

УДК 552.122

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТРУКТУР И ТЕКСТУР АМФИБОЛИТОВ ОСТРОВОВ КЕРЕТСКОГО АРХИПЕЛАГА (БЕЛОЕ МОРЕ)

Ю. Л. Войтеховский^{1,2}, А. А. Захарова¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Россия

² Геологический институт ФИЦ Кольский научный центр РАН, Апатиты, Россия

Показаны статистические методы, развиваемые авторами для описания петрографических структур и текстур. Для отображения статистик бинарных и тернарных межзерновых контактов, определяемых в шлифах, предложены диаграммы нового типа – барицентрические треугольник (p_{ii} , p_{ij} , p_{jj}) и тетраэдр (p_{iii} , p_{ijj} , p_{jjj} , p_{jjj}). В обоих показано положение линии равновесия Харди – Вайнберга, характеризующей массивные текстуры горных пород. Вычислительные процедуры и результаты показаны на примере амфиболитов островов Виченная Луда и Сидоров (Керетский архипелаг, Белое море).

Ключевые слова: кристаллическая горная порода; структура; текстура; бинарные и тернарные межзерновые контакты; барицентрическая диаграмма; равновесие Харди – Вайнберга.

Yu. L. Voytekhovsky, A. A. Zakharova. A STATISTICAL DESCRIPTION OF THE STRUCTURES AND TEXTURES OF KERETSKY ARCHIPELAGO (WHITE SEA) AMPHIBOLITES

The article presents the statistical methods developed by the authors for the description of petrographic structures and textures. To display the statistics of binary and ternary intergrain contacts detected in thin sections, diagrams of a new type are proposed – barycentric triangle (p_{ii} , p_{ij} , p_{jj}) and tetrahedron (p_{iii} , p_{ijj} , p_{jjj} , p_{jjj}). Both show the location of the Hardy-Weinberg equilibrium line, which characterizes massive rock textures. Computational procedures and results are demonstrated using the example of amphibolites of Vichennaya Luda and Sidorov islands (Keretsky Archipelago, White Sea).

Keywords: crystalline rock; structure; texture; binary and ternary intergrain contacts; barycentric diagram; Hardy-Weinberg equilibrium.

Введение

При изучении горных пород наибольшую сложность представляет не определение химического или минерального состава (для этого есть весьма точные методы химии и физики),

а характеристика петрографических структур и текстур. В словаре петрографа есть сотни терминов, схватывающих метрические (абсолютные и относительные размеры), неметрические (идиоморфизм – ксеноморфизм) характеристики минеральных зерен, особенности

пространственных отношений их самих (пойкилитовые структуры) и агрегатов (такситовые, полосчатые и др. текстуры), а также генетические представления (лепидогранобластовая структура). Последние при описании горной породы кажутся методологическим казусом, ибо бластез ни в штуфе, ни в шлифе не виден, но реконструируется позднее по совокупности признаков. Существующая систематика эклектична, синонимична (разновидности гипидиоморфнозернистой структуры: гранитовая, офитовая, монцонитовая...) и открыта для дальнейшего изобретения сколь угодно метафоричных терминов (структура спинифекс). В рамках бытующих определений структуры и текстуры нельзя ответить на вопрос, сколько их необходимо и достаточно для образования полной системы понятий. По-видимому, описательный подход идейно исчерпан. Развитие теории видится в том, чтобы определить петрографическую структуру в математических категориях и дать способ ее однозначной и воспроизводимой диагностики.

Петрографические структуры и текстуры воспринимаются нами как система межзерновых границ. С морфологической точки зрения они совокупно выражают фундаментальное отношение контактирования минеральных зерен и их агрегатов в пространстве горной породы. Очевидна и физическая подоплека. В горных породах (а также металлах и сплавах) есть бинарные (по поверхностям), тернарные (тройные по ребрам) и куотернарные (четверные в точках) межзерновые контакты, рассматриваемые как граничные дефекты кристаллических структур, зоны обрыва химических связей, каналы свободной энергии [Салтыков, 1958; Беленький, 1980]. После установления физико-химического равновесия в горной породе наступает период дополнительной минимизации свободной энергии ее межзерновых границ [Вернон, 1980; Бродская, 1988]. Результат особенно заметен в мономинеральных горных породах (мраморах, кварцитах), фирновом льде, керамике, отоженных металлах и сплавах. В них реализуется «структура Коксетера» сухой пены вопреки требованиям кристаллических решеток минеральных зерен [Войтеховский, Захарова, 2020]. При описании межзерновых границ в 2D желательнее было бы учесть их протяженность (еще лучше – площади границ в 3D, что сегодня технически невозможно), а в физическом приближении – удельные свободные энергии (что тоже невозможно, ибо они зависят от типа контактирующих решеток, их взаимной ориентации, извилистости границ и третьей фазы – газа или жидкости, заполняющей

область контакта). В этом видится перспектива развития метода. Далее показано, что статистический анализ межзерновых контактов уже позволяет продвинуться в построении строгой теории 2D (т. е. наблюдаемых в шлифах) петрографических структур.

Амфиболиты Керетского архипелага

Для демонстрации метода в качестве примера использованы амфиболиты Керетского архипелага [Березин и др., 2020] (на другом примере метод работал бы так же). Приведем их стандартное петрографическое описание. «Обр. 710. Крупнозернистая порода сложена преимущественно амфиболом (при подчиненной роли биотита до 5 об. %), плагиоклазом и кварцем. Зерна амфибола имеют субидиоморфный облик, разориентированы и содержат многочисленные включения зерен кварца. Соотношение амфибола с плагиоклазом составляет 70/30. В породе встречаются многочисленные участки *Pl-Qz-Bt* агрегатов (20 об. %), являющихся псевдоморфозами по порфиробластам граната. Наполнение этих участков соответствует примерно 20 об. % мелкозернистого биотита, часто имеющего ориентировку вдоль длинной оси псевдоморфозы. Нередко с противоположных сторон таких структур имеются «хвосты», состоящие из ориентированных агрегатов амфибола» [Березин и др., 2020, с. 92] (рис. 1). Детальную информацию о месте взятия образцов, геолого-структурной зоне, комплексе пород, парагенезисе, возрасте и параметрах метаморфизма и т. д. читатель может почерпнуть в цитированной статье.

Немного теории: бинарные и тернарные контакты, равновесия Харди – Вайнберга

Комбинаторика межзерновых границ в горных породах никогда не рассматривалась петрографами. Между тем там кроются строгие закономерности. Так, в n -минеральной горной породе вероятности p_{ij} бинарных и p_{ijk} тернарных контактов ($i, j, k = 1, \dots, n$) связаны функционально, т. к. каждый тернарный контакт дает три бинарных определенного вида. Для $n = 2$ (рис. 2) вероятности (p_{11}, p_{22}, p_{12}) и ($p_{111}, p_{112}, p_{122}, p_{222}$) можно показать точками в барицентрических треугольнике и тетраэдре, т. к. их суммы равны 1. (Эти диаграммы введены в петрологию в начале XX века А. Харкером и широко использовались Е. С. Федоровым. Способ их построения должен быть известен читателю.) Связи: $p_{11} = p_{111} + p_{112} / 3$, $p_{22} = p_{222} + p_{122} / 3$, $p_{12} = 2(p_{112} / 3 + p_{122} / 3)$.

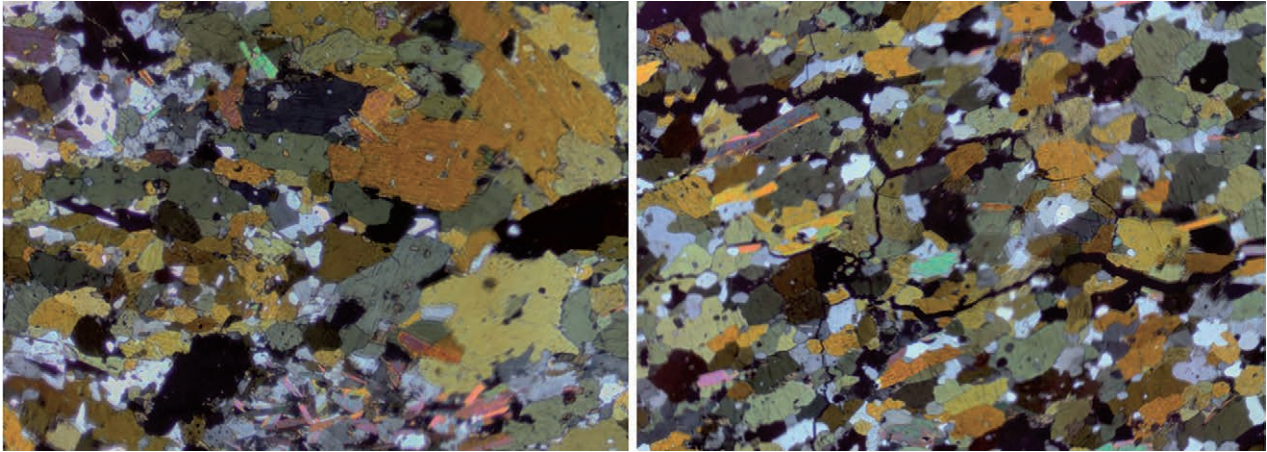


Рис. 1. Амфиболиты Керетского архипелага. Обр. 710 (слева) и 711 (справа) [Березин и др., 2020]. Петрографический шлиф 1,0 × 1,5 см, николи ×

Fig. 1. Amphibolites of the Keretsky Archipelago. Samples 710 (left) and 711 (right) [Berezin et al., 2020]. Petrographic thin section 1.0 × 1.5 cm, nicoli ×

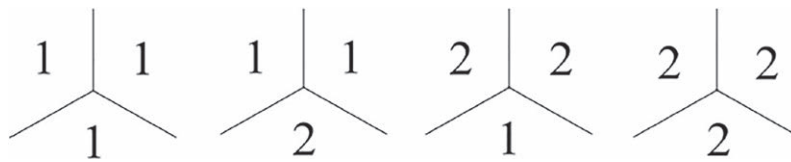


Рис. 2. Тернарные контакты однозначно определяют бинарные

Fig. 2. Ternary contacts uniquely define the binary ones

Важный случай организации горных пород – равновесие Харди – Вайнберга (далее для краткости ХВ, HW, введено названными авторами в начале XX века для описания скрещивания генов в потомстве) – идеальное перемешивание минеральных зерен. В этом случае вероятности межзерновых контактов можно рассчитать по вероятностям (парциальным частотам) p_i минеральных зерен разных видов:

$$(p_1 m_1 + \dots + p_n m_n)^2 = \sum p_{ij} m_i m_j,$$

где $m_i m_j$ имеет смысл бинарного контакта, $p_{ii} = p_i^2$, $p_{ij} = 2p_i p_j$. Для $n = 2$ линии ХВ задаются соотношениями: $p_{11} p_{22} = (p_{12} / 2)^2$ в треугольнике и $p_{111} = p_1^3$, $p_{112} = 3p_1^2 p_2$, $p_{122} = 3p_1 p_2^2$, $p_{222} = p_2^3$ в тетраэдре (рис. 3). Линия ХВ фундаментальна. Это математический образ массивных текстур для любых горных пород.

Линия ХВ разбивает барицентрический треугольник на два поля: $p_{11} p_{22} > (p_{12} / 2)^2$ (преобладают мономинеральные сростания) и $p_{11} p_{22} < (p_{12} / 2)^2$ (преобладают полиминеральные сростания). В тетраэдре линия ХВ «подвешена». Но подставляя тернарные вероятности (p_{111} , p_{112} , p_{122} , p_{222}) (см. 1-й абзац параграфа) в соотношение $p_{11} p_{22} = (p_{12} / 2)^2$, получим уравнение К-поверхности, разбивающей барицентрический тетраэдр на два класса, изоморфных

таковым в барицентрическом треугольнике (рис. 3). Линия ХВ лежит в К-поверхности, обе симметричны относительно L_2 тетраэдра.

Массивная или не массивная?

Неожиданный результат теоретического анализа состоит в том, что массивные текстуры не образуют полей в барицентрических диаграммах (рис. 3). Попадание фигуративных точек реальных текстур на линию ХВ невозможно. Отнесение текстуры к массивной – статистическая задача, решаемая с помощью критериев согласия [Войтеховский, Захарова, 2018]. Фигуративные точки амфиболитов Керетского архипелага лежат близко к линиям ХВ (рис. 3). Но критерием «хи-квадрат» проверено, что их текстуры не массивны даже на уровне значимости 0,01.

При этом они лежат по обе стороны от классифицирующих границ и, строго говоря, должны считаться различными. Это ставит ряд вопросов: имеем ли мы дело с массивными текстурами, для которых непопадание на линию ХВ вызвано недостаточной статистикой (p_{11} , p_{22} , p_{12}) и (p_{111} , p_{112} , p_{122} , p_{222}); означают ли два типа текстур изменение стиля организации горной породы при метаморфизме (считает-

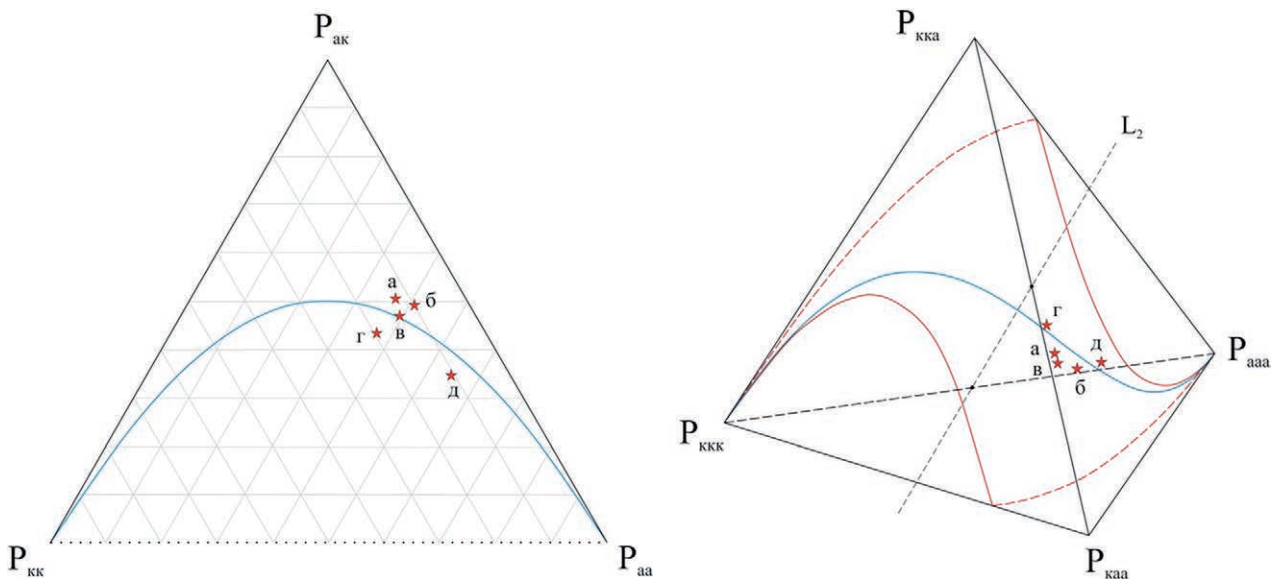


Рис. 3. Линии ХВ (голубые) в барицентрических треугольнике (слева) и тетраэдре (справа), следы К-поверхности на гранях тетраэдра (красные).

Индексы: а – амфибол, к – кварц и полевоы шпат вместе, аксессуарные биотит и титанит в расчетах не учтены. Буквами обозначены амфиболиты о. Сидоров (а – S4, б – S2) и о. Виченная Луда (в – 711, г – 710, д – V2) [Березин и др., 2020]

Fig. 3. HW lines (blue) in barycentric triangle (left) and tetrahedron (right), K-surface traces on tetrahedron facets (red).

Indices: a – amphibole, k – combined quartz and feldspar, accessory biotite and titanite are not included in the calculations. The letters denote the amphibolites of the Sidorov (a – S4, б – S2) and Vichennaya Luda islands (в – 711, г – 710, д – V2) [Berezin et al., 2020]

ся, что структуры и текстуры более инертны, чем минеральный и химический составы); если так, то в каком направлении произошло изменение? Таким образом, количественный анализ петрографических структур и текстур ставит перед исследователями новые вопросы.

Тренды петрографических структур

В статье [Войтеховский, Захарова, 2020] выполнено статистическое 2D-моделирование канонических петрографических структур (вкрапленных, цепочечных, пойкилитовых, с ветвящимися кластерами, порфировых, порфировидных) и текстур (полосчатых, шлировых). Для фиксированных кластеров, определяющих тип структуры и текстуры, и их разных концентраций в матрице рассчитаны тренды указанных структур и текстур. В реальных горных породах типы кластеров не выдержаны идеально. Следует ожидать, что их фигуративные точки попадут между расчетными трендами. Текстуры амфиболитов характеризуются как шлировые с небольшим (3–5) числом зерен амфибола в шлирах (рис. 4). В четырех случаях насыщение горной породы шлирами близко к предельному, в образце V2 – среднее. При этом в шлифах видно цепочечное распределе-

ние минералов, в основном амфибола и биотита (рис. 1). Эти характеристики согласуются

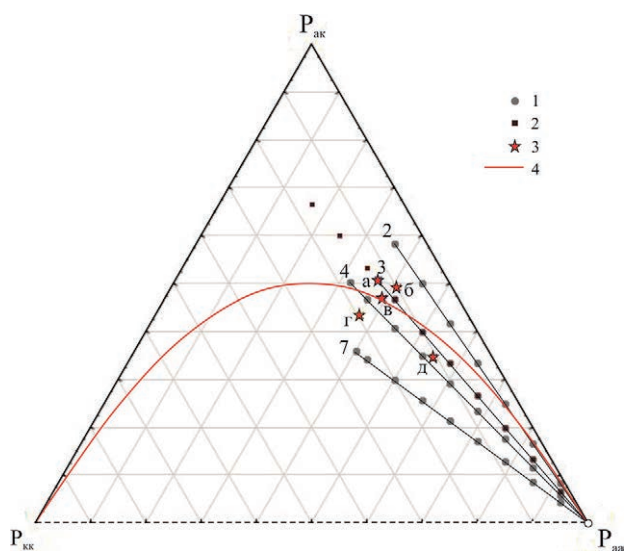


Рис. 4. Модельные тренды:

1 – шлировые текстуры (2, 3, 4, 7 – числа минеральных зерен в шлирах), 2 – цепочечная структура, 3 – амфиболиты (обозначены на рис. 3), 4 – линия ХВ

Fig. 4. Model trends:

1 – schlieren textures (2, 3, 4, 7 – the numbers of mineral grains in schlieren), 2 – chain structure, 3 – amphibolites (shown in Fig. 3), 4 – HW line

с описаниями амфиболитов в статье [Березин и др., 2020]. Заметим, что предлагаемый способ описания имеет очевидные ограничения. Так, не будут различаться статистиками (p_{11} , p_{22} , p_{12}) и (p_{111} , p_{112} , p_{122} , p_{222}) текстуры, полученные одна из другой сжатием/растяжением без нарушения межзерновых контактов.

Структурные индикатрисы

Применение барицентрических диаграмм ограничено биминеральными структурами и текстурами, т. к. разнообразие межзерновых контактов быстро растет с числом минералов. В триминеральной горной породе уже 6 бинарных и 10 тернарных типов контактов. Для изображения их вероятностей фигуративными точками нужны 5- и 9-мерный симплексы. Здесь можно рекомендовать метод «минерал – матрица» с последовательной оппозицией каждого из минералов всем остальным. По сути, это и было сделано выше (рис. 3 и 4) оппозицией амфибола и лейкократовой кварц-полевошпатовой матрицы. Повторив процедуру для кварца и полевого шпата, можно получить еще две барицентрических диаграммы, из сравнения которых можно извлечь информацию о структурной роли каждого из трех минералов в пространстве горной породы.

Типизация любой n -минеральной петрографической структуры возможна методом структурной индикатрисы [Войтеховский, 2000]. Он состоит в представлении суммы вероятностей p_{ij} межзерновых контактов $m_i m_j$ в виде квадратичной формы, строго определяющей квадратичную поверхность – структурную индикатрису [Боревич, 1988]. Ее тип устанавливается по канонической диагональной форме матрицы $[p_{ij}]$. Последняя характеризует организацию горной породы, ее диагональная форма – структуру, в некоторых границах устойчивую относительно вариаций вероятностей p_{ij} .

$$\sum_{i,j=1}^n p_{ij} m_i m_j = [m_1 m_2 \dots m_n] \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \dots \\ m_n \end{bmatrix}.$$

В статье [Войтеховский, 2000] показано, что для биминеральных горных пород возможны две диагональные формы матриц $[p_{ij}]$: $[1\ 1]$ и $[1\ -1]$. Им соответствуют структурные индикатрисы: эллипс (поле под линией ХВ, рис. 3 и 4) и гипербола (поле над линией ХВ). Для триминеральных горных пород возможны три диагональные формы матриц $[p_{ij}]$: $[1\ 1\ 1]$ (эллипсоид), $[1\ 1\ -1]$ (одно-) и $[1\ -1\ -1]$ (двуполост-

ный гиперboloиды). Здесь очевидна аналогия с коноскопическими фигурами, используемыми в петрографии для диагностики минералов по оптическим свойствам. В общем случае для n -минеральной горной породы возможны n канонических структур с простой и однозначной номенклатурой. Символ S_n^m означает, что в диагональной форме матрицы $[p_{ij}]$ содержится m положительных единиц ($m = 1, \dots, n$). Структуры амфиболитов 711, S2 и S4 имеют тип S_2^1 , структуры амфиболитов 710 и V2 – тип S_2^2 . Все вычислительные процедуры компьютеризованы.

Заключение

Для описания петрографических структур и текстур сегодня есть два подхода. Первый, закрепленный в словарях и учебниках, использует все богатство языка для максимально подробной характеристики форм, размеров, морфологических особенностей срастания и взаимного пространственного положения минеральных зерен и их агрегатов. Он ориентирован на скорейшие генетические реконструкции. Второй, развиваемый авторами, ориентирован на максимальное продвижение математической теории кристаллической горной породы в стиле кристаллографии, хотя и в других категориях. Структуры и текстуры рассматриваются почти традиционно как системы межзерновых границ. Но акцент сделан на статистическом анализе вероятностей различных межзерновых контактов. Матрица вероятностей фиксирует организацию горной породы, ее диагональная форма – структуру, устойчивую в некоторых границах при изменении организации. В алгебраических категориях построены классификация и увязанная с ней номенклатура петрографических структур. Но и здесь есть физическая подоплека, т. к. межзерновые границы – это дефекты кристаллических структур минеральных зерен, зоны обрыва химических связей, вносящие существенный (если не главный) вклад в баланс поверхностной свободной энергии горной породы после установления в ней физико-химического равновесия. Традиционный подход идейно исчерпан, математическая теория – в начале становления. Генетические интерпретации получаемых на этом пути результатов в рамках известных феноменологических теорий кристаллизации – дело будущего. Применительно к практическим задачам сегодня они дополняют друг друга.

Авторы благодарят А. В. Березина, Л. И. Салимгараеву и С. Г. Скублова за предоставление петрографических шлифов амфиболитов

Керетского архипелага для исследования, а также рецензентов за профессиональные замечания, способствовавшие более ясному изложению результатов.

Литература

Беленький В. З. Геометрико-вероятностные модели кристаллизации. Феноменологический подход. М.: Наука, 1980. 88 с.

Березин А. В., Салимгараева Л. И., Скублов С. Г. Эволюция состава минералов при эклогитовом метаморфизме в Беломорском подвижном поясе (на примере о-ва Виченная Луда) // Петрология. 2020. Т. 28, № 1. С. 85–107.

Боревич З. И. Определители и матрицы. М.: Наука, 1988. 184 с.

Бродская Р. Л. Термодинамические (кинетические) критерии формирования и эволюции структуры минеральных агрегатов // Зап. ВМО. 1988. № 5. С. 623–633.

References

Belen'kii V. Z. Geometriko-veroyatnostnye modeli kristallizatsii. Fenomenologicheskii podkhod [Geometric-probabilistic models of crystallization. The phenomenological approach]. Moscow: Nauka, 1980. 88 p.

Berezin A. V., Salimgaraeva L. I., Skublov S. G. Evolyutsiya sostava mineralov pri eklogitovom metamorfizme v Belomorskom podvizhnom poyase (na primere ostrova Vichennaya Luda) [Evolution of the composition of minerals during eclogite metamorphism in the White Sea mobile belt (on the example of Vichennaya Luda island)]. *Petrologiya* [Petrology]. 2020. Vol. 28, no. 1. P. 85–107.

Borevich Z. I. Opredeliteli i matritsy [Determinants and matrices]. Moscow: Nauka, 1988. 184 p.

Brodskaya R. L. Termodinamicheskie (kineticheskie) kriterii formirovaniya i evolyutsii struktury mineral'nykh agregatov [Thermodynamic (kinematic) criteria of formation and evolution of mineral aggregates structures]. *Zap. VMO* [Proceed. Russ. Mineral. Soc.]. 1988. No. 5. P. 623–633.

Saltykov S. A. Stereometricheskaya metallografiya [Stereometric metallography]. Moscow: Metallurgy, 1958. 446 p.

Vernon R. H. Metamorficheskie protsessy [Metamorphic processes]. Moscow: Nedra, 1980. 228 p.

Vernon R. H. Metamorphic processes. M.: Nedra, 1980. 228 p.

Voytekhovskiy Yu. L. Количественный анализ петрографических структур: метод структурной индикатрисы и метод вычитания аксессуариев // Изв. вузов. Сер. Геол. и разведка. 2000. № 1. С. 50–54.

Voytekhovskiy Yu. L., Zakharova A. A. Массивная текстура горной породы: гранит массива Акжайляу, Казахстан // Тр. XV Всерос. научн. школы «Математические исследования в естественных науках». Апатиты: К&М, 2018. С. 56–57. doi: 10.31241/MIEN.2018.15.07

Voytekhovskiy Yu. L., Zakharova A. A. Моделирование петрографических структур // Вестник геонаук. 2020. № 10. С. 38–42. doi: 10.19110/geov.2020.10.5

Zhabin A. G. Онтогенез минералов. Агрегаты. М.: Наука, 1979. 275 с.

Saltykov S. A. Stereometricheskaya metallografiya. M.: Metallurgiya, 1958. 446 с.

Поступила в редакцию 05.01.2021

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Войтеховский Юрий Леонидович

профессор каф. минералогии, кристаллографии и петрографии, д. г.-м. н., проф.
Санкт-Петербургский горный университет
21-я линия В. О., 2, Санкт-Петербург, Россия, 199106
эл. почта: Voytekhovskiy_YuL@pers.spmi.ru,
woyt@geoksc.apatity.ru
тел.: +79216679895

CONTRIBUTORS:

Voytekhovskiy, Yury

Saint Petersburg Mining University
2, 21st Line, V. O., Saint Petersburg, Russia, 199106
e-mail: Voytekhovskiy_YuL@pers.spmi.ru,
woyt@geoksc.apatity.ru
tel.: +79216679895

Захарова Алена Александровна

аспирант каф. минералогии, кристаллографии
и петрографии
Санкт-Петербургский горный университет
21-я линия В. О., 2, Санкт-Петербург, Россия, 199106
эл. почта: zakharova.alena27614@gmail.com
тел.: +79216449521

Zakharova, Alena

Saint Petersburg Mining University
2, 21st Line, V. O., Saint Petersburg, Russia, 199106
e-mail: zakharova.alena27614@gmail.com
tel.: +79216449521