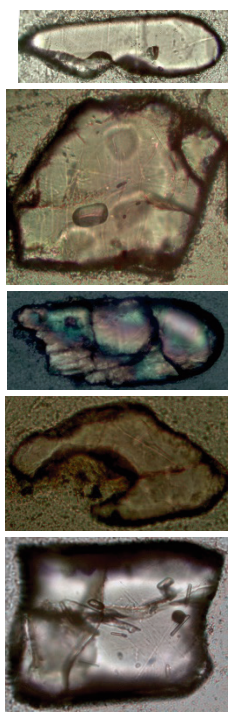
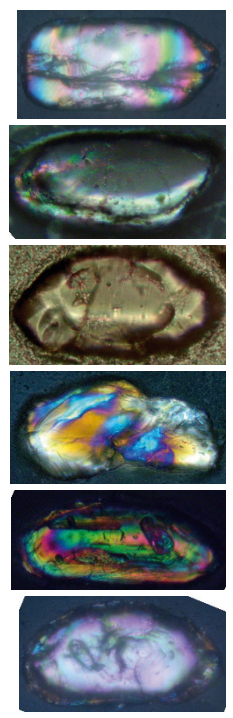
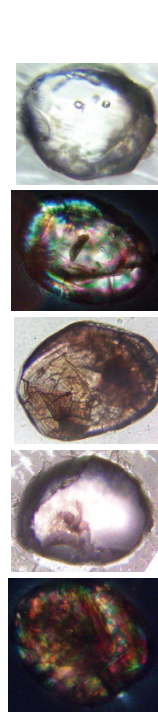
I Класс окатанности	$O_{cor}$ $O_{Zr} = I + O_{cor}$	VI	Признаки кристалла циркона данного класса окатанности	Примеры изображений
I = 1 Не окатанный (угловатый)	0 1	0.5	Отчетливо различаются острые вершины (хотя бы одна!) и ребра, а также грани кристалла. Почти полное соответствие внутренней структуры кристалла форме. Такие зерна редки в осадочных толщах, но обычны в магматических породах.	
I = 2 Слабо-окатанный	-0.5 ÷ 0.5 2 + $O_{cor}$	1	Вершины кристалла сглажены, но видны ребра и грани. В изначално правильных кристаллах можно различить реликты "краевых" пирамидок. Зерна с превышением одного размера над остальными более 3 (игольчатые кристаллы), следует относить к этому классу, даже, если ребра сильно сглажены.	
I = 3 Средне-окатанный	-0.5 ÷ 0.5 3 + $O_{cor}$	1	Вершины и ребра кристалла сильно сглажены, но просматриваются реликты граней кристалла в виде фрагментов уплощенных поверхностей. К этому классу приписываются все уплощенные и сложно классифицируемые зерна.	
I = 4 Сильно-(хорошо) окатанный	-0.5 ÷ 0.5 4 + $O_{cor}$	1	Округлая сглаженная форма зерна при сохранении удлиненной или усложненной формы; ни грани, ни тем более ребра или вершины не сохранились. На поверхности могут присутствовать дефекты. Превышение одного размера над остальными не более 2.5.	
I = 5 Полностью (идеально) окатанный	0 5	1.1	Практически сферическая форма без крупных дефектов, чаще всего дискордантная внутренней структуре зерна. Превышение одного размера над остальными не более 1.5.	

Рис. 2. Классификация зерна циркона по степени окатанности и количественное определение параметра  $O_{Zr}$ , характеризующего его окатанность. I – класс окатанности.  $O_{cor}$  – корректирующая поправка для классов 2, 3 и 4. VI – весовые коэффициенты для каждого класса, которые использованы в формуле расчета интегрального индекса окатанности для набора зерен –  $SO_{выб}$ .

Часто оказывается, что зерно по степени окатанности можно отнести к категориям, расположенным между классами. Поэтому в предлагаемой нами методике предусмотрена возможность (необязательная) применить уточняющую/корректирующую поправку  $Ocor$ , которая может составлять от  $-0.5$  до  $+0.5$  для классов 2, 3 и 4. Для классов 1 и 5 поправка не предусмотрена ( $Ocor = 0$ ). Окатанность каждого зерна  $Ozr$  определяется как сумма номера класса окатанности "I" и уточняющего коэффициента  $Ocor$ , показывающего меру отклонения окатанности характеризуемого зерна от типичной окатанности, присущей соответствующему классу:

$$Ozr = I + Ocor.$$

Если окатанность характеризуемого зерна не достигает соответствующего класса, то коэффициенту  $Ocor$  присваивается отрицательное значение, например,  $Ocor = -0.2$ . Если окатанность зерна выше типичной для данного класса, то – положительное значение, например,  $Ocor = +0.4$ . Если по своей окатанности зерно расположено между 3 и 4 классом, но ближе к классу 4, то нужно присвоить этому зерну класс 4 и отрицательную корректирующую поправку, например,  $Ocor = -0.3$ . В этом случае оценка окатанности этого зерна составит  $Ozr = 4 - 0.3 = 3.7$ .

При оценке степени окатанности следует учитывать только детали, непосредственно связанные с процессом генерации кристалла и его дальнейшего окатывания в природе. Свежие технические сколы, которые могут возникнуть при обработке пробы (дробление, шлифование и другие процедуры), игнорируются. Редко, но бывает так, что у зерна одна сторона выглядит менее окатанной, чем другая. Так случается, если в процессе эволюции уже сильно окатанное зерно было расколото, а новая граница еще не успела стать сглаженной. В этом случае зерно следует оценивать по максимально окатанным деталям.

Точность оценки степени окатанности каждого зерна критически зависит от качества и количества его изображений. Наличие серии оптических изображений с разной глубиной фокусировки позволяет точнее оценить степень сохранности вершин и ребер первичного кристалла, из которого образовано рассматриваемое зерно. Изображения, полученные с помощью электронного микроскопа, позволяют отличить поверхностные дефекты, трещины, инородные включения. Дополнительные катодолюминесцентные изображения улучшают понимание степени соответствия внутренней структуры кристалла и формы.

## АВТОМАТИЧЕСКАЯ КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ОКРУГЛОСТИ ЕДИНИЧНОГО ЗЕРНА ЦИРКОНА И ЕЕ СООТНОШЕНИЕ С ОКАТАННОСТЬЮ

В геологической практике накоплен большой опыт работ, в которых реализованы разнообразные технологии/методики количественных расчетов показателей, характеризующих различные параметры формы и/или особенностей внутренней структуры отдельных зерен/обломков из осадочных пород, таких как степень округленности/округлости, угловатости, зубчатости, коэффициент удлиненности, уплощенности и др. (см., например, обзор в работе [Маслов, 2005]). Из всех параметров, которые широко используют для характеристики формы зерен/обломков, параметр *округлость* интуитивно и, по существу, ближе всего к понятию окатанность.

В комплект к современным микроскопам, как правило, входят компьютерные программы, в которых реализованы возможности обработки изображений обломков/зерен в автоматическом или полуавтоматическом режиме, в том числе – вычисление ряда количественных показателей. В частности, в программе NIS-Elements Advanced Research (разработка Nikon Instruments Inc., Япония) по изображениям для единичных зерен реализовано вычисление таких параметров как "Округлость/Circularity", "Удлинение/Elongation", "Коэффициент формы/ShapeFactor", "Выпуклость/Roughness" и др.

Мы применили полуавтоматическое вычисление этих параметров для выборки из 128 зерен циркона, извлеченных из песчаников ченкской толщи. Получение микрофотографий проведено на микроскопе Nikon Eclipse LV100 NDA с моторизованным столиком и камерой Nikon DS-Ri2. Автоматическая обработка изображений в программе NIS-Elements Advanced Research проведена по микрофотографиям в проходящем свете. Затем различными техническими приемами, в том числе и "ручной" работой с каждым изображением, выполнено оконтуривание зерен, разделение соприкасающихся объектов, удаление дефектов шашки (пузыри, царапины) и другие правки. Далее в автоматическом режиме выполнен расчет следующих параметров (табл. 1, рис. 3):

1. *Округлость (Circularity)*, по формуле  $C = 4\pi S / P$  ( $S$  – площадь,  $P$  – периметр зерна).
2. *Удлинение (Elongation)*,  $E$  = максимальный диаметр Ферета/минимальный диаметр Ферета (по-русски длина/ширина).

**Таблица 1.** Сопоставление параметров зерен обломочного циркона из песчаников ченкской толщи, полученных с помощью визуальной оценки по изображениям (столбцы 2–4) и рассчитанных с помощью программы NIS-Elements Advanced Research (столбцы 5–10)

Номер зерна	Класс окаганности I	<i>Ocor</i>	<i>Ozr</i>	Номер, присвоенный зерну программой	Площадь [ $\mu\text{m}^2$ ]	Округлость	Удлинение	Коэффициент формы	Выпуклость
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
a01	1		1	10	15312	0.703	2.57	0.729	0.976
a02	2	0.5	2.5	2	11410	0.917	1.44	0.922	0.985
a03	2		2	12	10732	0.872	1.46	0.894	0.977
a04	1		1	1	20975	0.604	3.44	0.607	0.975
a05	3		3	6	11501	0.743	2.4	0.756	0.975
a06	3		3	5	20987	0.766	1.9	0.778	0.973
a07	2	-0.2	1.8	15	6682	0.734	2.18	0.757	0.954
a08	3		3	20	9092	0.792	1.89	0.816	0.957
a09	4	-0.1	3.9	16	13079	0.869	1.7	0.88	0.988
a10	4	0.5	4.5	25	11556	0.943	1.38	0.948	0.994
a11	4		4	11	6576	0.761	2.02	0.776	0.969
a12	3		3	13	9988	0.723	2.3	0.738	0.95
a13	3		3	24	6120	0.845	1.5	0.869	0.979
a14	3	-0.5	2.5	9	7852	0.724	2.09	0.743	0.947
a15	3	-0.3	2.7	7	7374	0.815	1.86	0.815	0.973
a16	2		2	27	8725	0.768	2.03	0.788	0.987
a17	4	-0.4	3.6	26	7348	0.747	2.21	0.773	0.969
a18	1		1	19	11363	0.823	1.54	0.838	0.964
a19	1		1	28	16032	0.51	3.74	0.535	0.938
a20	3		3	8	8771	0.813	1.94	0.82	0.975
a21	1		1	4	10006	0.767	2.17	0.768	0.97
a22	1		1	3	5414	0.818	1.82	0.833	0.964
a23	1		1	14	12565	0.654	2.85	0.658	0.963
a24	3		3	21	6429	0.792	2.04	0.798	0.974
a25	2	0.2	2.2	29	11437	0.867	1.66	0.874	0.989
a26	2		2	23	12391	0.785	2.24	0.783	0.972
a27	4	0.3	4.3	18	5913	0.746	2.26	0.76	0.969
a28	4	0.4	4.4	17	3336	0.908	1.58	0.905	0.988
a29	3		3	22	13079	0.881	1.45	0.898	0.971
a102	1	0	1	25	10480.54	0.495	4.25	0.516	0.95
a33	2	0.2	2.2	4	11192.55	0.511	3.6	0.534	0.944
a59	3	-0.5	2.5	19	10044.64	0.547	3.31	0.577	0.951
a65	1		1	22	8893.65	0.735	2.02	0.738	0.981
a36	5		5	10	4411.5	0.931	1.31	0.946	0.981
a78	1		1	52	7870.67	0.876	1.71	0.878	0.987
a77	1		1	43	9545.78	0.852	1.7	0.863	0.979

Примечание. В таблице приведены данные для зерен циркона, имеющих номера от a01 до a29 и затем выборочно еще для 7 зерен, обсуждаемых в тексте и показанных на рис. 5.

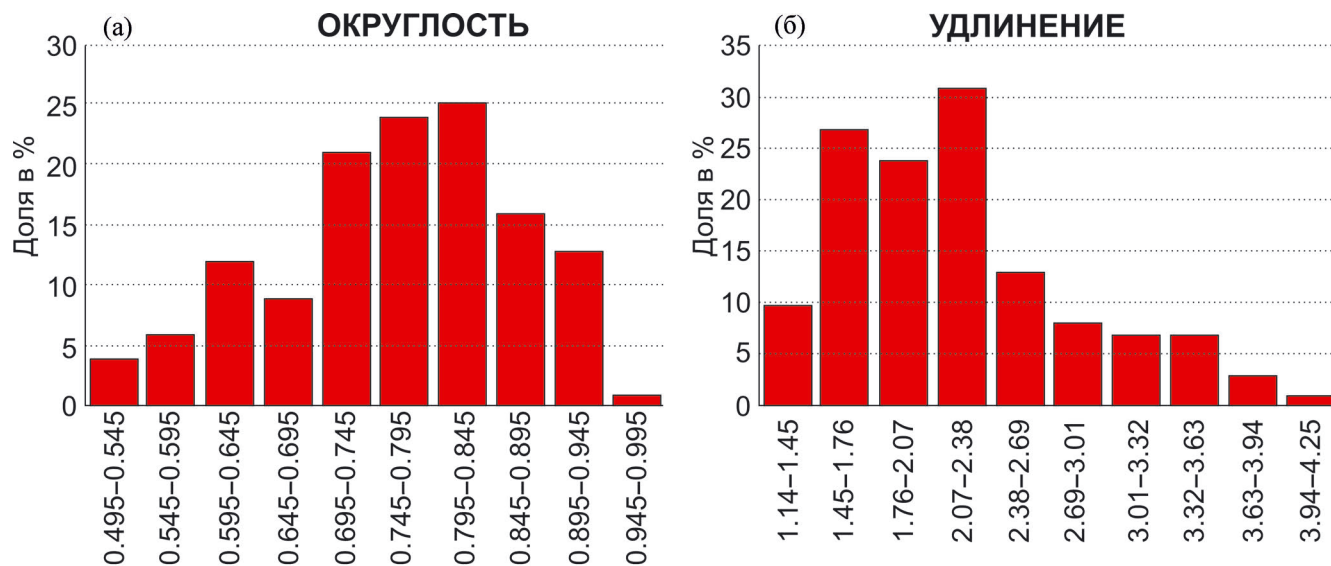


Рис. 3. Гистограммы значений параметров округлость (а) и удлинение (б) для выборки 128 зерен циркона из песчаников ченкской толщи (проба К20-114, шашка АВС-7).

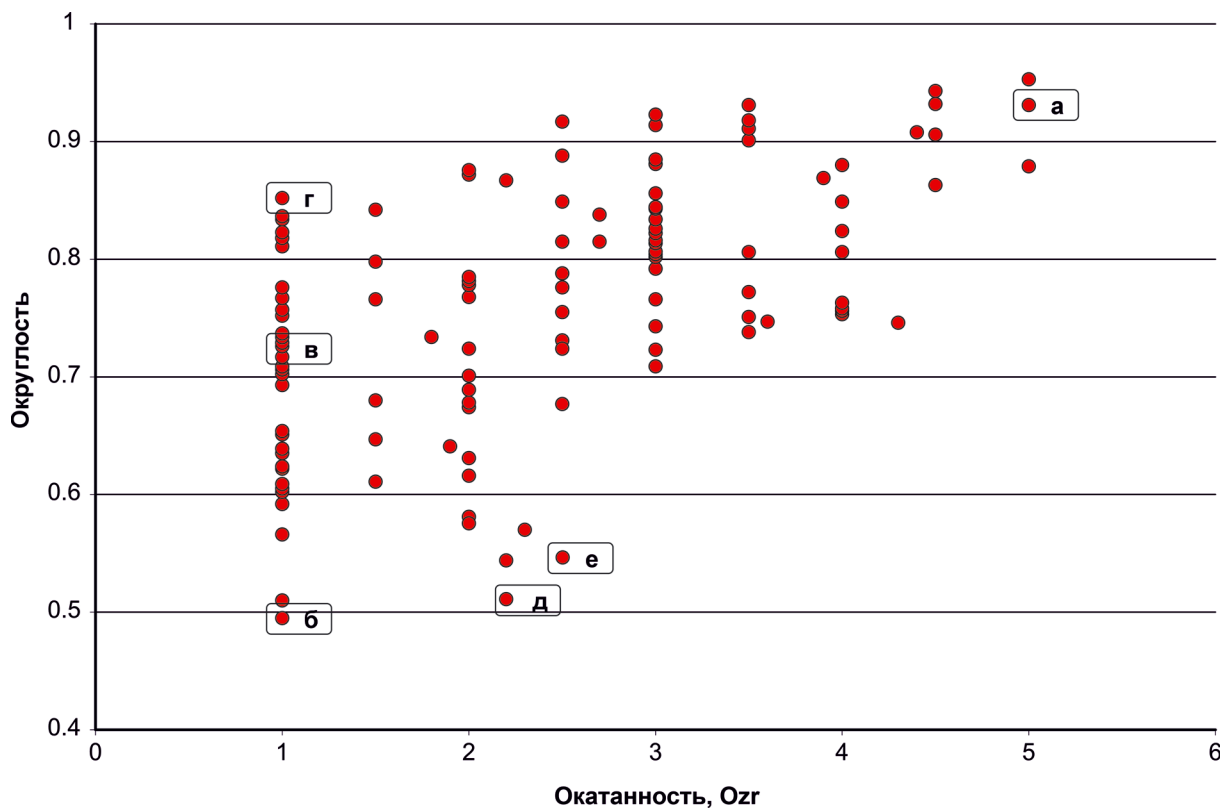
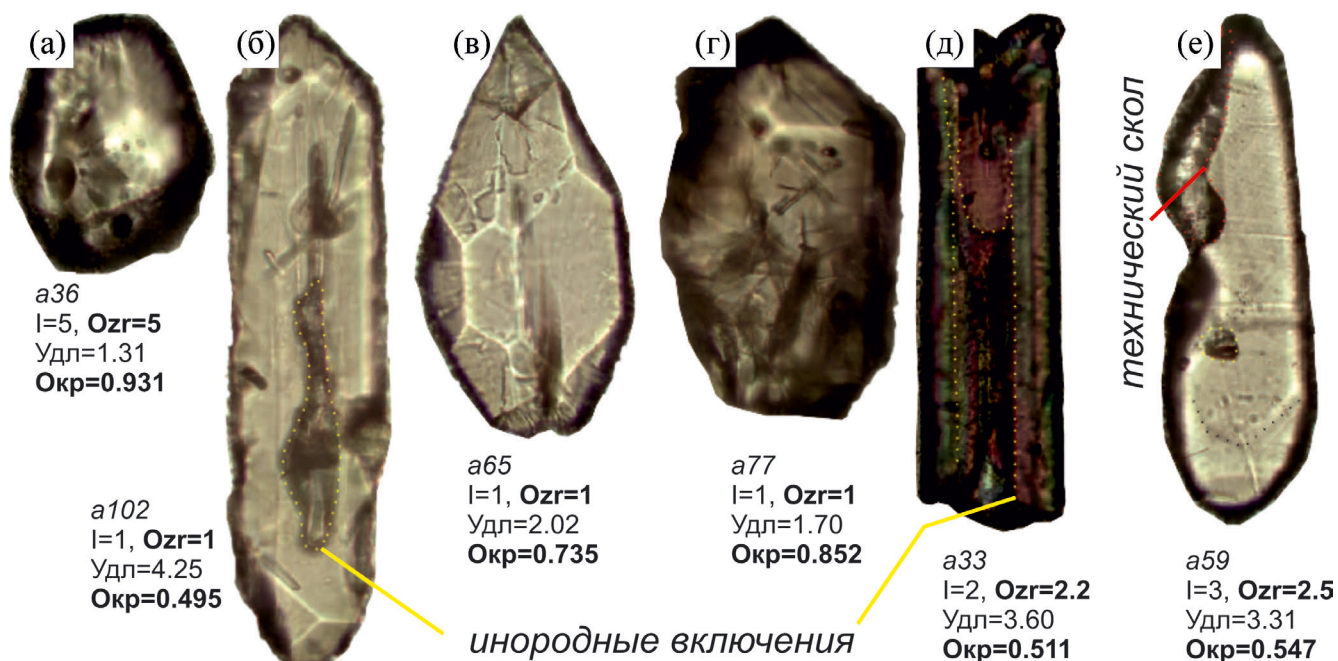


Рис. 4. Диаграмма “Окатанность–округлость” для выборки из 128 цирконовых зерен из песчаников ченкской толщи (проба К20-114, шашка АВС-7). Буквами обозначены зерна, описанные на рис. 5.





**Рис. 5.** Сопоставление изображений в проходящем свете с набором параметров (класс окатанности  $I$ , окатанность  $O_{zr}$ , удлинение  $Uдл$  и округлость  $O_{кр}$ ) для некоторых зерен циркона из песчаников ченкской толщи (проба К20-114, шашка АВС-7).

а – пример полностью окатанного зерна  $a36$ , которому присвоен класс  $I = 5$ ,  $O_{zr} = 5$  и для которого получено максимальное из всех изученных зерен значение параметра округлость  $O_{кр} = 0.931$ ;

б – пример неокатанного зерна  $a102$ , которому присвоен класс  $I = 1$ ,  $O_{zr} = 1$  и для которого получено минимальное из всех изученных зерен значение параметра округлость  $O_{кр} = 0.495$ . В средней части кристалла видно очень крупное инородное включение (стекло?) неправильной формы, а в других частях небольшие игольчатые минеральные включения (вероятно – кристаллы апатита), которые существенно понижают общую прочность кристалла. Тем не менее он не расколот. Это косвенный признак того, что зерно не испытало интенсивного окатывания;

в – пример зерна  $a65$ , которое без сомнений должно быть классифицировано как неокатанное (класс  $I = 1$ ,  $O_{zr} = 1$ ), поскольку у этого зерна наличествует по крайней мере одна острая вершина и фрагменты ребер. На их сохранность указывают светлые полосы – игра света, создаваемая ребрами кристалла на его нижней поверхности. Однако для этого зерна получен весьма высокий параметр округлость  $O_{кр} = 0.735$ , по своему значению более подходящий для зерна класса  $I = 4$  (сильно окатанные зерна) или выше;

г – пример зерна  $a77$ , для которого получено еще более высокое значение параметра округлость  $O_{кр} = 0.852$ , чем для зерна, показанного на рис. 5в, по своему значению более подходящее для зерна из класса  $I = 5$  (полностью окатанные зерна). Однако это зерно так же, как и предыдущее, классифицировано как неокатанное (класс  $I = 1$ ,  $O_{zr} = 1$ ) поскольку у этого зерна хотя и не так четко, как в зерне  $a65$ , но без сомнений можно идентифицировать острую вершину и, по крайней мере, фрагмент ребра (его признак – светлые интерференционные полосы);

д – для зерна  $a33$  получено одно из самых низких значений параметра округлость  $O_{кр} = 0.511$ , которое по своему значению более типично для зерна класса  $I = 1$  (неокатанные зерна). Такое низкое значение округлости обусловлено исходной игольчатой формой кристалла и двумя техническими сколами. Слегка сглаженная форма сколов позволяет предполагать, что сколы произошли не в результате дробления пробы при выделении зерен циркона, а раньше, на стадии естественной эволюции этого зерна, так что сколы успели стать слегка окатанными. Внутри у кристалла очень крупное инородное включение (видимо – стекло?) неправильной формы, которое существенно понижает прочность кристалла, и его наличие видимо способствовало быстрому разламыванию/разрушению исходного кристалла в осадочном процессе. Признаков сохранности ребер ни визуальных, ни в виде игры света не зафиксировано, поэтому мы классифицируем окатанность этого зерна между классом 2 (слабоокатанное) и 3 (среднеокатанное), но ближе к классу 2, и присваиваем ему  $O_{zr} = 2.2$ ;

е – для зерна  $a59$  также получено весьма низкое значение параметра округлость  $O_{кр} = 0.547$ . Такое низкое значение обусловлено дефектом зерна. По-видимому, изначально от очень крупного кристалла, в котором было древнее (инхеритное) ядро/зерно (кусочек его границы показан черной точечной линией) и инородные включения, в процессе эволюции откололся кусок, который был окатан до класса 3. В процессе дробления в этом зерне образовалась трещина, а в ходе шлифовки шашки по этой трещине откололся и выпал кусок, так что в эпоксидной заливке осталась пустота. Однако при визуальной оценке окатанности, технические сколы и дефекты в расчет мы не принимаем. Поскольку ни плоских поверхностей, ни признаков сохранности фрагментов ребер в виде игры света, ни тем более острой вершины не зафиксировано, мы классифицируем это зерно классом 3 и присваиваем ему  $I = 3$  и  $O_{zr} = 2.5$ .

3. Коэффициент формы (*Shape Factor*),  $SF = 4\pi S / Ps$  ( $S$  – площадь,  $Ps$  – периметр выпуклой оболочки<sup>1</sup>).
4. Выпуклость (*Roughness*),  $R = Ps / P$  ( $Ps$  – периметр выпуклой оболочки,  $P$  – периметр зерна).

Наиболее интересный для нас параметр *округлость* показал вариации 0.49–0.95. Соотнесение значений этого параметра с различными изображениями зерен циркона и степенью их окатанности по качественным визуальным признакам, перечисленным на рис. 2, показало следующее (рис. 4, 5).

Для трех зерен (малая статистика), которые по внешним визуальным признакам могут быть классифицированы как полностью окатанные ( $I = 5$ ), получены самые высокие значения *округлости*, всегда выше 0.8 (см. рис. 4, рис. 5а). Для сильно и среднеокатанных зерен *округлость* может принимать такие же высокие значения, как и для полностью окатанных зерен, обычно не опускаясь ниже 0.7 (см. рис. 4). При этом в исключительных случаях (чаще всего при технических повреждениях зерен) *округлость* может быть снижена до значений, типичных для классов 1 и 2 (см. рис. 5е). В случае неокатанных и слабоокатанных зерен параметр *округлость* может быть любым (см. рис. 4, рис. 5б–5д). Наличие острой вершины (признак неокатанности) у зерна не исключает низкого значения параметра *округлость* (см. рис. 5г).

Таким образом, автоматическая обработка изображений зерен циркона и вычисление параметров *площадь*, *удлиненность*, *округлость* и др., несомненно, помогают для оценки окатанности отдельных зерен. Например, параметр *удлиненность* помогает разделять зерна 4 и 5 класса, выявлять зерна с превышением одного размера над остальными более 3, которые относятся к классу 2, и др. (см. рис. 2). Для классификации зерен по размеру можно использовать параметр *площадь*. Но пока используемая нами программа для вычисления параметра *округлость* не только в полностью автоматическом режиме, но даже в полуавтоматическом режиме с дополнительной помощью человека (выявление технических повреждений зерен циркона и их маркировка, разделение соприкасающихся изображений зерен и др.), не настолько совершенна, чтобы заменить визуальную оценку окатанности.

<sup>1</sup> Если зерно имеет невыпуклую форму, то программа строит выпуклую оболочку. Выпуклой оболочкой данных  $N$  точек плоскости называется минимальный по площади выпуклый многоугольник, включающий в себя все эти точки. Соответственно, для этой выпуклой оболочки вычисляется периметр  $Ps$ .  $P$  – это истинный периметр зерна. Если зерно выпуклое, то  $P$  и  $Ps$  – это одно и то же.

Наиболее вероятным способом развития автоматического процесса определения класса окатанности является построение алгоритмов на основе машинного обучения. Применение данного метода показало достаточно высокую сходимость с “ручной” обработкой микрофотографий, например [Nachtergaele, De Grave, 2021]. Однако дальнейшее развитие метода требует значительного объема фактического материала и привлечения специалистов в области информационных технологий.

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИНТЕГРАЛЬНОГО ИНДЕКСА ОКАТАННОСТИ $SO_{\text{выб}}$ И ДРУГИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ВЫБОРКИ ЗЕРЕН ОБЛОМОЧНОГО ЦИРКОНА

После того, как для каждого цирконового зерна из изученной выборки получена оценка окатанности  $Ozr$ , можно с помощью стандартных статистических процедур сопоставлять выборки, а также рассчитать интегральный показатель, характеризующий окатанность зерен в выборке.

Самая простая оценка усредненного параметра, характеризующего окатанность обломков/зерен в выборке, – это вычисление среднего арифметического значения для этой выборки по значениям окатанности единичных обломков/зерен (см. например, рекомендации в работе [Шванов, 1969]): в одном шлифе песчаника под микроскопом оценить окатанность 50–100 зерен и вычислить среднее арифметическое значение, которое принять за среднюю окатанность зерен изученного песчаника. Однако иногда, применительно к конкретным случаям (генетически разные виды песков, отдельные типы минералов и т.п.), чтобы учесть особенности изучаемых объектов, используют более сложные показатели/коэффициенты для характеристики окатанности выборки (см. обзор в работе [Шванов, 1969]).

Для характеристики окатанности зерен циркона по выборке, предлагается вычислять интегральный индекс окатанности  $SO_{\text{выб}}$  по формуле:

$$SO_{\text{выб}} = \left[ \frac{n_1 \cdot Ozr \cdot V_1 + \sum_{i=1}^{n_2} Ozr_i + \sum_{j=1}^{n_3} Ozr_j + \sum_{k=1}^{n_4} Ozr_k + n_5 Ozr \cdot V_5}{N} \right],$$

где  $n_1, n_2, n_3, n_4, n_5$  – число зерен соответствующего класса,  $N = n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5$ ,  $V_1$  и  $V_5$  – весовые коэффициенты.

$SO_{\text{выб}}$  отличается от обычного среднего значения окатанности по выборке введением весовых коэффициентов  $V_1$  и  $V_5$ , усиливающих вклад  $Ozr$  зерен крайних классов 1 и 5 в  $SO_{\text{выб}}$  по сравнению с  $Ozr$  остальных классов. Весовые коэффициенты  $V_1 = 0.5$  и  $V_5 = 1.1$  подобраны таким образом, чтобы  $Ozr$  классов 1 и 5 уравнивали друг друга и при одинаковом количестве зерен этих классов не происходило перекоса  $SO_{\text{выб}}$  в сторону больших или меньших значений.

Зерна циркона немагматического (метаморфического или гидротермального) происхождения могут изначально не иметь правильное кристаллографическое оформление (вершины и ребра), что свойственно магматическим кристаллам [Corfu et al., 2003; Belousova et al., 2006; Fu et al., 2009; Rubatto, 2017]. Некоторые кристаллы первично магматического происхождения могут в процессе своей эволюции образовать метаморфическую или гидротермальную оболочку, затушевывающую вершины и ребра исходного кристалла, подвергнутся частичному растворению и другим изменениям [Rubin et al., 1989, 1993; Ramezani et al., 2000; Pettke et al., 2005; Schaltegger et al., 2005; Kaylina, 2010; Yang et al., 2023]. По своему облику такие зерна могут иметь визуальные признаки окатанности класса 2 или 3, возможно даже 4, хотя в реальности не подвергались никакому окатыванию. В самом начале, при разработке наборов признаков окатанности для разных классов, обсуждалась возможность выделять такие зерна в особый класс (например, класс 0) и не учитывать в дальнейших расчетах. Однако мы не смогли сформулировать критерии, по которым можно надежно отличить такие зерна от истинно окатанных. Принимая во внимание, что (i) доля таких зерен в выборках обломочного циркона из обломочных пород невелика (не превышает первые проценты); (ii) их наличие — это объективная характеристика циркона изучаемой толщи; (iii) исключение таких зерен из выборки искажает взаимные пропорции между количеством зерен других классов, было принято решение учитывать и классифицировать их наравне с истинно окатанными. Все зерна, для которых по разным причинам сложно выполнить классификацию, следует отнести к классу 3, если нет оснований отнести их к классу 4 или 5.

Очевидный более низкий уровень объективности в идентификации окатанности классов 2, 3 и 4 — это основная причина введения весовых коэффициентов  $V_1$  и  $V_5$ , усиливающих вклад  $Ozr$  крайних классов 1 и 5 в  $SO_{\text{выб}}$ .

При увеличении числа сильно окатанных и полностью окатанных зерен интегральный индекс

$SO_{\text{выб}}$  возрастает, может достичь 5 и даже стать более 5. Максимальное значение 5.5 достигается за счет весового коэффициента  $V_5 = 1.1$  в том случае, если все зерна полностью окатаны (класс 5). И, наоборот, при увеличении числа неокатанных и слабоокатанных зерен, значение коэффициента  $SO_{\text{выб}}$  уменьшается и в пределе может понизиться до 0.5 за счет весового коэффициента  $V_1 = 0.5$ , в том случае, если все зерна не окатаны (класс 1). В частности, для выборки зерен магматического циркона, где представлены только зерна классов 1 и единичные 2,  $SO_{\text{выб}}$  всегда меньше 2, рутинные значения около 1.

При доминировании зерен средней окатанности (класс 3) и примерно одинаковом количестве неокатанных и слабоокатанных зерен (классы 1 и 2), а также сильно окатанных и полностью окатанных зерен (классы 4 и 5) значение  $SO_{\text{выб}}$  около 3.0. Это характеристика выборки зерен циркона для обломочной породы, в которой нет явного преобладания неокатанных и слабоокатанных над сильно окатанными и полностью окатанными зернами или наоборот.

Точность и надежность оценки степени окатанности для одного зерна не очень высока; рутинная ошибка — 0.5, а для некоторых единичных зерен классификация может оказаться и фатально ошибочной как по объективным, так и субъективным причинам. Например, если неокатанный совершенный призматический удлиненный кристалл с “краевыми” пирамидками на концах (вершинах), который должен быть классифицирован как  $I = 1$ , помещен в эпоксидную шашку вертикально и приполирован до середины высоты, то на микрофотографиях (на изображениях) он виден как изометричное зерно без ярко выраженных ребер и граней. А при плохом качестве изображения, которое не позволит распознать его истинную форму, такой кристалл может быть классифицирован как полностью окатанный ( $I = 5$ ). С другой стороны, в сильно окатанном зерне, истинная окатанность которого соответствует классу 4, “технический” острый скол, при определенных обстоятельствах, может быть принят за сохранившуюся вершину и это зерно будет ошибочно отнесено к классу 1. Тем не менее, при больших количествах зерен в выборке (200–300 штук и более), единичные ошибки в ту и другую сторону компенсируют друг друга, и интегральный показатель  $SO_{\text{выб}}$  весьма устойчив.

Тестовые процедуры и накопленный нами опыт показали, что возможные ошибки в классификации в виде систематического повышения или понижения класса окатанности между 2 и 3 или 3 и 4 классами при количестве ошибок около 10%

от общего числа зерен в выборке приведет к изменению величины  $SO_{\text{выб}}$  на  $\sim 0.2-0.3$ . С другой стороны, добавление в набор 10% неокатанных (класс 1) или полностью окатанных (класс 5) зерен уменьшает или увеличивает  $SO_{\text{выб}}$  на  $\sim 0.5-0.7$  соответственно. Т.е. различие  $SO_{\text{выб}}$  для разных выборок до 0.5 следует классифицировать на уровне рутинной погрешности, при величинах  $SO_{\text{выб}}$  от 0.5 до 0.7 – значимым различием, а более 0.7 – существенным различием.

Для каждой выборки также можно рассчитать долю в процентах количества зерен разного класса окатанности, возможно сопоставление выборок с помощью стандартных статистических процедур, например с помощью теста Колмогорова–Смирнова.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ОКАТАННОСТИ ЗЕРЕН ОБЛОМОЧНОГО ЦИРКОНА ИЗ ПЕСЧАНИКОВ ЧЕНКСКОЙ ТОЛЩИ И ДРУГИХ СТРАТИГРАФИЧЕСКИХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ КИММЕРИД ГОРНОГО КРЫМА

Для тестирования методики, накопления статистики, понимания вариаций различных параметров по реальным объектам и оценки

воспроизводимости результатов, мы выполнили серию расчетов, сводка которых приведена в табл. 2 и на рис. 6.

В нашем распоряжении есть небольшая коллекция из 20 датированных (U–Pb, SHRIMP-II) магматических кристаллов циркона из плагиориолитов скалы Монах в окрестностях мыса Фиолент (район г. Севастополя) [Кузнецов и др., 2022б]. Для выборки кристаллов циркона из магматической породы, которые могут быть только неокатанными или классифицированными как слабоокатанные, если их вершины на изображениях по разным причинам затусшеваны/сглажены,  $SO_{\text{выб}}$  варьирует от 0.5 до 2.0, рутинные значения 0.8–1.7.

Визуальный анализ оптических микрофотографий и катодолюминисцентных изображений кристаллов циркона из плагиориолитов скалы Монах показал, что почти во всех кристаллах можно отличить внутреннее ядро и тонкую (метаморфическую?) оболочку. Приблизительно в половине случаев оболочка на изображениях придала вершинам кристаллов сглаженный облик, поэтому таким кристаллам по степени окатанности был присвоен класс 2. При пропорциях кристаллов, отнесенных к классам окатанности I1–40% и I2–60% интегральный показатель окатанности выборки показал значение  $SO_{\text{выб}} = 1.18$ .

**Таблица 2.** Сводка параметров окатанности по выборкам зерен циркона, характеризующих различные толщи киммерид Горного Крыма, а также аксессуарного циркона плагиориолитов скалы Монах

Толща или объект (номер пробы)	Общее количество зерен циркона	Количество зерен циркона в классе					$SO_{\text{выб}}$
		1	2	3	4	5	
Таврическая серия, верхнетриасовая нижнетаврическая свита (N18-01)	276	1	5	116	103	51	3.95
Эскиординская серия, верхнетриасовая салгирская толща (N18-03)	187	8	36	81	48	14	3.25
Таврическая серия, нижнеюрская верх- нетаврическая свита (N18-02)	126	3	22	57	28	16	3.41
Ченкская толща (N18-04 + K20-114)	411	74	99	159	68	11	2.55
Ченкская толща (N18-04)	184	25	41	76	38	4	2.70
Ченкская толща (K20-114)	227	45	62	81	36	3	2.42
Верхнеюрские конгломераты, с. Орлиное (K15-006)	96	23	29	21	8	96	2.83
Верхнеюрские конгломераты, гора Спилия (K15-003)	107	9	31	42	18	7	2.82*
Верхнеюрские конгломераты, гора Южная Демерджи (K15-007)	162	25	44	55	30	8	2.64*
Плагиориолиты, скала Монах	20	11	9	0	0	0	1.18

Примечание. \* – оценки окатанности выполнены только по катодолюминисцентным изображениям.

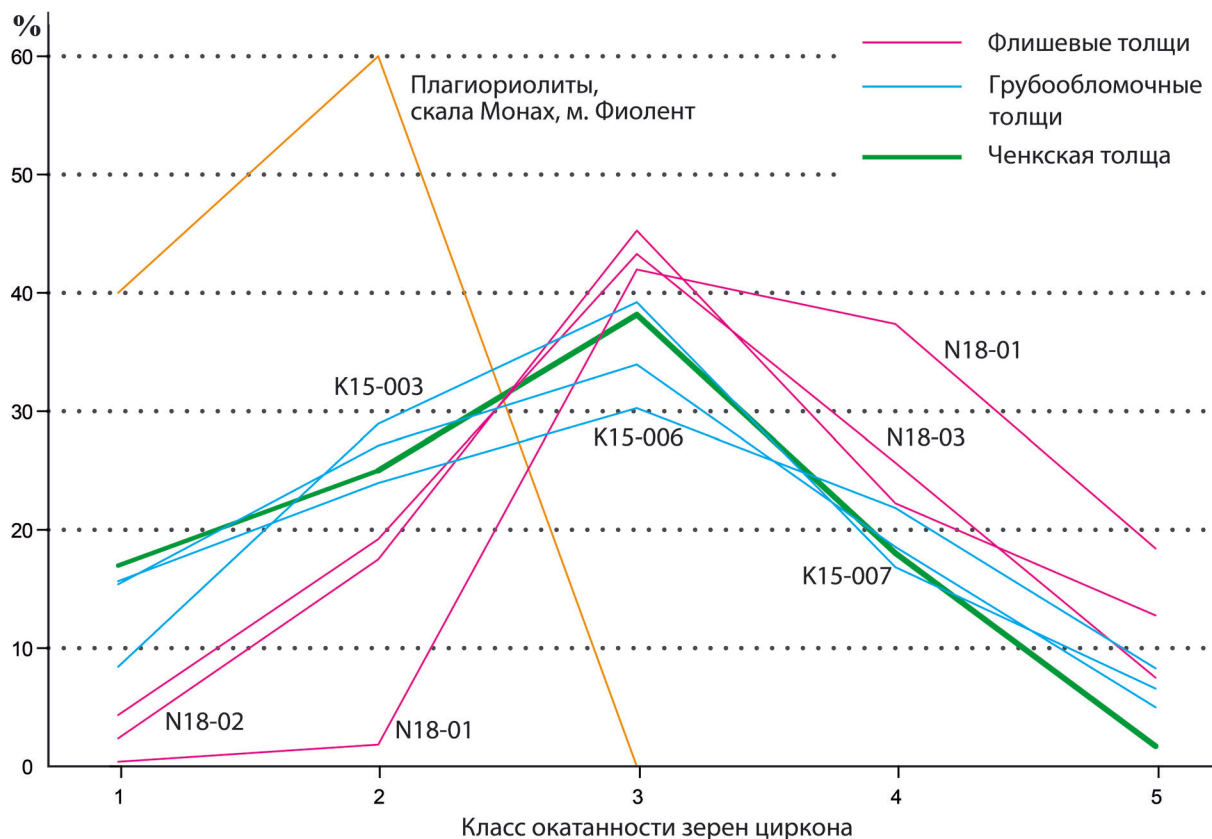


Рис. 6. Пропорции в процентах количества зерен обломочного циркона разного класса окатанности из песчаников ченкской, некоторых флишевых и грубообломочных (конгломератовых) толщ киммерид Горного Крыма, а также плагиориолитов скалы Монах (по результатам, приведенным в табл. 2).

Другой тестовый пример – зерна песчаников ченкской толщи. В нашем распоряжении есть результаты изучения зерен из двух разных проб N18-04 и K20-114, которые отобраны на расстоянии приблизительно 300 м в разные годы и разными людьми (проба N18-04 отобрана в 2018 г. А.М. Никишиным и Д.В. Московским, а проба K20-114 – в 2020 г. Н.Б. Кузнецовым и Т.В. Романюк). Также разными людьми выполнено выделение и фотографирование зерен обломочного циркона (проба N18-04 – Д.В. Московским, проба K20-114 – А.В. Страшко). Это почти идеальная ситуация для тестирования воспроизводимости результатов. Полученные интегральные значения  $SO_{\text{выб}}$  для зерен из этих проб – 2.70 (N18-04) и 2.42 (K20-114), т.е. расхождение  $SO_{\text{выб}}$  составило менее 0.3, что попадает в пределы рутинных погрешностей.

Рассчитанный для суммарного набора зерен из песчаников ченкской толщи по двум пробам  $SO_{\text{выб}} = 2.55$ . Такое низкое значение  $SO_{\text{выб}}$  хорошо соответствует тому, что эти песчаники сложены практически неокатанным обломочным

материалом. Обращает на себя внимание более высокая пропорция неокатанных и слабоокатанных зерен по сравнению с песчаниками флишевых толщ, и почти полное отсутствие полностью окатанных зерен, в то время как доля таких зерен во флишевых толщах 10–20%.

Величины интегрального индекса окатанности  $SO_{\text{выб}}$  для выборок зерен циркона из песчаников верхнетриасово-нижнеюрских флишевых толщ киммерид Горного Крыма показали значения 3.25 (эскиординская серия), 3.41 и 3.95 (таврическая серия), для верхнеюрских грубообломочных толщ (конгломератов) получены значения – 2.64, 2.82 и 2.83 (см. табл. 2). Таким образом, для песчаников ченкской толщи зафиксировано существенное различие  $SO_{\text{выб}}$  с толщами таврической серии и сходство с верхнеюрскими грубообломочными толщами. Полученные различия подтверждаются сопоставлением кумулятивных функций распределения окатанности зерен обломочного циркона ( $Ozr$ ) и расчетами с помощью теста Колмогорова–Смирнова (рис. 7, табл. 3).

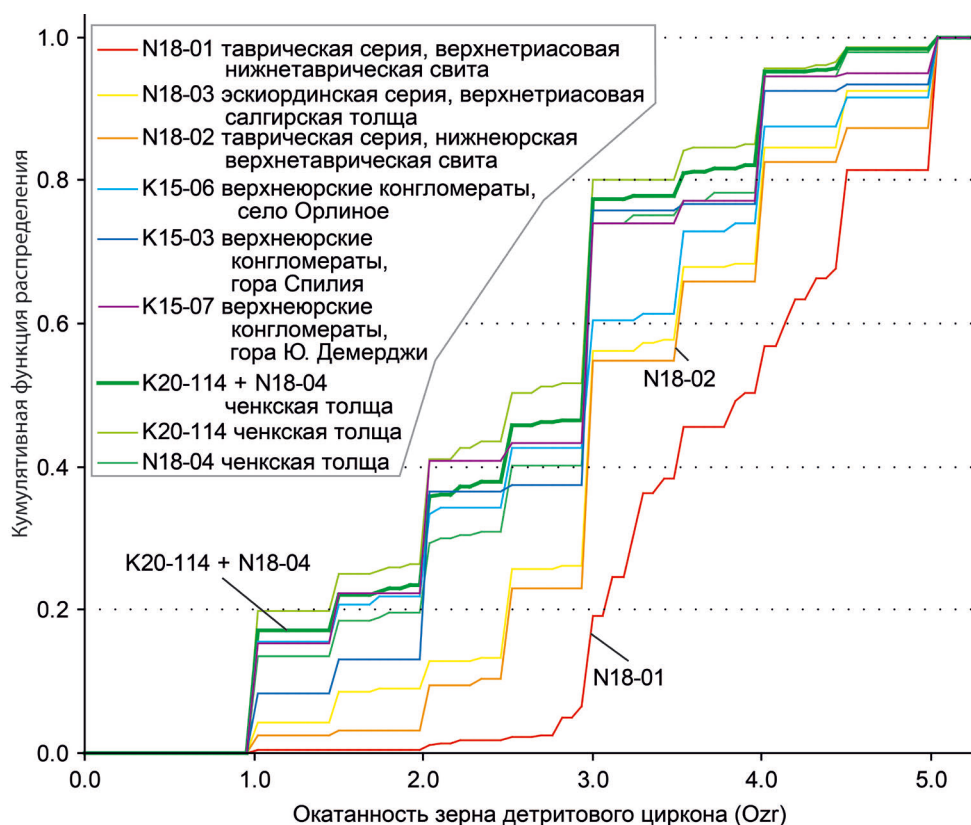


Рис. 7. Сопоставление кумулятивных функций распределения величины окатанности зерен обломочного циркона ( $Ozr$ ) из песчаников ченкской, некоторых флишевых и грубообломочных (конгломератовых) толщ киммерид Горного Крыма. Стратиграфическую привязку проб см. на рис. 1.

Таблица 3. Величины взаимных парных коэффициентов  $p$  теста Колмогорова–Смирнова для выборок величин окатанности зерен обломочного циркона ( $Ozr$ ) из песчаников ченкской, некоторых флишевых и грубообломочных (конгломератовых) толщ киммерид Горного Крыма

Номера проб	Привязка	N18-01	N18-03	N18-02	N18-04	K20-114	K20-114 + N18-01	K15-006	K15-003	K15-007
N18-01	Нижнетаврическая свита	–	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
N18-03	Эскиординская серия	0.000	–	<b>0.997</b>	0.019	0.000	0.000	0.024	0.031	0.000
N18-02	Верхнетаврическая свита	0.000	<b>0.997</b>	–	0.009	0.000	0.000	0.010	0.013	0.000
N18-04	Ченкская толща	0.000	0.019	0.009	–	<b>0.176</b>	<b>0.743</b>	<b>0.693</b>	<b>0.994</b>	<b>0.738</b>
K20-114	Ченкская толща	0.000	0.000	0.000	<b>0.176</b>	–	0.875	<b>0.076</b>	<b>0.284</b>	<b>0.774</b>
K20-114 + N18-04	Ченкская толща	0.000	0.000	0.000	<b>0.743</b>	<b>0.875</b>	–	<b>0.170</b>	<b>0.542</b>	<b>0.996</b>
K15-006	Верхнеюрские конгломераты	0.000	0.024	0.010	<b>0.693</b>	0.076	0.076	–	<b>0.815</b>	<b>0.721</b>
K15-003	Верхнеюрские конгломераты	0.000	0.031	0.013	<b>0.994</b>	<b>0.284</b>	<b>0.542</b>	<b>0.815</b>	–	<b>0.814</b>
K15-007	Верхнеюрские конгломераты	0.000	0.000	0.000	<b>0.738</b>	<b>0.774</b>	<b>0.996</b>	<b>0.721</b>	<b>0.814</b>	–

Примечание. Расчеты выполнены с помощью программы [Guynn, Gehrels, 2010], размещенной в свободном доступе. Применение теста Колмогорова–Смирнова используется для того, чтобы определить, подчиняются ли два эмпирических распределения одному закону, либо определить, подчиняется ли полученное распределение предполагаемой модели. Стандартный уровень значимости теста принят равным 95%. Если величина полученного взаимного коэффициента  $p$  превышает пороговое значение 0.05, то тестируемые эмпирические распределения с вероятностью 95% подчиняются одному и тому же закону распределения. Полужирным шрифтом выделены значения  $p$  больше принятого порогового 0.05. Стратиграфическую привязку проб см. на рис. 1, кумулятивные функции распределения – на рис. 7.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описана методика, позволяющая по изображениям зерна циркона оценивать степень его окатанности по пятибалльной шкале. Разработанный авторами набор визуальных признаков позволяет отнести единичный(ое) кристалл/зерно циркона по степени окатанности к одному из 5 классов. Неокатанные кристаллы, сохранившие хотя бы одну острую вершину, относятся к самому низкому классу 1, полностью окатанные (до практически сферической формы) зерна – к классу 5.

Далее, исходя из оценок окатанности единичных зерен циркона, для произвольной выборки можно получить количественные характеристики: (1) оценить долю циркона разного класса окатанности в выборке и (2) рассчитать интегральный индекс окатанности выборки –  $SO_{\text{выб}}$ . Тестовые процедуры и накопленный опыт показали, что различие  $SO_{\text{выб}}$  для разных выборок до 0.5 следует классифицировать на уровне рутинной погрешности, при величинах от 0.5 до 0.7 – значимым различием, а более 0.7 – существенным различием.

С помощью предложенной методики выполнено сопоставление количественных характеристик окатанности обломочного циркона из толщ киммерид Горного Крыма: ченкской толщи (2 выборки), верхнетриасовых-нижнеюрских флишевых толщ (3 выборки) и верхнеюрских конгломератов (3 выборки).

Для суммарного набора зерен по двум пробам из песчаников ченкской толщи получена величина  $SO_{\text{выб}} = 2.55$ , что согласуется с тем, что для этих песчаников характерен практически неокатанный обломочный материал. Величины интегрального индекса окатанности  $SO_{\text{выб}}$  для выборок зерен циркона из песчаников верхнетриасово-нижнеюрских флишевых толщ таврической серии показали значения 3.41 и 3.95, фиксируя существенное различие от ченкской толщи.

Пропорции зерен по степени окатанности в песчаниках ченкской толщи показывают сходство с таковыми для верхнеюрских конгломератов. Напротив, в песчаниках ченкской толщи очевидно более высокая пропорция неокатанных и слабоокатанных зерен по сравнению с песчаниками флишевых толщ, и почти полное отсутствие полностью окатанных зерен, в то время как доля таких зерен во флишевых толщах 10–20%.

Визуальное сопоставление кумулятивных функций распределения величины окатанности зерен обломочного циркона показывает сильное расхождение между кривыми для ченкской

толщи и толщ таврической серии. Для кривых ченкской толщи и верхнеюрских конгломератов, напротив, довольно высокое сходство кривых. Это подтверждается количественными расчетами с помощью теста Колмогорова–Смирнова.

Существенные различия окатанности циркона из ченкской толщи и свит таврической серии согласуются с результатами U–Pb-изотопного датирования обломочного циркона из толщ киммерид Горного Крыма [Кузнецов и др., 2024], которые показали кардинальные отличия питающих провинций для этих толщ. Ченкскую толщу предпочтительнее рассматривать как отдельное от таврической серии стратиграфическое подразделение.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены в соответствии с планом по темам Гос. заданий ИФЗ РАН. Проведение полуавтоматического анализа морфологии зерен циркона выполнено на оборудовании, закупленном по соглашению № 075-15-2022-299 в рамках программы развития НЦМУ КФУ “Рациональное освоение запасов жидких углеводородов планеты”.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абдулла Д.* Структура Качинского антиклинория (Горный Крым) // Вестник Ленинград. ун-та. Сер. геол. и географ. 1968. № 18. С. 40–50.
- Атлас текстур и структур осадочных горных пород. Т. 1. Обломочные и глинистые породы / Ред. А.В. Хабаков. М.: Госгеолтехиздат, 1962. 730 с.
- Бархатов Б.П.* О соотношении между таврической и эскиординской свитами Горного Крыма // Вестник Ленинград. ун-та. 1955. № 7. С. 123–135.
- Васильева Л.Б.* О стратиграфическом расчленении таврической формации Горного Крыма // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1952. Т. XXVII(5). С. 53–79.
- Геологическое строение Качинского поднятия Горного Крыма. Стратиграфия мезозоя / Ред. О.А. Мазарович, В.С. Милеев. М.: Изд-во МГУ, 1989. 168 с.
- Горная энциклопедия / Гл. ред. Е.Е. Козловский. М.: Советская энциклопедия, 1987. Т. 3. 553 с.
- Каулина Т.В.* Образование и преобразование циркона в полиметаморфических комплексах. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2010. 144 с.

- Кликушин В. Г.* О триасовых и раннеюрских криноидеях Крыма // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1988. Т. 63. Вып. 6. С. 71–79.
- Кузнецов Н. Б., Романюк Т. В., Никишин А. М., Страшко А. В., Колесникова А. А., Дубенский А. С., Шешуков В. С., Ляпунов С. М., Новикова А. С., Московский Д. В.* Источники сноса верхнетриасово-нижнеюрского флиша и средне-верхнеюрских грубо-обломочных толщ киммерид Горного Крыма по результатам U-Th-Pb изотопного датирования зерен детритового циркона // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2022а. Т. 30. № 4. С. 52–75.  
<https://doi.org/10.31857/S0869592X22040056>
- Кузнецов Н. Б., Романюк Т. В., Страшко А. В., Новикова А. С.* Офиолитовая ассоциация мыса Фиолент (запад Горного Крыма) – верхнее ограничение возраста по результатам U-Pb изотопного датирования плагиоориолитов (скала Монах) // Записки горного института. 2022б. Т. 255. С. 435–447.  
<https://doi.org/10.31897/PMI.2022.37>
- Кузнецов Н. Б., Страшко А. В., Романюк Т. В., Никишин А. М., Московский Д. В., Новикова А. С., Дубенский А. С., Шешуков В. С.* Результаты U-Th-Pb датирования зерен детритового циркона из ченкских песчаников – вклад в стратиграфию киммерид Горного Крыма // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2024. Т. 32. № 3.
- Кухаренко А. А.* Количественный анализ формы галек из древнего аллювия р. Койвы // Советская геология. 1947. № 18. С. 146–155.
- Логвиненко Н. В., Карпова Т. В., Шапошников Д. П.* Литология и генезис таврической формации Крыма. Харьков: Изд-во Харьковского ун-та, 1961. 400 с.
- Маслов А. В.* Осадочные породы: методы изучения и интерпретации полученных данных / Учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2005. 289 с.
- Муратов М. В.* Тектоника и история развития Альпийской геосинклинальной области юга европейской части СССР и сопредельных стран // Тектоника СССР. Т. 2. М., Л.: Изд-во АН СССР, 1949. 510 с.
- Никишин А. М., Махатадзе Г. В., Габдуллин Р. Р., Худoley А. К., Рубцова Е. В.* Битакские конгломераты как ключ для понимания среднеюрской геологической истории Крыма // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 2016. № 6. С. 20–27.
- Никишин А. М., Романюк Т. В., Московский Д. В., Кузнецов Н. Б., Колесникова А. А., Дубенский А. С., Шешуков В. С., Ляпунов С. М.* Верхнетриасовые толщ Горного Крыма: первые результаты U-Pb датирования детритовых цирконов // Вестник МГУ. Серия 4. Геология. 2020. № 2. С. 18–32.
- Панов Д. И.* Ченкская свита (нижняя юра) юго-западного Крыма: проблемы стратиграфического положения и возраста // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 2015. Т. 90. Вып. 4. С. 31–41.
- Панов Д. И., Болотов С. Н., Самарин Е. Н., Гостев М. Ю.* Перерывы в разрезе триасово-юрских отложений Горного Крыма и их историко-геологическое значение // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 2004. № 2. С. 21–31.
- Панов Д. И., Бурканов Е. И., Гайдук В. В., Илькевич Д. Г.* Новые данные по геологии триасовых и нижнеюрских отложений в междуречье Марты и Бодрака (юго-западная часть Горного Крыма) // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 1978. № 1. С. 47–55.
- Панов Д. И., Панченко И. В., Косоруков В. Л.* Нижнетаврическая свита (верхний триас) на Качинском понятии Горного Крыма // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 2011. № 2. С. 13–21.
- Романюк Т. В., Кузнецов Н. Б., Рудько С. В., Колесникова А. А., Московский Д. В., Дубенский А. С., Шешуков В. С., Ляпунов С. М.* Этапы каменноугольно-триасового магматизма в Причерноморье по результатам изотопно-геохронологического изучения зерен детритового циркона из юрских грубообломочных толщ Горного Крыма // Геодинамика и тектонофизика. 2020. № 3. С. 453–473.
- Рудько С. В., Кузнецов Н. Б., Белоусова Е. А., Романюк Т. В.* Возраст, Hf-изотопная систематика детритовых цирконов и источник сноса конгломератов г. Южная Демерджи, Горный Крым // Геотектоника. 2019. № 5. С. 36–61. DOI: 10.31857/S0016-853X2019536-61
- Рудько С. В., Кузнецов Н. Б., Романюк Т. В., Белоусова Е. А.* Строение и основанный на первых результатах U/Pb-датирования детритных цирконов возраст конгломератов г. Южная Демерджи (верхняя юра, Горный Крым) // Докл. РАН. 2018. Т. 483. № 3. С. 306–309.
- Рухин Л. Б.* Основы литологии. Л., 1969. 704 с.
- Стафеев А. Н., Суханова Т. В., Латышева И. В., Косоруков В. Л., Ростовцева Ю. И., Смирнова С. Б.* Ченкская толща песчаников (нижняя юра) Горного Крыма: стратиграфия и условия осадконакопления // Вестник МГУ. Серия 4. Геология. 2014. № 6. С. 40–48.
- Тевелев Арк. В., Коварская В. Е., Татарина Д. С.* Литологический состав, спорово-пыльцевые спектры и условия образования пород ченкской свиты Юго-Западного Крыма // Вестник МГУ. Серия 4. Геология. 2012. № 2. С. 14–24.
- Фиколина Л. А., Белецкий С. В., Белокрыс О. А., Деренюк Д. Н., Краснорудская С. И., Обшарская Н. Н., Король Б. И., Ивакин М. Н., Шевчук Н. В., Дяченко Л. Н., Аверина В. Н., Пересадыко И. Н., Пупышева В. Г., Севастьянова В. П.* Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1: 1000000. Третье поколение. Сер. Скифская. Лист L-36 – Симферополь. Объяснительная записка. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2019. 979 с.



- Хабаков А.В.* Краткая инструкция для полевого исследования конгломератов. Л., М.: Госгеологоразведиздат, 1933. 14 с.
- Хабаков А.В.* Об индексах окатанности галечников // Советская геология. 1946. № 10. С. 17–32.
- Шванов В.Н.* Литостратиграфия и структура таврической свиты в бассейне р. Бодрак в Крыму // Вестник Ленинград. ун-та. Сер. геология и география. 1966. Вып. 1. № 6. С. 153–156.
- Шванов В.Н.* Песчаные породы и методы их изучения. Л.: Недра, 1969. 248 с.
- Beat M.A., Shepard F.P.* A use of roundness to determine depositional environments // J. Sediment. Petrol. 1956. № 26. P. 49–60.
- Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y.* Zircon crystal morphology, trace element signatures and Hf isotope composition as a tool for petrogenetic modeling: examples from eastern Australian granitoids // J. of Petrology. 2006. V. 47. № 2. P. 329–353.
- Benn D.I., Ballantyne C.K.* The description and representation of particle shape // Earth Surface Processes and Landforms. 1993. № 18. P. 665–672.
- Blott S.J., Pye K.* Particle shape: a review and new methods of characterization and classification // Sedimentology. 2008. V. 55. P. 31–63.
- Cawood P.A., Hawkesworth C.J., Dhuime B.* Detrital zircon record and tectonic setting // Geology. 2012. V. 40. № 10. P. 875–878.
- Corfu F., Hanchar J.M., Hoskin P.-W.O., Kinny P.* Atlas of Zircon Textures // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2003. V. 53. № 1. P. 469–500.
- Crofts R.S.* A visual Measure of Single Particle Form for use in the Field // J. of Sedimentary Petrology. 1974. V. 46. P. 931–934.
- Davis D.W., Williams I.S., Krogh T.E.* Historical development of U–Pb geochronology / Eds J.M. Hanchar, P.W.O. Hoskin // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2003. V. 53. P. 145–181.
- Dickinson W.R., Gehrels G.E.* Use of U–Pb ages of detrital zircons to infer maximum depositional ages of strata: a test against a Colorado Plateau Mesozoic database // Earth and Planet. Sci. Lett. 2009. V. 288. № 1. P. 115–125.
- Fisher P.F., Bridgland D.R.* Analysis of pebble morphology // Clast Lithological Analysis / Ed. D.R. Bridgland. Cambridge: Quaternary Research Association, 1986. P. 43–72.
- Fu B., Mernagh T.P., Kita N.T., Kemp A.I.S., Valley J.W.* Distinguishing magmatic zircon from hydrothermal zircon: A case study from the Gidginbung high-sulphidation Au–Ag–(Cu) deposit, SE Australia // Chemical Geology. 2009. V. 259. P. 131–142.
- Gehrels G.E.* Introduction to detrital zircon studies of Paleozoic and Triassic strata in western Nevada and northern California // Special Paper of the Geological Society of America. 2000. № 347. P. 1–17.
- Gehrels G.E.* Detrital zircon U–Pb geochronology applied to tectonics // Annual Review of Earth and Planet. Sciences. 2014. V. 42. № 1. P. 127–149.
- Griffiths J.C., Currey J.R.* Sphericity and roundness of quartz grains // Geol. Soc. Amer. Bull. 1955. V. 66. P. 1075–1096.
- Guynn J., Gehrels G.E.* Comparison of detrital zircon age distributions in the K-S test. Tucson: University of Arizona, Arizona LaserChron Center, 2010. 16 p.
- International Chronostratigraphic Chart. Int. Commission on Stratigraphy. 2020 (<http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2020-01.pdf>).
- Krumbein W.C.* Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles // J. Sediment. Petrol. 1941. V. 11. № 2. P. 64–72.
- Kuznetsov N.B., Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Romanyuk T.V., Rud'ko S.V.* Pre-Mesozoic Crimea as a continuation of the Dobrogea platform: Insights from detrital zircons in Upper Jurassic conglomerates, Mountainous Crimea // Intern. J. Earth Sci. 2019. V. 108. № 7. P. 2407–2428.
- Nachtergaele S., De Grave J.* AI-Track-tive: open-source software for automated recognition and counting of surface semi-tracks using computer vision (artificial intelligence) // Geochronology. 2021. V. 3. № 1. P. 383–394.
- Nikishin A.M., Wannier M., Alekseev A.S., Almendinger O.A., Fokin P.A., Gabdullin R.R., Khudoley A.K., Kopaevich L.F., Mityukov A.V., Petrov E.I., Rubsova E.V.* Mesozoic to recent geological history of southern Crimea and the Eastern Black Sea region. Tectonic Evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus // Geol. Soc. London, Spec. Publ. 2015. V. 428. P. 241–264.
- Pettke T., Audetat A., Schaltegger U., Heinrich C.A.* Magmatic-to-hydrothermal crystallization in the W-Sn mineralized Mole Granite (NSW, Australia)—Part II: evolving zircon and thorite trace element chemistry // Chemical Geology. 2005. V. 220. P. 191–213.
- Pettijohn F.J.* Sedimentary Rocks / Second Edition. N. Y.: Harper and Brothers, 1957. 718 p.
- Powers M.S.* A new roundness scale for sedimentary particles // Journal of Sedimentary Petrology. 1953. V. 23. P. 117–119.
- Ramezani J., Dunning G.R., Wilson M.R.* Geologic setting, geochemistry of alteration, and U–Pb age of hydrothermal zircon from the Silurian Stog'er Tight gold prospect, Newfoundland Appalachians, Canada // Exploration and Mining Geology. 2000. V. 9. P. 171–188.
- Rubatto D.* Zircon: The Metamorphic Mineral // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2017. V. 83. № 1. P. 261–295.
- Rubin J.N., Henry C.D., Price J.G.* Hydrothermal zircons and zircon overgrowths, Sierra-Blanca Peaks, Texas // American Mineralogist. 1989. V. 74. P. 865–869.

- Rubin J.N., Henry C.D., Price J.G.* The mobility of zirconium and other “immobile” elements during hydrothermal alteration // *Chemical Geology*. 1993. V. 110. № 1–3. P. 29–47.
- Russell R.D., Taylor R.E.* Roundness and shape of Mississippi River sands // *J. Geol.* 1937. V. 45. P. 225–267.
- Schaltegger U., Pettke T., Audétat A., Reusser E., Heinrich C.A.* Magmatic-to-hydrothermal crystallization in the W–Sn mineralized Mole Granite (NSW, Australia) – Part I: crystallization of zircon and REE-phosphates over three million years – a geochemical and U–Pb geochronological study // *Chemical Geology*. 2005. V. 220. P. 215–235.
- Wadell H.* Volume shape and roundness of rock particles // *J. Geol.* 1932. V. 40. № 5.
- Wadell H.* Sphericity and roundness of rock particles // *J. Geol.* 1933. V. 41. № 3.
- Yang G., Chen R.-X., Zheng Y.-F., Xia Q.-X., Yu Y.-J., Li K., Hu Z., Gong B., Zha X.-P.* Multiple Episodes of Zircon Growth during Anatectic Metamorphism of Metasedimentary Rocks in Collisional Orogens: Constraints from Felsic Granulites in the Bohemian Massif // *J. of Earth Science*. 2023. V. 34. № 3. P. 609–639.

## A METHOD FOR ESTIMATING OF INTEGRAL ROUNDNESS INDEX FOR A DETRITAL ZIRCONS SET: A CASE OF THE SEQUENCES FROM THE CIMMERIDES OF THE MOUNTAINOUS CRIMEA

T. V. Romanyuk<sup>1, \*</sup>, P. D. Kotler<sup>2, 3, \*\*</sup>

<sup>1</sup> *Schmidt Institute Physics of the Earth, Russian Academy of Science, Bolshaya Gruzinskaya str., 10, bld. 1, Moscow, 123242 Russia*

<sup>2</sup> *Kazan Federal University, Kremlyevskaya str., 18, Kazan, 420111 Russia*

<sup>3</sup> *Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Science, Acad. Koptug ave., 3, Novosibirsk, 630090 Russia*

\* e-mail: [t.romanyuk@mail.ru](mailto:t.romanyuk@mail.ru)

\*\* e-mail: [pkotler@yandex.ru](mailto:pkotler@yandex.ru)

A technique that allows to evaluate the degree of roundness of detrital zircon grains on a five-point scale according to the degree of preservation of the vertices, edges and faces of the crystals is presented. Based on the results of the degree of roundness of individual grains, the integral index *SOs* is calculated for a sample from various stratigraphic units. The obtained data makes it possible to determine the proportion of grains of different classes in different strata, to assess the degree of similarity/difference of samples, which can be an additional criterion when dividing sedimentary sections. The proposed method is used to compare the roundness characteristics of detrital zircons from a number of sedimentary sequences of the Cimmerides of the Crimean Mountains. It is shown that the sandstones of the Chenka sequence, relative to the sandstones of the flysch sequences, are characterized by a higher proportion of unrounded and weakly rounded zircon grains and a virtual absence of completely rounded grains. The values of the integral roundness index *SOs* for zircons from sandstones of the Tauride Groupe have showed values of 3.41 and 3.95, and for the Chenka sequence – 2.55. Thus, a significant difference in *SOs* was recorded between the studied strata, which is also confirmed by the values of the mutual pair coefficients *p*, calculated using the Kolmogorov–Smirnov test.

*Keywords:* detrital zircons, roundness, integral roundness index, Cimmerides of the Crimean Mountains, Chenka sequence