

УДК 552.122

Методика определения петрографических структур с использованием прибора МИУ-5М

А. А. Захарова*, Ю. Л. Войтеховский, А. А. Компанченко, Ю. Н. Нерадовский

**Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия;*
e-mail: zakharova.alena27614@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9596-6996>

Информация о статье

Поступила
в редакцию
12.01.2022

Ключевые слова:

горная порода,
петрографическая
структура,
межзерновые контакты,
матрица
вероятностей,
индикатриса, линейный
метод Розиваля,
сканирование
под микроскопом,
МИУ-5М

Реферат

Авторами развивается статистический подход к определению структур горных пород. Предложено математически строгое определение петрографической структуры через вероятности бинарных межзерновых контактов. Петрографическая структура определена как инвариантный аспект организации горной породы, алгебраически выражаемый канонической диагональной формой симметрической матрицы вероятностей контактов и визуализуемый структурными индикатрисами – поверхностями 2-го порядка. Предложена согласованная номенклатура петрографических структур. Ранее метод хорошо показал себя при описании структур ийолитов и уртитов Хибин, а также амфиболитов островов Керетского архипелага (Белое море). Массовое применение метода сдерживается рутинной процедурой подсчета вероятностей межзерновых контактов в петрографических шлифах под микроскопом. Проблема современных оптических анализаторов структур заключается в том, что они относят разные сечения одного анизотропного минерала к разным минералам, а отдельные блоки минерального индивида – к разным индивидам. В статье изложен опыт применения отечественного прибора МИУ-5М для сканирования петрографических шлифов линейным методом Розиваля на примере апатит-нефелиновых руд Хибин и амфиболитов Керетского архипелага. Сочетание визуального контроля и минимальной автоматизации процесса позволяет добиться сходимости структурных типов с результатами, полученными при ручной обработке изображения петрографического шлифа. Дополнительно изучены шлифы, для которых структурные типы при различной методике подсчета отличаются. Выявлено, что присутствие пойкилитовых вростков и особенности минерального состава (наличие гипергенных изменений или минералов с близкими оптическими свойствами) влияют на статистику вероятностей. Даны рекомендации по подбору шага сканирования в зависимости от крупности зерен в изучаемой горной породе.

Для цитирования

Захарова А. А. и др. Методика определения петрографических структур с использованием прибора МИУ-5М. Вестник МГТУ. 2022. Т. 25, № 1. С. 5–11. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2022-5-11>.

Methodology for determination of petrographic structures using the MIU-5M device

Alena A. Zakharova*, Yury L. Voytekhovsky, Alena A. Kompanchenko,
Yury N. Neradovsky

**Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia;*
e-mail: zakharova.alena27614@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9596-6996>

Article info

Received
12.01.2022

Key words:

rock, petrographic
structure, intergrain
contacts, probability
matrix, indicatrix,
Rosival linear method,
microscope scanning,
MIU-5M

Abstract

The authors develop a statistical method for determining the structures of rocks. A mathematically rigorous definition of the petrographic structure through the probabilities of binary intergranular contacts is proposed. The petrographic structure is defined as an invariant aspect of rock organization algebraically expressed by the canonical diagonal form of symmetric matrix of contact probabilities and visualized by structural indicatrices – 2nd order surfaces. A consistent nomenclature of petrographic structures has been proposed. Earlier the method showed itself well in describing the structures of ijolites and urtites of the Khibiny Mountains, as well as amphibolites of the islands of Keretsky Archipelago (the White Sea). Mass application of the method is restrained by the routine procedure of calculating the probabilities of intergranular contacts in petrographic thin sections under a microscope. The problem of modern optical structure analyzers is assignment different sections of the same anisotropic mineral to different minerals, and separation blocks of a mineral individual to different individuals. The paper describes the experience of using the domestic MIU-5M device for scanning petrographic thin sections by the linear method of Rosival. The combination of visual control and minimum automation of the process allows us to achieve convergence of the structural types with results obtained by manual processing of image of petrographic thin section. Additionally, thin sections have been studied, for which the structural types differ with various methods of counting. It has been revealed that the presence of poikilitic ingrowths and features of the mineral composition (the existence of hypergene changes or minerals with similar optical properties) affect the statistics of probabilities. Recommendations are given on the selection of the scanning step depending on the grain size in the studied rock.

For citation

Zakharova, A. A. et al. 2022. Methodology for determination of petrographic structures using the MIU-5M device. *Vestnik of MSTU*, 25(1), pp. 5–11. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2022-5-11>.

Введение

Структуры и текстуры – важные категории, учитываемые в общей систематике и расшифровке генезиса горных пород и руд (*Текстуры...*, 1958; *Половинкина*, 1966). Но даже из названий указанных фундаментальных монографий видно, что многое неясно в их определениях. Определять ли сначала текстуру как макроскопически (реже микроскопически) различимое сложение горной породы, углубляясь затем до структуры как отношения (неделимых, атомарных, элементарных) минеральных зерен? Или сначала определять структуру и далее восходить к текстуре как иерархически более высокому таксону? Так или иначе, описательный характер бытующих определений приводит к неразрешимости ряда вопросов: конечно ли число петрографических структур и текстур, зависит ли число структур и текстур от числа слагающих горную породу минералов, следует ли при этом учитывать все минералы или только порообразующие (без аксессуарных), возможна ли естественная (без конвенциональных границ) классификация петрографических структур? Актуальность этих и ряда других вопросов тем более очевидна, что они больше ста лет назад разрешены в кристаллографии построением математической теории.

Авторы полагают, что непротиворечивые определения петрографической структуры возможны только на языке математики. В ряде статей показано, что организация горной породы (руды) в существенных чертах может быть описана частотами бинарных контактов минеральных зерен всех образующих ее видов (*Войтеховский и др.*, 2021а, б). С математической точки зрения любая n -минеральная горная порода предстает как автоморфизм (отображение в себя) определенного набора минеральных видов, реализуемый через контактирующие индивиды. Стиль автоморфизма определяется симметрической матрицей вероятностей контактов, однозначно определяющей структурную индикатрису – поверхность 2-го порядка в n -мерном пространстве. Формальным выражением петрографической структуры служит каноническая диагональная форма указанной симметрической матрицы. Согласно принципу номенклатуры структура S_n^m соответствует диагональной матрице D , в которой на n позициях стоят m положительных элементов. В случае биминеральных пород возможны два типа структур: S_2^1 и S_2^2 , при этом граница между ними определяется линией равновесия Харди – Вайнберга (*Войтеховский и др.*, 2021б). Вопросы о числе структур и их естественной классификации для n -минеральных горных пород исчерпывающе решаются теорией квадратичных форм. Теория петрографических структур и их всевозможных преобразований логично развивается в терминах смежных алгебраических теорий. Но досадным препятствием является рутинная процедура подсчета частот межзерновых контактов в петрографических шлифах.

Цель данной работы – изучение возможностей применения прибора МИУ-5М для диагностики петрографических структур на основе описанной выше методики.

О современных анализаторах изображений

Сегодня известно большое число анализаторов изображений. В основном они используются для распознавания разного рода текстурированных образцов, в том числе горных пород (*Ładniak et al.*, 2015). Для распознавания и морфометрии рудных минералов подходят программные пакеты ImageJ и Thixomet (*Рудашевский и др.*, 2018; *Толкунова и др.*, 2020). В случае анизотропных порообразующих минералов возникают сложности, так как программы не позволяют определять зерна разного сечения как один минерал. Использование подобных программ для наших целей требует написания специальных надстроек. В Германии разработана программа QMA (*Popov et al.*, 2020), позволяющая получать различные количественные параметры горных пород на основе трех взаимно перпендикулярных шлифов, изготовленных для каждого образца. Но и она не позволяет считать частоты межзерновых границ.

В геологии активно используется компьютерная томография (СТ), позволяющая работать с объемным образцом за счет просвечивания его рентгеновскими лучами (*Popov et al.*, 2020). При этом хорошо различаются сульфиды и силикатные минералы, а также поровое пространство, но между собой минералы одного класса в большинстве случаев различить невозможно. Перспективна технология QEMSCAN, сочетающая сканирование образца в обратно рассеянных электронах для различения минеральных зерен и рентгеноспектральный анализ для характеристики их состава (*Guanira et al.*, 2020). Применительно к характеристике петрографической структуры технология позволяет получить карту шлифа. Но далее снова встает задача подсчета частот межзерновых границ.

Для ее решения одним из авторов (А. З.) использована программа ArcGIS. В программу загружается рисунок шлифа или панорамный снимок хорошего качества. Затем межзерновые границы фиксируются линиями с занесением их цвета в таблицу атрибутов, где типы контактов автоматически суммируются (рис. 1). Преимущества ArcGIS заключаются в упрощении подсчета и исключении ошибок, связанных с малым размером зерен. Основной недостаток подхода – нанесение линий занимает много времени, что не позволяет быстро обработать большое число шлифов.

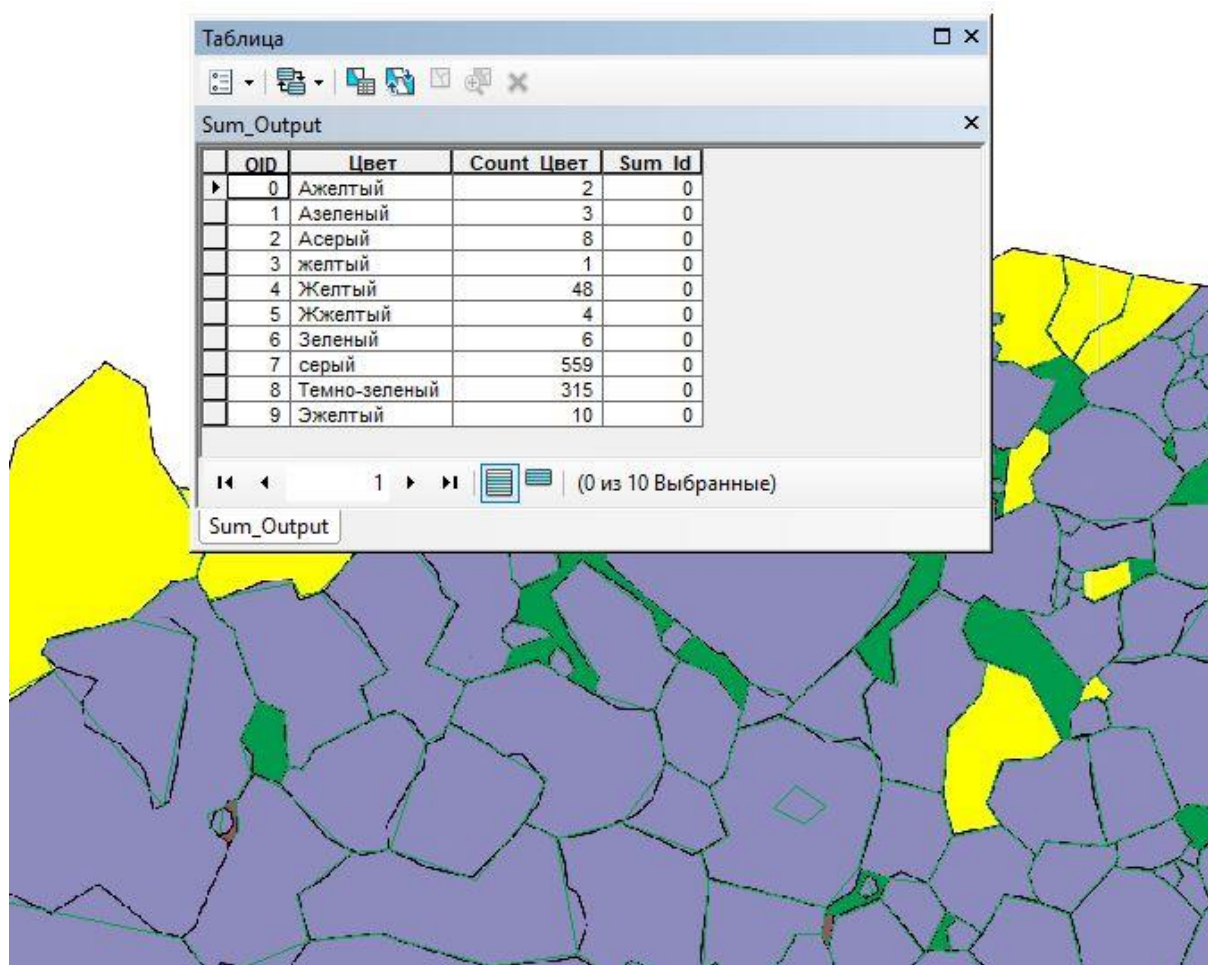


Рис. 1. Фрагмент петрографического шлифа. Расчет в ArcGIS. Пояснения в тексте
Fig. 1. A fragment of the petrographic thin section. Calculation in ArcGIS. See the text for explanation

Применение МИУ-5М

МИУ-5М – минералогическое интеграционное устройство, предназначенное для количественного анализа структуры минеральных агрегатов под микроскопом. Прибор появился в 1980-х гг. и проектировался с целью развития линейно-дискретного метода геометрического анализа, основы которого были заложены А. А. Глаголевым (*Бродская и др., 2001*).

В основе действия прибора лежат линейно-дискретный и точечный методы анализа, смысл которых заключается в измерении в плоскости сечения горной породы длин отрезков (точек), приходящихся на каждый минерал. В результате сканирования (в проходящем и отраженном свете) и компьютерной обработки кроме информации о типах и числе границ возможно получение 22 количественных параметров (модального и гранулометрического состава, коэффициента агрегативности и др.)¹ (*Бродская и др., 2001*). Прибор состоит из нескольких основных блоков (рис. 2): 1) микроскопа со сканирующим столиком; 2) электродвигателя, управляющего столиком; 3) блоков питания (за пределами фото); 4) компьютера, с помощью которого производится управление устройством.

По сравнению с ручными подсчетами МИУ-5М имеет ряд преимуществ: данные получаются непосредственно со шлифа, обработка которого занимает 1–2 часа. К недостаткам методики можно отнести: присутствие оператора, пересчет исходных данных, влияние минеральных и структурных особенностей горной породы (руды).

¹ Анализатор структуры полуавтоматический МИУ-5М. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Л. : ЛОМО, 1989. 56 с.

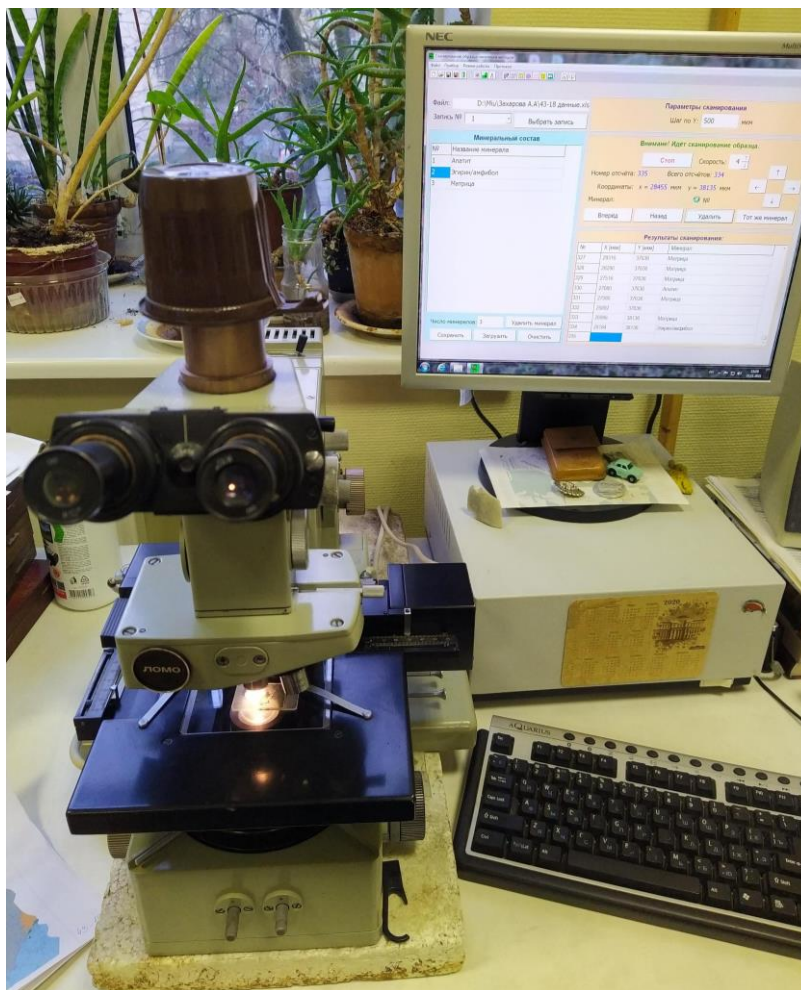


Рис. 2. Отечественный прибор МИУ-5М
Fig. 2. Domestic device MIU-5M

Сравнение результатов с ручными подсчетами

МИУ-5М имеет 6 режимов работы для решения различных геологических задач. В нашем исследовании использовался режим сканирования образца линейным методом. По результатам съемки шлифа формируется файл Excel, где отображаются минералы, условия сканирования, число и тип границ. Параметры задаются оператором (рис. 3). Данные необходимо обработать для получения статистики частот межзерновых контактов. Далее частоты контактов необходимо внести в матрицу, получить ее диагональную форму и определить структурный тип горной породы для данного шлифа.

В рамках проведенного исследования отснято 14 шлифов, представленных амфиболитами Керетского архипелага (*Войтеховский и др., 2021a*) и апатит-нефелиновыми рудами Хибинского массива. Ранее для тех и других структурные типы были определены с помощью ручных подсчетов. Сравнение результатов показано на рис. 4.

В результате структурные типы совпали для 10 из 14 образцов. Шлифы, в которых произошел переход к другому типу, изучены дополнительно. Для амфиболитов это образцы 10 и 14. В первом случае могли повлиять кварц-плагиоклазовые шлиры. В них зерна различить трудно из-за близких оптических свойств, для шлифа 10 занижено количество именно этих контактов. Важно отметить, что присутствующие в шлифе крупные зерна амфибола, пересекаемые при сканировании несколько раз, никак не повлияли на статистику контактов. В шлифе 14 средний размер зерна почти в два раза меньше, чем в остальных образцах. При этом шаг сканирования был тот же, что могло исказить статистику из-за пропуска мелких зерен.

В случае апатит-нефелиновых руд структурный тип поменялся у шлифов 2 и 8. В этих образцах присутствуют крупные зерна минералов и хадакристаллы апатита в эгирине. Средний размер зерен для всех шлифов примерно одинаковый. Поэтому использование одного шага сканирования допустимо. Дополнительные расчеты показали, что крупные зерна и в этом случае не влияют на статистику частот. При этом элементы пойкилитовой структуры вносят изменение в число контактов. Большое число мелких хадакристаллов сложно точно зафиксировать при сканировании. В принципе, такие структуры следует изучать при большем увеличении.

Линейное сканирование		
Минеральный состав:		
Число минералов: 3		
№	Минерал	
1	Апатит	
2	Эгирин/амфибол	
3	Матрица	
Условия сканирования:		
Шаг по Y (мкм): 500		
Результаты сканирования:		
X (мкм)	Y (мкм)	Минерал
20000	20240	Апатит
20344	20240	Апатит
20608	20240	Апатит
21036	20240	Апатит
21300	20240	Эгирин/амфибол
21568	20240	Апатит
21920	20240	Эгирин/амфибол
22936	20240	Апатит
23292	20240	Апатит
23480	20240	Апатит
23480	20240	Апатит
23916	20240	Апатит

Рис. 3. Фрагмент таблицы с результатами сканирования
 Fig. 3. Fragment of the table with scan results

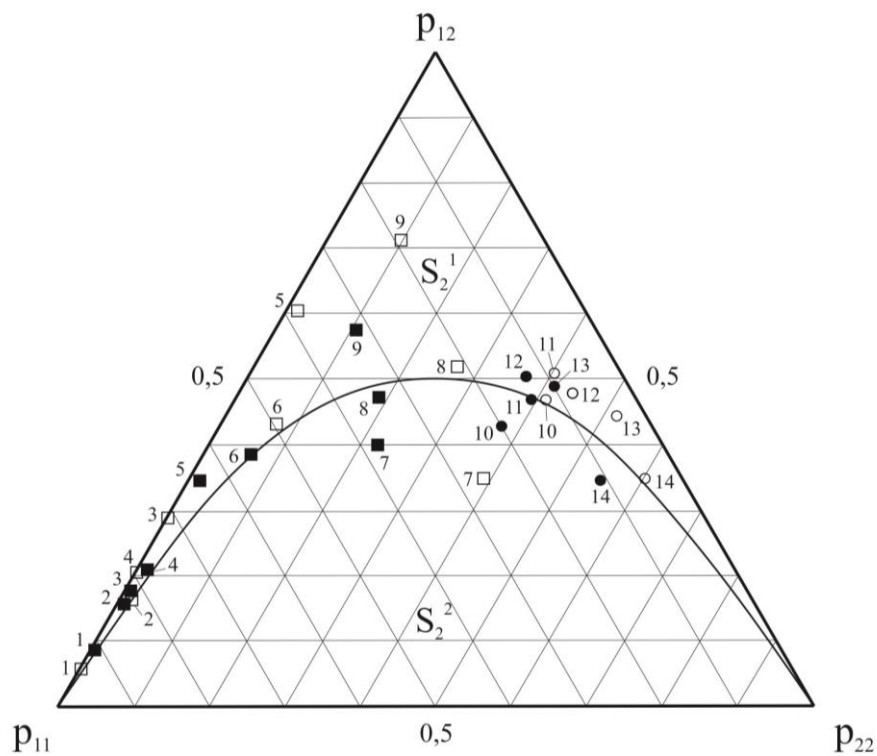


Рис. 4. Барицентрическая диаграмма вероятностей p_{ij} . Квадраты – апатит-нефелиновые руды, круги – амфиболиты; заливные – расчеты вручную, пустые – расчеты на МИУ-5М
 Fig. 4. Barycentric diagram of the probabilities p_{ij} . Squares represent apatite-nepheline ores, circles – amphibolites, filled symbols – manual calculations, empty symbols – calculations using the MIU-5M

Выводы

В результате исследования возможностей применения прибора МИУ-5М для получения статистики частот межзерновых контактов структурные типы горных пород и руд совпали в 70 % случаев. При этом сформулированы следующие методические рекомендации:

1. Неравномерность зернистости горной породы (руды) или наличие шлиров не влияют на статистику контактов. Даже при многократном пересечении одного зерна частоты контактов сохраняются.

2. Наличие пойкилитовых вростков может влиять на статистику, поскольку их сложно фиксировать при сканировании. В таких случаях рекомендуется пойкилитовую часть шлифа снимать отдельно при большем увеличении.

3. Шаг сканирования необходимо подбирать исходя из среднего размера зерна. Если в коллекции присутствуют шлифы, в которых размер зерен сильно отличается, для них шаг необходимо подбирать отдельно.

4. Особенности минерального состава могут влиять на статистику межзерновых контактов: наличие шлиров, состоящих из минералов с близкими оптическими свойствами, или гипергенных изменений. В этом случае рекомендуется такие участки сканировать при большем увеличении.

Если фигуративная точка структуры лежит далеко от линии Харди – Вайнберга, описанные выше особенности никак не повлияют на структурный тип (при этом положение точки на диаграмме может несколько варьировать). Переход от одного структурного типа к другому при использовании разных методик подсчета возможен только для горных пород и руд, фигуративные точки которых лежат вблизи классификационных границ. В этих случаях необходимо учитывать приведенные выше рекомендации.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Р. Л. Бродской, Ю. В. Кобзевой и И. В. Бильской (ВСЕГЕИ) за предоставленную возможность работы на МИУ-5М.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Бродская Р. Л., Марин Ю. Б. Проблема моделирования внутреннего строения упорядоченных и равновесных минерало-петрографических систем // Записки Всероссийского минералогического общества. 2001. Т. 130, № 6. С. 1–14.
- Войтеховский Ю. Л., Захарова А. А. Статистическое описание структур и текстур амфиболитов островов Керетского архипелага (Белое море) // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. Сер. Геология докембрия. 2021а. № 2. С. 44–50. DOI: <https://doi.org/10.17076/geo1355>.
- Войтеховский Ю. Л., Захарова А. А. Петрографические структуры: ийолиты и уртиты Хибин // Вестник МГТУ. 2021б. № 2. С. 160–167. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-2-160-167>.
- Половинкина Ю. И. Структуры и текстуры изверженных и метаморфических горных пород. М. : Недра, 1966. В 2 ч.
- Рудашевский Н. С., Рудашевский В. Н., Антонов А. В. Универсальная минералогическая технология исследования пород, руд и технологических продуктов // Региональная геология и металлогения. 2018. № 73. С. 88–102.
- Текстуры и структуры руд / под общ. ред. А. Г. Бетехтина. М. : Госгеолтехиздат, 1958. 435 с.
- Толкунова А. В., Дурягина А. М., Таловина И. В. Применение ПО Thixomet и компьютерной рентгеновской микротомографии при изучении сульфидных медно-никелевых руд // Металлогения древних и современных океанов. 2020. № 1. С. 257–260.
- Guanira K., Valente T. M., Ríos C. A., Castellanos O. M. [et al.]. Methodological approach for mineralogical characterization of tailings from a Cu(Au,Ag) skarn type deposit using QEMSCAN (Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy) // Journal of Geochemical Exploration. 2020. Vol. 209. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106439>.
- Ladniak M., Młynarczuk M. Search of visually similar microscopic rock images // Computational Geosciences. 2015. Vol. 19. P. 127–136. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10596-014-9459-2>.
- Popov O., Talovina I., Lieberwirth H., Duriagina A. Quantitative microstructural analysis and X-ray computed tomography of ores and rocks – comparison of results // Minerals. 2020. Vol. 10, Iss. 2. DOI: <https://doi.org/10.3390/min10020129>.

References

- Brodskaya, R. L., Marin, Yu. B. 2001. The problem of modeling the internal structure of ordered and equilibrium mineralogical-petrographic systems. *Proceedings of the Russian Mineralogical Society*, 130(6), pp. 1–14. (In Russ.)
- Voytekhovskiy, Yu. L., Zakharova, A. A. 2021a. A statistical description of the structures and textures of Keretsky archipelago (the White Sea) amphibolites. *Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences. Precambrian Geology*, 2, pp. 44–50. DOI: <https://doi.org/10.17076/geo1355>. (In Russ.)
- Voytekhovskiy, Yu. L., Zakharova, A. A. 2021b. Petrographic structures: Khibiny ijolites and urtites. *Vestnik of MSTU*, 2, pp. 160–167. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-2-160-167>. (In Russ.)
- Polovinkina, Yu. Ir. 1966. Structures and textures of igneous and metamorphic rocks. Moscow. (In Russ.)
- Rudashevskiy, N. S., Rudashevskiy, V. N., Antonov, A. V. 2018. The universal technology of mineralogical investigations of bedrocks, ores and processed products. *Regional'naya geologiya i metallogeniya*, 73, pp. 88–102. (In Russ.)
- Textures and structures of ores. 1958. Eds. A. G. Betekhtin et al. Moscow. (In Russ.)
- Tolkunova, A. V., Duryagina, A. M., Talovina, I. V. 2020. Application of Thixomet software and computer X-ray microtomography in the study of sulfide copper-nickel ores. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov*, 1, pp. 257–260. (In Russ.)
- Guanira, K., Valente, T. M., Rios, C. A., Castellanos, O. M. et al. 2020. Methodological approach for mineralogical characterization of tailings from a Cu(Au,Ag) skarn type deposit using QEMSCAN (Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy). *Journal of Geochemical Exploration*, 209. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106439>.
- Ładniak, M., Młynarczuk, M. 2015. Search of visually similar microscopic rock images. *Computational Geosciences*, 19, pp. 127–136. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10596-014-9459-2>.
- Popov, O., Talovina, I., Lieberwirth, H., Duriagina, A. 2020. Quantitative microstructural analysis and X-ray computed tomography of ores and rocks – comparison of results. *Minerals*, 10(2). DOI: <https://doi.org/10.3390/min10020129>.

Сведения об авторах

Захарова Алёна Александровна – Васильевский остров, 21 линия, 2, г. Санкт-Петербург, Россия, 199106; Санкт-Петербургский горный университет, аспирант; e-mail: zakharova.alena27614@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9596-6996>

Alena A. Zakharova – Vasilyevsky Island, 2, 21 Line, Saint-Petersburg, Russia, 199106; Saint Petersburg Mining University, PhD Student; e-mail: zakharova.alena27614@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9596-6996>

Войтеховский Юрий Леонидович – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН, д-р геол.-минерал. наук, профессор, гл. науч. сотрудник; Васильевский остров, 21 линия, 2, г. Санкт-Петербург, Россия, 199106; Санкт-Петербургский горный университет, профессор; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5380-9191>

Yury L. Voytekhovskiy – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Geological Institute KCS RAS, Dr Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Chief Researcher; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5380-9191>; Vasilyevsky Island, 2, 21 Line, Saint-Petersburg, Russia, 199106; Saint-Petersburg Mining University, Professor; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5380-9191>

Компанченко Алёна Аркадьевна – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН, канд. геол.-минерал. наук, науч. сотрудник

Alena A. Kompanchenko – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Geological Institute KCS RAS, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Researcher

Нерадовский Юрий Николаевич – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН, канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник

Yury N. Neradovskiy – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Geological Institute KCS RAS, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Leading Researcher