

УТВЕРЖДАЮ

Директор Института геологии –
обособленного подразделения
ФГБУН ФИЦ «Карельский
научный центр РАН»

д.г.-м.н., профессор



Светов Сергей Анатольевич

«09» сентября 2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Захаровой Алены Александровны на тему: «Математическое моделирование минеральных агрегатов: теория и геологическое приложение», представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.05 – Минералогия, кристаллография.

Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения и библиографического списка, содержит 163 страницы машинописного текста, 61 рисунок, 22 таблицы, 12 формул, список литературы из 130 наименований и 5 приложений. Исследование поддержано грантом Комитета по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга (распоряжение № 255 от 03.12.2020 г.)

1. Актуальность темы диссертации

Разработка и реализация программ социально-экономического развития страны возможны лишь при повышении качества и эффективности геологических работ различных направлений. Достижение этих целей во многом обеспечивается единообразием подходов при диагностике кристаллических горных пород и их ассоциаций, стандартизацией принципов выделения и унификацией петрографической номенклатуры. При этом струк-

ОТЗЫВ

ВХ. № 9-573 от 14.09.22
АУ УС

турно-текстурные особенности минеральных агрегатов, горных пород и руд имеют важное значение, так как относятся к основным характеристикам наравне с минеральным и химическим составами. Развитие современных технологий сдерживается в значительной мере описательным подходом к характеристике структурно-текстурных особенностей минеральных агрегатов. Внедрение новых количественных методик анализа структур и текстур безусловно способствует лучшему прогнозу извлечения полезных компонентов и разделению руд на технологические типы уже на ранних этапах геологоразведочных работ и снижает затраты на технологические испытания. Математический подход к проблеме, реализованный в диссертации А.А. Захаровой по моделированию минеральных агрегатов, представляется весьма актуальным.

2. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

А.А. Захарова построила защиту на трех положениях, которые лаконичны, обоснованы и достоверны.

В первом положении обосновано, что представление минеральных агрегатов как автоморфизмов минеральных видов через контакты минеральных индивидов позволяет корректно определить понятие структуры и построить полную классификацию структур минеральных агрегатов (в том числе горных пород) на основе статистик бинарных и тернарных межзерновых контактов. Исходя из их статистической интерпретации, автор предлагает барицентрические диаграммы нового типа, в которых выявляются закономерности расположения классических (т. е. традиционно понимаемых) структур и текстур.

Второе положение показывает эффективность применения в анализе структур и текстур минеральных агрегатов концепции статистического равновесия Харди-Вайнберга, изначально сформулированной в генетике. Для минеральных агрегатов оно отвечает идеальному перемешиванию минеральных зерен разных видов при любом модальном составе агрегата. Установлено, что оно соответствует общепринятому пониманию массивной текстуры, по сути оказывающейся структурой. Это лишний раз подчеркивает бытующее нестрогое определение и употребление терминов. Соответствие организации конкретного минерального агрегата равновесию Харди-Вайнберга должно проверяться статистическими критериями согласия.

Третье положение обосновывает, что установленные в терминах построенной модели структурные типы апатитовых (Хибины) и железистых (Костомукша) руд коррелируют со степенью извлечения полезного минерала. Достоверность выводов базируется на корректной статистической обработке измерений в петрографических шлифах и тщатель-

ном сопоставлении математических результатов, интерпретированных в рамках модели, с особенностями межзерновых срастаний в реальных горных породах и рудах.

3. Научные результаты, их ценность

Для решения задач исследований соискатель исходит из представлений, что в горных породах (а также металлах и сплавах) есть бинарные (по поверхностям), тернарные (тройные по ребрам) и куотернарные (четверные в точках) межзерновые контакты.

Для биминеральных агрегатов предложена классификационная диаграмма с барицентрическим тетраэдром вероятностей тернарных контактов с 8 полями, каждому из которых отвечает структурная индикатриса 3-го порядка.

Для триминеральных агрегатов предложена классификационная диаграмма – барицентрический 6-вершинный симплекс вероятностей бинарных контактов, в тетраэдрических гранях которого построены поля структурных типов.

Для апатитовых руд Хибин и железистых кварцитов Костомукши установлена связь между структурными типами руд и степенью извлечения полезного минерала.

Шлифы изучены с помощью поляризационных микроскопов Leica DM750 и Leica DM2700P, а также анализатора структур МИУ-5М. Панорамные снимки шлифов обработаны в графическом редакторе CorelDRAW X8, для подсчетов контактов применена программа ArcGIS. В работе также использованы авторские программы на языке Python. Построение поверхности равновесия основано на авторском алгоритме (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021612125, 2021).

Результаты в достаточной степени освещены в 13 печатных работах, в том числе в 3 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus; получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

4. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации

Теоретической основой работы послужила методология определения структур минеральных агрегатов (в том числе горных пород и руд), ранее разработанная научным руководителем диссертации Ю.Л. Войтеховским, которая заключается в типизации структур на основе статистик межзерновых контактов. А.А. Захаровой принято определение минерального агрегата как автоморфизма (отображения в себя) некоторого набора минеральных видов, реализуемого через контакты минеральных индивидов. При этом характери-

стикой автоморфизма для того или иного минерального агрегата является статистика имеющихся в нем полиминеральных межзерновых контактов.

Заметим, что понятие автоморфизма известно из курса кристаллографии. Но если там он означает отображение множества элементов (вершин, ребер, граней) кристалла в себя в результате того или иного движения, то в минеральном агрегате он уже задан и, по сути, является множественным (минеральное зерно в горной породе контактирует с несколькими зернами, если это не хадакристалл) и цветным (минеральное зерно может контактировать с зернами других видов). Таким образом, в определении минерального агрегата используются базовые кристаллографические понятия, но в новом сочетании.

Моделирование минеральных агрегатов основано на принципах типизации их структур, подробное теоретическое обоснование которых дано в главе 1. Там же предложена барицентрическая диаграмма для биминерального случая (треугольник) и описаны два типа структурных индикатрис – эллипс (структура S_2^2) и гипербола (структура S_2^1). В качестве основы для геометрического моделирования структур взята гексагональная сетка, для обоснования которой использована теорема Эйлера для плоских графов с 3-валентными узлами (что соответствует геометрии контактов минеральных зерен, наблюдаемых в петрографических шлифах). Показано, что любые типовые структуры моделируются в барицентрической диаграмме в виде трендов в терминах вероятностей межзерновых контактов, если корректно определены тип и концентрация кластера в матрице.

Впервые построена граница Харди-Вайнберга для триминеральных агрегатов на основе бинарных контактов. В этом случае барицентрическая диаграмма представляет собой 6-вершинный симплекс в 5-мерном пространстве. С помощью оригинального алгоритма построены следы поверхности Харди-Вайнберга в тетраэдрических гранях симплекса. Получены 4 уникальных типа поверхностей, для каждой тетраэдрической грани определены поля структурных типов. Установлено, что положение следов поверхности равновесия и полей структурных типов не совпадает. Таким образом, граница Харди-Вайнберга разделяет поля структурных типов только для бинарных контактов в биминеральных агрегатах, в других случаях сохраняет смысл статистического равновесия межзерновых контактов при идеальном перемешивании минеральных индивидов.

Практическая значимость работы:

1. Построенные модельные тренды и классификационные диаграммы для бинарных и тернарных контактов позволяют количественно характеризовать структуры и находить тонкие различия между минеральными агрегатами сходного химического и минерального состава. Это может быть использовано при стандартных описаниях горных пород на всех стадиях геологоразведочных работ.

2. Установленные зависимости между структурными типами руд и степенью извлечения полезного минерала могут быть использованы при минералого-технологическом картировании. Практическая значимость исследования подтверждена актом внедрения, полученным от ООО «ЦНТ Инструментс».

3. Показана практическая применимость концепции статистического равновесия Харди – Вайнберга в анализе структур горных пород и руд. Обосновано, что их массивные текстуры, по сути, являются структурами, в которых при любом модальном составе достигается идеальное перемешивание минеральных зерен разных видов.

5. Рекомендации по использованию результатов работы

Результаты исследования можно использовать для решения различных минералого-технологических задач, включая выделение технологических типов руд и установление связи между их структурными типами и физико-механическими свойствами. Авторские программы позволяют наглядно представлять положение фигуративных точек образцов для тернарных контактов, а также визуализировать структурные индикатрисы по заданным значениям вероятностей. Барицентрические диаграммы с модельными трендами можно использовать для строгой количественной характеристики структур минеральных агрегатов. Предлагается применение методики в академических (ГИ ФИЦ КНЦ РАН, ИГ ФИЦ КарНЦ РАН, ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН) и отраслевых (ВИМС) организациях, а также компаниях, занимающихся вопросами технологической минералогии.

6. Замечания и вопросы по работе

1. Во введении и главе 1 автор рассматривает три подхода к определению структур и текстур минеральных агрегатов. Лучше говорить об объединенном петрографическом подходе. В литературном обзоре не использован петрографический кодекс – свод основных правил и рекомендаций по унификации и упорядочению петрографической терминологии и номенклатуры, а также таксономии петрографических подразделений при проведении геологических работ на территории России (Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования // Ред. Богатиков О.А., Петров О.В., Шарпенко Л.Н. СПб.: 2008, 203 с. Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования // Ред. Богатиков О.А., Морозов А.Ф., Петров О.В. СПб.: ВСЕГЕИ, 2009. 160 с.).

2. Во введении на с. 6 автор указывает, что теоретической основой диссертации послужила методология Ю. Л. Войтеховского определения структур минеральных агрегатов на основе статистик межзерновых контактов, но ссылка на его работы появляет-

ся только на с. 29. С другой стороны, в диссертации приводится чересчур длинная цитата из монографии Ф.А. Усманова в чисто повествовательном тоне, без видимой привязки к целям диссертации.

3. В работе есть стилевые огрехи, иногда отсутствуют пояснения к рисункам. Например, стр. 29 (фрагмент): «Кретц (Kretz, 1969) использует... Он отмечает... Цель работы... Автор сравнивает и отмечает... Автор объясняет...». На стр.30: «В рамках методологии Ю.Л. Войтеховского предлагается концепция о горной породе как пространстве... Ю.Л. Войтеховский предложил ряд последовательных математических образов и определение минерального агрегата... Ю.Л. Войтеховский предложил использовать статистический подход к определению структур...». Рис. 9 и рис. 10 (стр. 38): «Барицентрический треугольник вероятностей $\{p_{11}, p_{12}, p_{22}\}$ (1 и 2 – минералы). Показаны структурные индикатрисы для разных областей диаграммы. Цифрой 2 обозначена линия равновесия Харди-Вайнберга», другие обозначения не комментируются. В качестве основы для моделирования взята правильная гексагональная сетка (стр. 37), где для каждого случая отдельно подсчитывались контакты $r_{чч}$, $r_{чб}$, $r_{бб}$ в общем виде (стр. 41). При этом на стр. 39, 41 показана неправильная гексагональная сетка. Автор рассматривает в качестве модели шпировые текстуры. Неясно, что принимается за шпир. В петрографической литературе шпир – это отличные по структуре и составу участки горной породы. Выделяются инъекционные и конституционные шпировые структуры.

4. В главе 3 приводятся отдельные обрывочные данные по геологии Керетского архипелага. Неясно, почему для иллюстрации методики выбраны амфиболиты. Здесь имеет место комплекс TTG. Рис. 39 весьма абстрактный.

На с. 78 неясна фраза: «В случае биминеральных агрегатов теоретическая основа методологии наиболее развита».

Нужно пояснить и следующую фразу: «На рис. 45 видно распределение шлифов в зависимости от степени обогатимости. Сплошные апатитовые руды (Хибинский массив) близки к вершине p (Ar-Ar). Для них извлечение апатита наилучшее из-за отсутствия сростков с другими минералами. Для точек в центре диаграммы увеличивается доля других контактов: апатита с матрицей и матрицы с матрицей, что усложняет раскрытие сростков и извлечение».

Неясно, почему по апатитовым месторождениям Хибин автор делает ссылки (с. 82) на работы Полканова (1937) и Пекова и др. (2004), ведь основополагающие работы Ферсмана, Лабунцова, Дудкина, Зака, Каменева, Богацкого?

Материалом для исследований послужили 9 шлифов апатитовых руд с Кировского рудника. Для статистического анализа 9 шлифов – это маленькая выборка (стр. 83). Сле-

довало акцентировать внимание, что образцы представляют собой уже изученные обогатителями типовые руды.

Что касается магнетитовых кварцитов Костомукшского рудного поля, то имеет место нарушение алфавитного порядка в ссылках на источники (стр. 88, Горьковец и др. 2015, п. 61 списка литературы). Для описания объекта выбраны спорные источники. «Рис. 47 – Схематическая геологическая карта (а) и разрез (б) Костомукшского месторождения (Кривцов, 1991)». На самом деле Кривцов использует карту из ранних работ Института геологии Кар НЦ РАН.

С. 89: «Запасы железистых руд оцениваются в 10 млрд. т.». Реальные запасы месторождения оцениваются как $V+C_1$ 966,9 и C_2 115,87 тыс. т. «Среднее содержание железа в рудах – 32 %, но может достигать и 60 % в богатых рудах. ... Корпангское месторождение расположено в 3 км на СЗ от Костомукшского. Его запасы оцениваются в 485,9 млн. т при содержании железа в руде 30 %». Это не соответствует конкретным данным – магнетитовые кварциты Корпангского месторождения более богатые, при этом месторождение удалено на 20 км, запасы $V+C_1$ 313,6 и C_2 13,267 тыс.т. (Минерально-сырьевая база Республики Карелия. Петрозаводск, 2004. 279 с.).

5. С. 113: «Глава 4 посвящена исследованию способов автоматического подсчета межзерновых контактов, поскольку это основная проблема развиваемой автором методологии типизации структур». Не путает ли автор методологию и методику? Метод – путь исследования или познания, способ достижения какой-либо цели. Методика – это, как правило, некий готовый «рецепт», алгоритм, процедура для проведения каких-либо нацеленных действий.

7. Заключение по диссертации

Высказанные замечания и предложения не снижают общей положительной оценки работы. Диссертация А.А. Захаровой «Математическое моделирование минеральных агрегатов: теория и геологическое приложение» представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в рамках которой предложена математическая модель минерального агрегата на основе вероятностей бинарных и тернарных межзерновых контактов, получены конкретные научные и прикладные результаты. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Диссертация «**Математическое моделирование минеральных агрегатов: теория и геологическое приложение**», представленная на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.05 – Минералогия, кристаллография полностью отвечает требованиям раздела 2 «Положения о присуждении ученых

степеней» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», утвержденного приказом ректора Горного университета от 20.05.2021 № 953 адм, а ее автор **Захарова Алена Александровна** заслуживает присуждения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.05 – Минералогия, кристаллография.

Отзыв на диссертацию и автореферат диссертации **Захаровой Алены Александровны** обсужден и утвержден на заседании отдела минерального сырья Института геологии – обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук», протокол № 3 от 09.09.2022 года. Присутствовали: 17 человек; проголосовали «за» 17, «против» 0, «воздержались» 0.

Заведующий отделом минерального сырья
Института геологии – обособленного подразделения
ФГБУН ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
главный научный сотрудник, д.г.-м.н.

Щипцов Владимир Владимирович

Секретарь заседания

к.г.-м.н.

ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ
ВЕДУЩИЙ ДОКУМЕНТОВЕД
Л. В. ТИТОВА
«09 сентября 2022»



Первунина Аэлита Валериевна

Сведения о ведущей организации:

Институт геологии – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук»

Почтовый адрес: 185910, Петрозаводск, ул. Пушкинская, д. 11

Официальный сайт в сети Интернет: <https://igkrc.ru/>

e-mail: geolog@krc.karelia.ru, телефон: (8142) 78-27-53