

УДК 552.086

## КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ПЕТРОГРАФИЯ: ПОДХОДЫ И ПРИЛОЖЕНИЯ

Е. А. ТОЙБНЕР<sup>1)</sup>, В. П. САМОДУРОВ<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Рассмотрено текущее состояние количественной петрографии как научно-производственного направления геологии. Прогресс в этой области связан с развитием цифровой оптики и информационных технологий анализа изображений. Данное направление активно разрабатывается во многих смежных науках, но в петрографии пока преобладает классический описательный подход. Объектами изучения количественной макропетрографии являются штUFFы, керн скважин и полированные плиты, а микропетрографии – шлифы и аншлифы горных пород, поверхности скола пород и иммерсионные препараты. Цель исследований состоит в разработке и представлении новых методических подходов цифровой микроскопии для анализа руд, пород и минералов, а также возможностей информационных технологий анализа изображений для перехода от методов классического описания горных пород к количественной петрографии.

**Ключевые слова:** цифровая петрография; мультифокальная петрография; флуоресцентная микроскопия; сегментация изображений; количественный анализ пород.

---

### Образец цитирования:

Тойбнер ЕА, Самодуров ВП. Количественная петрография: подходы и приложения. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2021;2:91–101. <https://doi.org/10.33581/2521-6740-2021-2-91-101>

### For citation:

Taeubner AA, Samodurov VP. Quantitative petrography: approaches and applications. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2021;2:91–101. Russian. <https://doi.org/10.33581/2521-6740-2021-2-91-101>

---

### Авторы:

**Елена Анатольевна Тойбнер** – аспирантка кафедры региональной геологии факультета географии и геоинформатики. Научный руководитель – В. П. Самодуров.

**Владимир Петрович Самодуров** – кандидат геолого-минералогических наук, доцент; доцент кафедры региональной геологии факультета географии и геоинформатики.

### Authors:

**Alena A. Taeubner**, postgraduate student at the department of regional geology, faculty of geography and geoinformatics. [manul1994@mail.ru](mailto:manul1994@mail.ru)

<https://orcid.org/0000-0001-7428-8498>

**Vladimir P. Samodurov**, PhD (geology and mineralogy), doцент; associate professor at the department of regional geology, faculty of geography and geoinformatics.

[vladimir\\_samodurov@tut.by](mailto:vladimir_samodurov@tut.by)



## QUANTITATIVE PETROGRAPHY: APPROACHES AND APPLICATIONS

A. A. TAEUBNER<sup>a</sup>, V. P. SAMODUROV<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Belarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: A. A. Taeubner (manul1994@mail.ru)

Quantitative petrography is a scientific and industrial direction of geology, which made huge progress due to developments and inventions in information technology and optics in the last decade. This article is introducing the modern and scientific directions of quantitative petrography and describes their current state of art as well as methodical approaches and their application. The research objects of quantitative macropetrography are hand specimens, borehole cores and polished tiles, and of micropetrography are thin and polished sections of rocks samples, splitted rock surfaces and immersion preparations. The goal of the research is to develop and present new methodological approaches of digital microscopy for the analysis of ores, rocks and minerals, as well as to investigate the morphological image analysis capabilities for the transforming from the classical description methods to quantitative petrography.

**Keywords:** digital petrography; multifocal petrography; fluorescence microscopy; image segmentation; quantitative analysis of rocks samples.

### Введение

Цифровая петрография является современным быстро развивающимся научным направлением, объединяющим геологические, математические и физические методы и подходы к изучению руд, пород и минералов. Переход от классической описательной петрографии к цифровой произошел благодаря появлению цифровой аппаратуры, позволяющей измерять параметры цветности изображений изучаемых объектов. Керна скважин, штуфы и полированные плиты горных пород – объекты цифровой макропетрографии, а шлифы, аншлифы, поверхности скола пород и иммерсионные препараты – объекты микропетрографии.

В настоящее время цифровая микропетрография применяется в основном для фотодокументации шлифов горных пород, а цифровая макропетрография широко используется в практике исследований керна скважин для хранения литологической информации. Современные цифровые петрографические микроскопы отличаются от классических не только оптической системой, но и автоматизацией управления, а также программным обеспечением, позволяющим выполнять измерения и обработку результатов исследований. Таким образом, цифровая петрография может рассматриваться как аналитическая основа количественной петрографии – научного направления, активно развивающегося в настоящий момент.

Представленные в настоящей статье методические подходы мультифокальной петрографии (Z-стекинг) и ультрафиолетовой (УФ) петрографии пока не используются в практике геологических исследований в полной мере, так же как методы количественного анализа минеральных компонентов шлифов. Рассмотрение особенностей и возможностей этих научных направлений является задачей данной работы.

### Методы и подходы

Цифровой петрографический микроскоп отличается от классического отсутствием, во-первых, промежуточной линзы в тубусе, во-вторых, окуляров и объектива фотоаппарата, так как изображение шлифов передается объективом микроскопа непосредственно на матрицу фотокамеры. Это существенно уменьшает aberrации оптической системы микроскопа. Качество изображения в данном случае определяется качеством объектива. Классическая оптическая система непригодна для целей цифровой петрографии. Микропетрографические исследования могут проводиться в светлом и темном поле в режимах «на прохождение» и «на отражение». В классической петрографии шлифы горных пород обычно исследуются в светлом поле в режиме «на прохождение», поэтому на качество изображения влияют оптика конденсора и свойства источника света.

Большинство микроскопов снабжены галогенными лампами накаливания, которые при регулировке напряжения заметно меняют цветность. Для получения воспроизводимых количественных измерений цветности требуется калибровка цвета источника с использованием балансирующего светофильтра дневного света. Этот фильтр, а также нейтральные фильтры ND входят в состав современных цифровых микроскопов. Без корректировки освещения цветность изображений значительно меняется, и они становятся непригодными для количественного анализа.

Оптическое разрешение микроскопа зависит от числовой апертуры объективов и составляет от 4,19 мкм для объектива с увеличением  $\times 2$  до 0,24 мкм для объектива с увеличением  $\times 100$ . Цифровая



камера микроскопа обладает повышенной чувствительностью как для большого изображения, так и для его резкого захвата при увеличении. Например, 8-битовая камера Nikon серии DS-Fi2 имеет возможность захватывать микроструктуру объекта при максимальном разрешении  $2560 \times 1920$  пк.

Современные цифровые микроскопы снабжены управляемыми моторизованными предметными столиками, что позволяет не только создавать фотографические мозаики шлифов большого размера, но и регистрировать мультифокальные изображения.

Макросъемка объемных образцов (штурфов, полированных плит) и керна скважин выполняется с помощью цифровых фотокамер. Оцифровка керна скважин в настоящее время является нормальной практикой для крупных компаний, где, кроме кернохранилищ и полевых описаний, имеется специализированная камеральная аппаратура, позволяющая получать фотографии как в видимом диапазоне света, так и в ультрафиолете. Результаты фотодокументации керна в полевых условиях ухудшаются из-за вариаций освещения, что требует последующей цветокоррекции фотографий. В лабораторных сканерах имеется своя система освещения, и съемка керна выполняется в стабильных условиях.

Цифровая микросъемка шлифов и аншлифов горных пород, различных препаратов, включая иммерсионные, позволяет получать цифровые изображения для последующего их использования при решении различных производственных задач, таких как подсчет индекса мафичности пород, классификация минералов и определение их содержания, а также установление количественных морфологических характеристик зерен [1–8].

Цифровые методы анализа керна скважин и шлифов получили распространение в нефтегазовой геологии. Они используются для оценки качества резервуаров углеводородов с учетом таких параметров, как пористость и проницаемость, информации о распределении размеров зерен в заданном литологическом интервале. Разработаны эффективные методы количественных исследований размеров зерен в составе пород, порового пространства и их влияния на проницаемость [9; 10]. К настоящему времени появились разработки, позволяющие автоматизировать количественное определение непрозрачных рудных минералов и структурно-текстурных характеристик руд для улучшения технологий их переработки [11; 12]. Однако в шлифах горных пород многие особенности минералов, в частности двойникование, угол погасания, плеохроизм, наличие вулканического стекла либо канадского бальзама, создают дополнительные трудности для автоматизированной идентификации минералов. На рис. 1 представлены изменения оптических характеристик минералов на примере микрофотографий шлифа габбро, снятых без анализатора и в скрещенных николях, в исходной ориентации и с поворотом. Из рис. 1 видно, что, повернув шлиф на  $45^\circ$ , можно добиться полного просветления всех зерен пироксенов, а также отличить от них рудные минералы.

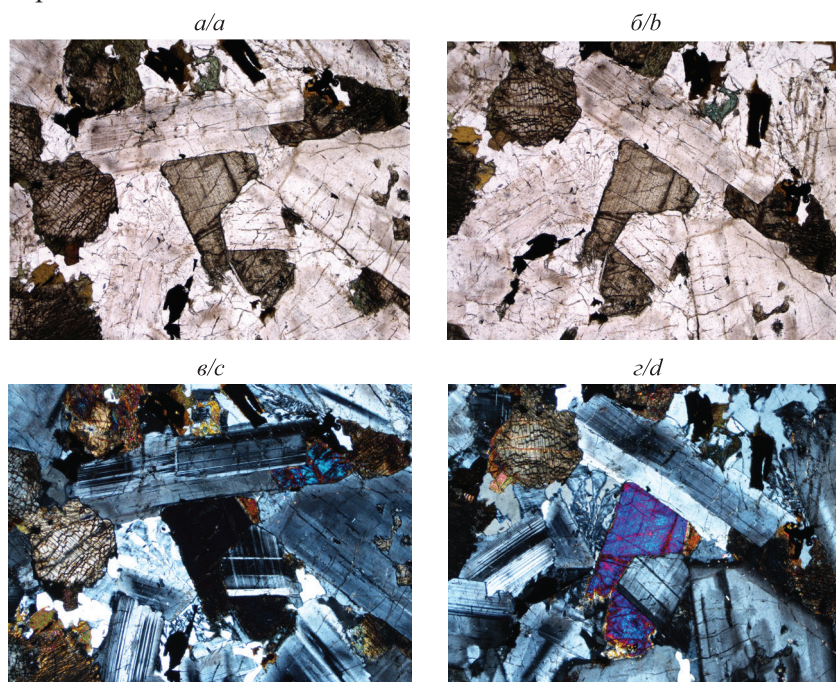


Рис. 1. Микроизображения габбро в исходной ориентации без анализатора (а) и в скрещенных николях (в), а также при повороте на  $45^\circ$  без анализатора (б) и в скрещенных николях (г). Размер поля зрения – 6,25 мм

Fig. 1. Thin sections microimages of gabbro. Initial plane polarised light (PPL) image (a) and cross polarised light (CPL) image (c). Rotated by  $45^\circ$  PPL image (b) and CPL image (d). Field of view – 6.25 mm





Разнообразие кристаллооптических характеристик минералов можно учесть в программах идентификации последних, но они будут оказывать влияние на последовательность определения минералов, кроме того, полностью автоматизированной программы для всех типов пород в настоящее время не существует.

### Результаты и их обсуждение

Возможности современных цифровых микроскопов существенно расширились благодаря автоматизации их управления (системы смены объективов, установки освещения, управления диафрагмами и столиком микроскопа, а также системы высокоточной моторизованной Z-фокусировки объективов). Метод мультифокальной петрографии (Z-стекинга) используется в биомедицине, но пока не нашел широкого применения в петрографии, хотя он открывает новые возможности исследований. Хорошо известна проблема недостатка глубины резкости короткофокусных объективов микроскопа. Малая глубина резкости объективов обеспечивает качественное изображение только в ограниченном диапазоне высоты, а остальная часть изображения остается нерезкой. Моторизованный цифровой микроскоп позволяет выполнить захват серии изображений изучаемого объекта при разных уровнях фокуса. Эта серия изображений может быть собрана в единое изображение (стек) программными средствами.

Результатом Z-стекинга является расширенное фокальное изображение (*extended focus image*, EFI). На рис. 2 представлена микрофотография Z-стека золота в составе тяжелой фракции золотоносных песков. Расширенное фокальное изображение здесь составлено из 50 исходных фотографий. В итоге все детали изображения находятся в фокусе по всему диапазону толщины препарата и без потери разрешающей способности прибора. С помощью этой методики возможно определение толщины зерен в составе анализируемого объекта.

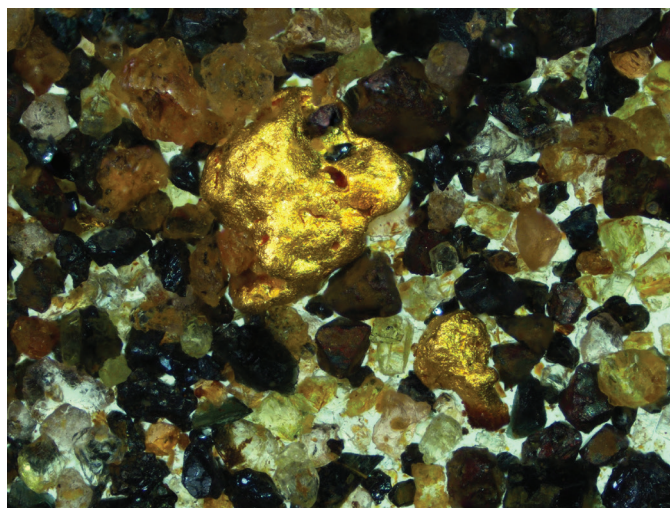


Рис. 2. Расширенное фокальное изображение золота  
в составе тяжелой фракции золотоносных песков.  
Размер поля зрения – 6,25 мм

Fig. 2. Extended focal image of gold  
in the heavy fraction of the auriferous sands.  
Field of view – 6.25 mm

Микрофотографии, полученные методом Z-стекинга, сохраняют цветность анализируемых объектов, в отличие, например, от сероцветных микрофотографий сканирующей электронной микроскопии. Помимо этого, Z-стекинг позволяет исследовать сколы горных пород, так как он работает в режиме «на отражение» при боковом освещении поверхности. Хорошие результаты данный метод показывает и в режиме «на прохождение» в иммерсионных препаратах и других прозрачных объектах. Микрофотография, представленная на рис. 2, получена с использованием двух источников света – подсветки в режиме «на прохождение» и бокового освещения в режиме «на отражение». В итоге непрозрачные минералы, в том числе золотины, проявляют себя в отраженном свете, а прозрачные минералы классифицируются по форме, цвету, дефектам и включениям в проходящем свете. Возможность изучения поверхности скола пород методом Z-стекинга в режиме «на отражение» позволяет выполнять многие работы без изготовления шлифов горных пород. Это существенно ускоряет и удешевляет подготовку пород к микропетрографическим исследованиям.



Метод Z-стекинга может быть использован в еще одном научном направлении – УФ-микроструктурологии. Современные цифровые эпифлуоресцентные микроскопы снабжены источниками УФ-света и светофильтрами для проведения УФ-исследований. Такие исследования широко используются в микробиологии, но в микроструктурологии они до настоящего времени не осуществляются. Классическим подходом в петрографии является изучение шлифов горных пород в проходящем свете, а УФ-исследования выполняются в отраженном свете. При стандартной толщине шлифов 0,03 мм большинство минералов становятся прозрачными, и поэтому УФ-излучение проходит через шлиф, слабо взаимодействуя с минеральными зернами.

Наоборот, в массивных образцах в режиме «на отражение» УФ-излучение полностью поглощается, вызывая флуоресценцию минералов. Эпифлуоресцентный микроскоп снабжен двойным светофильтром, позволяющим направлять УФ-излучение на поверхность образца через объектив и пропускать видимый свет люминесценции на матрицу фотоаппарата. Источником УФ-света в наших исследованиях была ртутная лампа C-HGFI. Качество УФ-микрофотографий, как правило, повышается, поскольку разрешение микроскопа зависит от длины волны света. Улучшению качества изображений способствует то обстоятельство, что зерна флуоресцирующих минералов сами выступают источниками света, а не освещаются конденсором, который вносит дополнительные аберрации.

Флуоресценция вызывается микроэлементами-активаторами [13] и является одним из типоморфных признаков минералов, так как цветность УФ-свечения в данном месторождении сохраняется, поскольку физико-химические условия формирования пород в пределах месторождения стабильны. Повышенное содержание люминофоров в составе минералов обычно связано с хемогенными и гидротермальными процессами, растворы которых обогащены активаторами.

Математические методы служат основой для количественной микро- или макропетрографии. Данное научное направление в настоящее время находится в развитии, и отдельные сегменты этого методического подхода разработаны в разной степени. Основными этапами здесь являются сбор цифровой информации (микро- и макрофотографий), подготовка цифровых изображений к анализу и, наконец, количественный анализ различных параметров – содержания минералов в породе, их морфологических свойств, структурно-текстурных характеристик, статистических параметров распределения.

Цифровые фотографии макрообъектов можно получить с помощью современных фотокамер, а также путем сканирования специальными приборами отполированных образцов горных пород либо керн скважин. Микроизображения же формируются из сигналов, подаваемых объективом микроскопа непосредственно на светочувствительную матрицу камеры. Получаемые цифровые фотографии не всегда можно использовать для дальнейшего количественного анализа руд, пород и минералов. Обычно приходится применять коррекцию исходных фотографий для устранения различных дефектов, связанных с вариациями освещения и съемки, дефектами изучаемых объектов и другими негативными эффектами.

Предварительная обработка позволяет упростить и улучшить последующие этапы анализа изображений. К наиболее распространенным методам подготовки цифровых фотографий к количественному анализу относятся:

- деконволюция (*deconvolution*) – позволяет убрать эффекты размытия, вызванные сверткой (пятна, размытие) из-за функции рассеяния точек изображения;
- вычитать фон (*subtract background*) – удаляет гладкие непрерывные фоны и подходит для работы с изображениями иммерсионных препаратов;
- размытие по Гауссу (*Gaussian blur*) – используется для устранения шумов на изображении;
- выделение краев (*find edges*) – применяется для выделения резких изменений интенсивности в активном изображении с помощью оператора Собеля;
- регулировка порога (*thresholding*) – обеспечивает простейшую сегментацию изображения горной породы на маски отдельных минералов, позволяя эффективно определять процентное содержание анализируемого минерала в составе породы.

Этап подготовки цифровых фотографий к анализу включает также пространственную калибровку изображений – установление соотношения между размером пикселя и стандартной единицей измерения (в макропетрографии стандартной единицей измерения является миллиметр, в микропетрографии – микрометр). Без этого этапа многие количественные параметры теряют физический смысл, так как исходные результаты были получены в пикселях. Дальнейшая работа с откалиброванным изображением предполагает два направления: изучение отдельных минералов либо групповой анализ. В первом случае анализируется конкретное зерно или регион интереса (*region of interest*, ROI), во втором – маска изучаемого минерала в пределах всего изображения.

Одной из основных задач количественной петрографии является определение минералогического состава изучаемой породы. Это направление исследований основано на технологиях сегментации



и последующей классификации объектов, представленных на цифровых изображениях. Существуют два подхода к процедуре классификации объектов цифровой фотографии: без обучения и с обучением. В первом случае используется готовая нейронная сеть, которая самостоятельно выделяет классы, во втором случае предлагается вручную выделить набор данных, характерных для каждого класса объектов, и тем самым обучить метод или сеть [14].

Главным параметром, по которому осуществляется выделение минералов, являются их цветовые характеристики, а определение горных пород происходит на основании минералогического состава, структуры и текстуры пород. Из-за разнообразия кристаллооптических свойств минералов последовательность анализа минералогического состава может меняться. Например, при равнозначных условиях съемки полированной плиты гранита и штуфа стадийность выделения породообразующих минералов будет одинакова. Однако если попробовать применить данную технологию сегментации к шлифам горных пород, то фактически будет получен неудовлетворительный результат, поскольку в шлифах горных пород кристаллооптические свойства минералов иные (цвет минералов, двойникование, цвета интерференции, угол погасания, плеохроизм, наличие стекловатой матрицы либо канадского бальзама).

К настоящему времени разработаны алгоритмы машинного обучения с набором функций для сегментации изображений, пригодные для анализа горных пород. Пример количественного анализа макроизображений, полученных путем сканирования отполированных образцов гранитов, представлен на рис. 3. Сегментация минералов выполнена с помощью плагина *Trainable Weka Segmentation* (TWS) программного продукта *ImageJ*. Созданы классы данных, каждому из которых соответствует породообразующий минерал: Qtz – кварц, Kfs – калиевый полевой шпат, Pl – плагиоклаз, Bt – биотит. Таким образом, была сформирована база данных для обучения классификатора (дерева решений) для анализа семейства гранитов по их макроизображениям.

На тестовой выборке из нескольких изображений производилось обучение классификатора. Далее с помощью таких метрик, как точность (*precision*) и полнота (*recall*), оценивалось качество классификации, при необходимости база данных дополнялась новыми ROI для класса с максимальной ошибкой. В результате по каждому макроизображению гранитов были получены классификационные изображения (см. рис. 3).

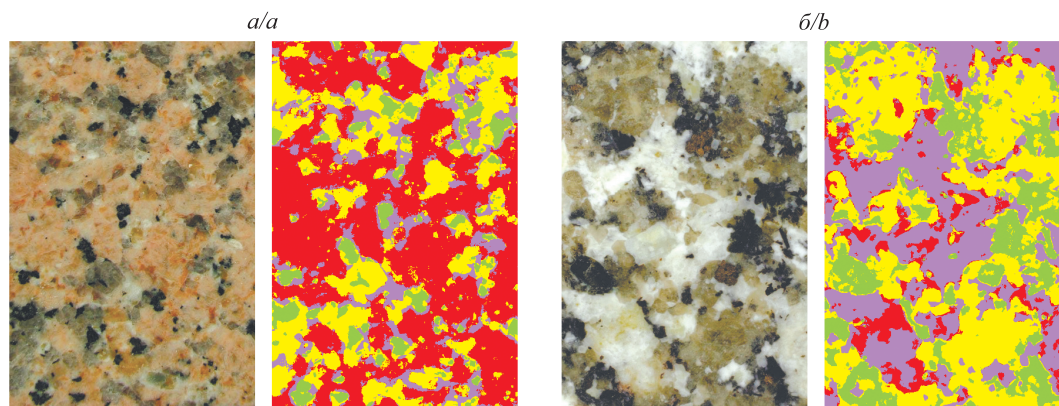


Рис. 3. Исходные (слева) и результирующие (справа) макроизображения образцов гранитов: а – образец 1; б – образец 2.

Идентифицированные классы по цвету:  
желтый – Qtz, красный – Kfs, синий – Pl, зеленый – Bt

Fig. 3. Original (on the left) and result images (on the right) of granite samples: а – sample 1; б – sample 2.

Identified classes by color:  
yellow – Qtz, red – Kfs, blue – Pl, green – Bt

В эксперименте участвовал ансамбль решающих деревьев (*fast random forest*), состоящий из 200 деревьев решений. Процент ошибок варьировался от 3,531 до 6,308 %. Чаще всего алгоритм ошибался при резком переходе к гранитам с минимальным содержанием калиевого полевого шпата (Kfs), однако эта погрешность исчезла после накопления критического количества данных. Рассматриваемый подход имеет существенные преимущества: кристаллические породы, содержащие калиевые полевые шпаты и плагиоклазы, плохо поддаются классификации из-за вариаций структурной упорядоченности, в то время как параметры цветности этих минералов являются надежным критерием для их классификации. Результаты количественного минералогического анализа исследуемых образцов гранитов представлены в табл. 1.



Таблица 1

## Результаты количественного анализа образцов семейства гранитов

Table 1

## Results of quantitative analysis of granite samples

Исследуемые образцы	Количество зерен				Содержание, %			
	Qtz	Kfs	Pl	Bt	Qtz	Kfs	Pl	Bt
Образец 1	1386	677	1277	723	31,680	45,554	14,424	7,155
Образец 2	447	302	438	247	32,141	9,068	43,629	15,152

Результаты применения данной технологии для анализа микроизображений шлифов горных пород на примере чарнокитов Восточной Антарктиды представлены в табл. 2. Микросъемка произведена с помощью цифрового микроскопа Nikon серии Eclipse Ni-E, оснащенного камерой Nikon серии DS-Fi2. Полученные микрофотографии представляют собой пары изображений, снятых в режимах PPL (без анализатора) и CPL (с анализатором). Сегментация выполнена по трем группам минералов: силикатные (Pl, Kfs и Qtz), мафические (Bt, Hbl, Орх и Срх) и рудные (rudn).

Для данных образцов содержание минералов было определено как автоматическим, так и классическим способом. Сравнение полученных результатов представлено на рис. 4. На этой диаграмме прослеживается погрешность (до  $\pm 10\%$ ) определения содержания минералов визуальным (классическим) способом.

Таблица 2

## Результаты количественного анализа образцов чарнокитов

Table 2

## Results of quantitative analysis of charnockite samples

Номер образца	Содержание, %		
	Силикатные минералы	Мафические минералы	Рудные минералы
11(2)	92,58	6,73	0,69
17(2)	94,11	4,17	1,72
18	81,49	14,66	3,85
22	92,51	7,48	0,01
34	92,66	5,80	1,54
56	96,89	2,73	0,39
58	85,28	12,97	1,75

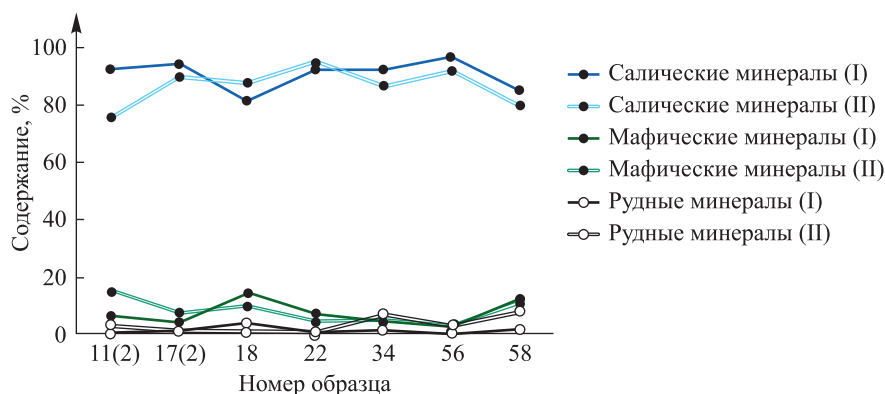


Рис. 4. Процентное содержание групп минералов, подсчитанное автоматическим (I) и классическим (II) способами

Fig. 4. The percentages of mineral groups calculated by automatic (I) and classical (II) methods



Макропетрография позволяет не только произвести количественный анализ, но и определить морфологические параметры минералов. Дескрипторы формы, используемые в данной работе, основаны на геометрических измерениях двух классов: исследуемых объектов и охватывающих их оболочек. Исследуемые объекты обладают следующими параметрами: *area* – площадь объекта,  $\text{пк}^2$ ; *perimeter* – длина внешней границы объекта,  $\text{пк}$ ; *height* – высота объекта; *width* – ширина объекта; *major axis* – конечные точки ( $x_1, y_1$  и  $x_2, y_2$ ) самого длинного отрезка, который можно провести через объект; *minor axis* – конечные точки ( $x_1, y_1$  и  $x_2, y_2$ ) самого длинного отрезка, который можно провести через объект перпендикулярно *major axis*; *axis length long* – длина самой длинной оси объекта; *axis length short* – длина самого короткого отрезка, который можно провести через объект перпендикулярно *major axis*. Длины осей вычисляются из координат их конечных точек ( $x_1, y_1$  и  $x_2, y_2$ ).

Оболочки, охватывающие объект, включают два типа: ограничивающий прямоугольник (*bounding box*) и выпуклую оболочку (*convex hull*). Ограничивающий прямоугольник представляет собой наименьший прямоугольник, охватывающий исследуемый объект, и описывается следующими измерениями: *BX* и *BY* – координаты верхнего левого угла прямоугольника; *width (bounding box)* – ширина ограничивающего объект прямоугольника; *length (bounding box)* – длина ограничивающего объект прямоугольника. Выпуклая оболочка определяется как наименьшая выпуклая форма, которая содержит объект, и характеризуется следующими параметрами: *convex area* – площадь выпуклой оболочки, охватывающей объект,  $\text{пк}^2$ ; *convex perimeter* – периметр выпуклой оболочки, охватывающей объект,  $\text{пк}$ .

Существуют дескрипторы формы, которые чувствительны только к отклонениям определенного типа округлости (*circularity*): выпуклость (*convexity*), позволяющая более точно измерить неровность объекта, и округлость (*roundness*), исключающая локальные неровности [15, р. 29]. Выпуклость (*convexity*) – это относительная величина, на которую объект отличается от выпуклого объекта. Степень выпуклости может быть найдена как отношение периметра выпуклой оболочки объекта к периметру самого объекта. Компактность (*compactness*) определяется как отношение площади объекта к площади круга с таким же периметром (максимальное принимаемое значение – 1). Целостность (*solidity*) – дескриптор, который описывает степень целостности, массивности объекта и может быть получен как отношение площади объекта к площади охватывающей его выпуклой оболочки. Соотношение сторон (*aspect ratio*) – это соотношение между высотой и шириной объекта. Эксцентриситет (*eccentricity*) – отношение длины самого длинного отрезка, который можно провести через объект перпендикулярно *major axis*, к длине самой длинной оси объекта (величина варьирует от 0 до 1). Данный дескриптор формы также известен как эллиптичность (*ellipticity*). Удлинение (*elongation*) – это соотношение между шириной и длиной ограничивающего объект прямоугольника.

В качестве примера для морфологического анализа отобрана маска зерен биотита. Всего было определено и проанализировано 1250 зерен этого минерала в исследуемом образце гранита. В табл. 3 представлены параметры и дескрипторы лишь первых пяти зерен, ввиду того что полная таблица содержит большой объем данных.

Таблица 3

Морфологические параметры и дескрипторы формы зерен биотита в граните

Table 3

Morphological parameters and shape descriptors of biotite granite grains

Номер зерна	Морфологические параметры				Дескрипторы формы					
	<i>area</i> , $\text{мм}^2$	<i>perimeter</i> , $\text{мм}$	<i>major axis</i> , $\text{пк}$	<i>minor axis</i> , $\text{пк}$	<i>roundness</i>	<i>convexity</i>	<i>compactness</i>	<i>solidity</i>	<i>aspect ratio</i>	<i>eccentricity</i>
1	0,05	1,20	6,25	1,43	0,23	1,00	0,47	0,74	4,38	0,23
2	0,08	1,10	4,16	3,06	0,74	1,00	0,81	0,80	1,36	0,74
3	9,39	13,90	41,30	37,50	0,91	0,82	0,61	0,83	1,10	0,91
4	0,25	2,39	9,59	4,25	0,44	1,00	0,54	0,76	2,26	0,44
5	0,02	0,37	2,26	1,13	0,50	1,00	1,00	1,00	2,00	0,50

Конечными результатами количественного анализа минералов являются статистические параметры. К наиболее распространенным параметрам, определяемым для некоторого множества значений величины, относятся минимальное (*Min*) и максимальное (*Max*) значения, среднее арифметическое значение (*Mean*), медиана значений (*Median*), самое частое значение в наборе данных (*Mode*), а также





стандартное отклонение для набора данных (*StdDev*). Последний параметр характеризует среднее отклонение случайной величины от среднего арифметического значения при конечном числе измерений.

Кроме того, стоит отметить статистические параметры, описывающие отдельные характеристики цвета (например, яркость), а также значение серого (для изображений в градациях серого). К ним относятся параметры *Min*, *Max*, *Mean*, *Modal gray level*, которые представляют минимальное и максимальное, среднее и наиболее часто встречающееся значения серого одного объекта или ROI соответственно, а также *Median* – медиана значений пикселей.

*Integrated density (IntDen)* – это сумма значений пикселей в целом изображении либо определенном ROI, эквивалентная произведению площади и среднего значения серого. *Raw integrated density (RawIntDen)* представляет собой необработанную интегрированную плотность, также является суммой значений пикселей и в неоткалиброванном изображении равняется *IntDen*.

Для анализа яркости пикселей, входящих в ROI, используется стандартное отклонение *StdDev*, а для определения процента пикселей на изображении, которые были выделены с применением метода *threshold*, – параметр *Area fraction*. Дополнительными статистическими параметрами, которыми можно воспользоваться при анализе интенсивности пикселей, являются пространственные средневзвешенные моменты 3-го порядка (*Skewness*) и 4-го порядка (*Kurtosis*).

Еще одной полезной характеристикой объекта исследования можно считать *Feret's diameter*. Это не диаметр в его привычном понимании, а общее название группы диаметров, которые происходят из расстояния между любыми двумя точками касательных к контуру выделения ROI в четко определенном положении. К данной характеристике относятся такие параметры, как минимальный и максимальный диаметр (*MinFeret* и *MaxFeret* соответственно) после рассмотрения во всех возможных положениях от 0 до 180° (*FeretAngle*), начальные координаты (*FeretX* и *FeretY*).

Названные параметры и дескрипторы разработаны в основном в рамках смежных наук и в петрографии в полной мере пока не применяются. Здесь сохраняется классический описательный подход, несмотря на очевидные преимущества методов количественного анализа.

## Заключение

Цифровая петрография возникла и активно развивается в последние десятилетия в связи с появлением цифровой фотографии. Современные моторизованные микроскопы позволяют автоматизировать многие процессы съемки микрофотографий, в том числе получение мультифокальных изображений методом Z-стекинга. В сочетании с эпифлуоресцентным УФ-оборудованием появилась возможность изучения УФ-свойств горных пород, их типоморфизма. Параллельное развитие математических методов анализа изображений позволило использовать исходные цифровые данные для количественного анализа различных характеристик изучаемых горных пород.

Современный программно-инструментальный базис включает возможности определения морфологических параметров минералов (площадь и периметр объекта, длины осей и пр.) и таких дескрипторов формы, как округлость, выпуклость, компактность, целостность, соотношение сторон, эксцентриситет и удлинение. С помощью количественного анализа могут быть изучены как отдельные минералы в составе породы, выделяемые с помощью метода *threshold*, так и весь набор минералов после сегментации цифровых фотографий. Таким образом, возможность анализа цифровых фотографий горных пород является основой для нового научного направления – количественной петрографии. В практике геолого-разведочных работ количественная петрография пока не используется в полной мере, хотя перспективы развития этого научного направления очевидны.

Количественная петрография не является самодостаточным методом исследования. Она не обладает свойствами идентификации минеральных компонентов в составе исследуемой породы, для этого используется комплекс современных физико-химических методов исследований. Однако такие исследования проводятся на единичных пробах, при этом истинное распределение минералов в породе теряется. Количественная петрография – надежный метод анализа пространственного распределения изучаемого компонента в породе.

## Библиографические ссылки

1. Marschallinger R, Hofmann P. The application of object based image analysis to petrographic micrographs. In: Méndez-Vilas A, Díaz J, editors. *Microscopy: science, technology, applications and education*. Badajoz: Formatex Research Center; 2010. p. 1526–1532.
2. Василёнок ЕА, Самодуров ВП. Определение индекса мафичности магматических пород по данным цифровой петрографии. В: Махнач АА, Астапенко ВН, Демидова СВ, Зуй ВИ, Кручек СА, Кутырло ВЭ и др., редакторы. *Проблемы геологии Беларуси и смежных территорий. Материалы Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рож-*



дения академика НАН Беларуси Александра Семеновича Махнача; 21–22 ноября 2018 г.; Минск, Беларусь. Минск: СтройМедиаПроект; 2018. с. 285–288.

3. Polat Ö, Polat A, Ekici T. Automatic classification of volcanic rocks from thin section images using transfer learning networks. *Neural Computing and Applications*. 2021;33(18):11531–11540. DOI: 10.1007/s00521-021-05849-3.

4. Izadi H, Sadri J. Application of pattern recognition in mineral segmentation and identification. In: *Proceedings of the International conference on pattern recognition and artificial intelligence; 2018 May 13–17; Montreal, Canada*. Montreal: Centre for Pattern Recognition and Machine Intelligence, Concordia University; 2018. p. 433–438.

5. Cheng Su, Sheng-jia Xu, Kong-yang Zhu, Xiao-can Zhang. Rock classification in petrographic thin section images based on concatenated convolutional neural networks. *Earth Science Informatics*. 2020;13(4):1477–1484. DOI: 10.1007/s12145-020-00505-1.

6. Thompson S, Fueten F, Bockus D. Mineral identification using artificial neural networks and the rotating polarizer stage. *Computers & Geosciences*. 2001;27(9):1081–1089. DOI: 10.1016/S0098-3004(00)00153-9.

7. Slipek B, Młynarczuk M. Application of pattern recognition methods to automatic identification of microscopic images of rocks registered under different polarization and lighting conditions. *Geology, Geophysics & Environment*. 2013;39(4):373–384. DOI: 10.7494/geol.2013.39.4.373.

8. Arganda-Carreras I, Kaynig V, Rueden C, Elieci K, Schindelin J, Cardona A, et al. Trainable Weka Segmentation: a machine learning tool for microscopy image segmentation. *Bioinformatics*. 2017;33(15):2424–2426. DOI: 10.1093/bioinformatics/btx180.

9. Buono A, Fullmer S, King H, Sansone M, Lamberti B, Peterson K. Quantitative digital petrography: thin section to plug scale quantification of pore space, grains and connectivity. In: *Mountjoy carbonate research conference. Carbonate pore systems: abstracts; 2017 June 25–29; Austin, Texas, USA*. [S. l.]: [s. n.]; 2017. p. 12.

10. Hinds OI, Duller RA, Walker RP, Wells BT, Worden RH. Enhanced two dimensional grain size analysis through the use of calibrated digital petrography. *Search and Discovery* [Internet]. 2014 [cited 2021 July 17]:41461. Available from: [https://www.searchanddiscovery.com/pdfz/documents/2014/41461hinds/ndx\\_hinds.pdf.html](https://www.searchanddiscovery.com/pdfz/documents/2014/41461hinds/ndx_hinds.pdf.html).

11. Poliakov A, Donskoi E. Automated relief-based discrimination of non-opaque minerals in optical image analysis. *Minerals Engineering*. 2014;55:111–124. DOI: 10.1016/j.mineng.2013.09.014.

12. Donskoi E, Manuel JR, Napugoda S, Poliakov A, Raynlyn T, Austin P, et al. Automated optical image analysis of goethitic iron ores. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2020:1–11. DOI: 10.1080/25726641.2019.1706375.

13. Марфуни АС. Спектроскопия, люминесценция и радиационные центры в минералах. Москва: Недра; 1975. 327 с.

14. Василёнок ЕА, Самодуров ВП. Количественный анализ цифровых изображений горных пород. В: Лукашёв ОВ, Санько АФ, Зуй ВИ, Творонович-Севрук ДЛ, редакторы. *Современные проблемы геохимии, геологии и поисков месторождений полезных ископаемых. Материалы Международной научной конференции, посвященной 110-летию со дня рождения академика Константина Игнатьевича Лукашёва (1907–1987); 23–25 мая 2017 г.; Минск, Беларусь. Часть 2*. Минск: Право и экономика; 2017. с. 4–6.

15. Wirth MA. Lecture 10. Shape analysis and measurement [Internet]. In: *Image processing algorithms and applications*. Guelph: University of Guelph; 2004 [cited 2021 July 17]. Available from: <http://www.cyto.purdue.edu/cdroms/micro2/content/education/wirth10.pdf>.

## References

1. Marschallinger R, Hofmann P. The application of object based image analysis to petrographic micrographs. In: Méndez-Vilas A, Díaz J, editors. *Microscopy: science, technology, applications and education*. Badajoz: Formatex Research Center; 2010. p. 1526–1532.

2. Vasilionak AA, Samodurov VP. Mafic index of the igneous rocks definition by the digital petrography data. In: Makhnach AA, Astapenko VN, Demidova SV, Zui VI, Kruchek SA, Kutyrlo VE, et al., editors. *Problemy geologii Belarusi i smezhnykh territorii. Materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 100-letiyu so dnya rozhdeniya akademika NAN Belarusi Aleksandra Semenovicha Makhnacha; 21–22 noyabrya 2018 g.; Minsk, Belarus* [Problems of the geology of Belarus and adjacent territories. Proceedings of the International scientific conference, dedicated to the 100<sup>th</sup> anniversary of the academician of the National Academy of Sciences of Belarus Alexander Semenovich Makhnach; 2018 November 21–22; Minsk, Belarus]. Minsk: StroiMediaProekt; 2018. p. 285–288. Russian.

3. Polat Ö, Polat A, Ekici T. Automatic classification of volcanic rocks from thin section images using transfer learning networks. *Neural Computing and Applications*. 2021;33(18):11531–11540. DOI: 10.1007/s00521-021-05849-3.

4. Izadi H, Sadri J. Application of pattern recognition in mineral segmentation and identification. In: *Proceedings of the International conference on pattern recognition and artificial intelligence; 2018 May 13–17; Montreal, Canada*. Montreal: Centre for Pattern Recognition and Machine Intelligence, Concordia University; 2018. p. 433–438.

5. Cheng Su, Sheng-jia Xu, Kong-yang Zhu, Xiao-can Zhang. Rock classification in petrographic thin section images based on concatenated convolutional neural networks. *Earth Science Informatics*. 2020;13(4):1477–1484. DOI: 10.1007/s12145-020-00505-1.

6. Thompson S, Fueten F, Bockus D. Mineral identification using artificial neural networks and the rotating polarizer stage. *Computers & Geosciences*. 2001;27(9):1081–1089. DOI: 10.1016/S0098-3004(00)00153-9.

7. Slipek B, Młynarczuk M. Application of pattern recognition methods to automatic identification of microscopic images of rocks registered under different polarization and lighting conditions. *Geology, Geophysics & Environment*. 2013;39(4):373–384. DOI: 10.7494/geol.2013.39.4.373.

8. Arganda-Carreras I, Kaynig V, Rueden C, Elieci K, Schindelin J, Cardona A, et al. Trainable Weka Segmentation: a machine learning tool for microscopy image segmentation. *Bioinformatics*. 2017;33(15):2424–2426. DOI: 10.1093/bioinformatics/btx180.

9. Buono A, Fullmer S, King H, Sansone M, Lamberti B, Peterson K. Quantitative digital petrography: thin section to plug scale quantification of pore space, grains and connectivity. In: *Mountjoy carbonate research conference. Carbonate pore systems: abstracts; 2017 June 25–29; Austin, Texas, USA*. [S. l.]: [s. n.]; 2017. p. 12.

10. Hinds OI, Duller RA, Walker RP, Wells BT, Worden RH. Enhanced two dimensional grain size analysis through the use of calibrated digital petrography. *Search and Discovery* [Internet]. 2014 [cited 2021 July 17]:41461. Available from: [https://www.searchanddiscovery.com/pdfz/documents/2014/41461hinds/ndx\\_hinds.pdf.html](https://www.searchanddiscovery.com/pdfz/documents/2014/41461hinds/ndx_hinds.pdf.html).



11. Poliakov A, Donskoi E. Automated relief-based discrimination of non-opaque minerals in optical image analysis. *Minerals Engineering*. 2014;55:111–124. DOI: 10.1016/j.mineng.2013.09.014.
12. Donskoi E, Manuel JR, Hapugoda S, Poliakov A, Raynlyn T, Austin P, et al. Automated optical image analysis of goethitic iron ores. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2020:1–11. DOI: 10.1080/25726641.2019.1706375.
13. Marfunin AS. *Spektroskopiya, lyuminesentsiya i radiatsionnye tsentry v mineralakh* [Spectroscopy, luminescence and radiation centers in minerals]. Moscow: Nedra; 1975. 327 p. Russian.
14. Vasilionak AA, Samodurov VP. [Quantitative analysis of digital images of rocks]. In: Lukashev OV, San'ko AF, Zui VI, Tvoronovich-Sevruk DL, editors. *Sovremennye problemy geokhimii, geologii i poiskov mestorozhdenii poleznykh iskopayemykh. Materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 110-letiyu so dnya rozhdeniya akademika Konstantina Ignat'evicha Lukasheva (1907–1987); 23–25 maya 2017 g.; Minsk, Belarus'. Chast' 2* [Modern problems of geochemistry, geology and prospecting for mineral deposits. Materials of the International scientific conference, dedicated to the 110<sup>th</sup> anniversary of the birth of the academician Konstantin Ignatievich Lukashev (1907–1987); 2017 May 23–25; Minsk, Belarus. Part 2]. Minsk: Pravo i ekonomika; 2017. p. 4–6. Russian.
15. Wirth MA. Lecture 10. Shape analysis and measurement [Internet]. In: *Image processing algorithms and applications*. Guelph: University of Guelph; 2004 [cited 2021 July 17]. Available from: <http://www.cyto.purdue.edu/cdroms/micro2/content/education/wirth10.pdf>.

Получена 08.05.2021 / исправлена 01.10.2021 / принята 01.10.2021.  
Received 08.05.2021 / revised 01.10.2021 / accepted 01.10.2021.