

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
на диссертацию Соболева Сергея Николаевича
на тему: " СТРУКТУРНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА ДИНАМИКИ
ОБРАЗОВАНИЯ КУМУЛАТОВ В РАССЛОЕННЫХ ИНТРУЗИВАХ»,
представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических
наук
по специальности 1.6.4. – Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические
методы поисков полезных ископаемых

Диссертационная работа посвящена актуальной теме – механизму формирования крупных расслоенных базитовых интрузий. Эти объекты имеют большие размеры и времена формирования. Остывание магмы от магматической температуры ($1200\div1300^{\circ}\text{C}$ и выше) до $800\text{-}700^{\circ}\text{C}$, когда закрываются процессы обменных равновесий магматических минералов, может занимать тысячи, десятки тысяч лет. При периодическом поступлении порций новой магмы жизнь магматических центров возрастает до сотен тысяч-миллионов лет. Значительную часть своей жизни интрузивы проводят в состоянии частичных расплавов, т.е. пористых кристаллических агрегатов, пропитанных расплавом и флюидом. Магматические минералы растут из расплава, оседают и проводят большую часть высокотемпературной жизни в таком пористом кумулусе. Структурные исследования: измерение распределения по размерам, ориентировки кристаллов магматических минералов, пространственной корреляции распределения (изотропного, анизотропного в виде слоистости) являются источником важной информации о физико-химических процессах в субсолидусных условиях. Исследование простейшего признака изотропных (в смысле равномерности распределения кристаллов в объеме) пород – распределения по размерам минералов (CSD) позволяет оценить в какой степени и за счет чего CSD изменяется в кумулусе. Это в том числе позволит ответить, как процессы при субсолидусных параметрах могут привести к формированию месторождений полезных ископаемых, таких как месторождения элементов платиновой группы и хрома.

Объектом исследований диссертанта стало изучение распределений по размерам оливина ультрабазитов Йоко-Довыренской платиноносной расслоенной интрузии. Также диссертантом изучено CSD оливина из ультрамафитовых разностей Мончеплутона, включая дунитового блока и локализованного в нем месторождения хромитовых руд. Исследования дополнены изучением распределения по размерам нефелина рудоносного Ловозерского массива. Для анализа условий кристаллизаций изученных объектов проведено геохимическое и термодинамическое моделирование кристаллизации соответствующих магм. Важная информация для анализа процессов

протекающих в кумулусе получена при картировании распределения микроэлементов, включая фосфор, в оливинах изученных ультрабазитов.

Диссертационная работа изложена на 234 страницах, содержит 67 иллюстраций, 12 таблиц, 251 пункт списка литературы и состоит из Введения, пяти глав, Заключения и Приложений 1, 2 (13 таблиц CSD и составов пород).

В разделе диссертации «Введение» дается общая характеристика актуальных для решения задач, формулируется основная цель работы, приводятся другие необходимые сведения, включая защищаемые положения.

Первая глава - Литературный обзор и методы исследований. В этой главе диссертант изложил широкий спектр проблем, связанных с динамикой кристаллизации магматической камеры, всего 18 отдельных тем и подтем. Наиболее полный и удачный обзор представлен по распределению кристаллов по размерам (CSD) в интрузивах. В этом разделе кратко рассмотрены все опубликованные за последние 20 лет попытки измерения и интерпретации распределения по размерам в интрузивах основного состава и одного щелочного массива Илимаусак. Другие вопросы рассмотрены менее подробно, например, в подразделе динамики магматических камер только две ссылки. Достаточно подробно и адекватно сделаны обзоры по публикациям по зональности оливина по фосфору и по осцилляторной зональности минералов.

В первой главе изложен интуитивный способ моделирования распределения по размерам без решения уравнения непрерывности для функции распределения. Скорости роста и нуклеации записаны в общем виде, следуя работе (Spohn et al., 1988) и параметризованы с использованием максимальной скорости роста и нуклеации и отвечающим им переохлаждениям. Скорость охлаждения задается фиксированной скоростью потери тепла. Также изложены методика измерения CSD, описаны методики использования электронной микроскопии и микрозонда в исследованиях.

Вторая глава посвящена «Йоко-Довыренскому расслоенному массиву». Распределение по размерам было измерено для 21 образцов, отобранных по разрезу снизу вверх на профиле с разницей 350 м в стратиграфическом разрезе массива. Установлено, что распределения оливина по размерам принадлежат трем типам: логлинейному, бимодальному, логнормальному. Типы распределения перемежаются, однако бимодальные приурочены к низу разреза. В нижней дунитовой части разреза преобладают распределения логлинейного типа. Каждая из 5 условных пачек начинается логлинейным или бимодальным и заканчивается логнормальным. Пачки можно связать с отдельными внедрениями свежей магмы и эпизодами отсадки оливина. Автором обнаружена корреляция, не имеющая исключений, образцы с логнормальным

распределением оливина обеднены серой и хромом, а в некоторых образцах с логлинейным распределением наблюдаются максимальные значения содержаний этих элементов. Поведение Ir и Ru логично связывается с переносом серы и хрома. Также приведены карты распределения микроэлементов, включая фосфор, для оливинов с бимодальным и логнормальным распределениями по размерам. В первом образце охарактеризованы уплощенные зерна оливина (отношение длина к ширине в сечении около 4). В них центральная часть отдельного зерна и цепочки зерен обогащена фосфором. Автор приписал эти разводы следам дендритов, с которых мог начаться рост. Во втором образце рисунок распределения более сложный: параллельные поверхности роста полосы, обогащенные фосфором, пересекаются под острым углом в кристалле. Эти структурные черты связаны с перекристаллизацией, приводящей к логнормальному распределению.

В массиве опробованы образцы троктолитов и верлитов, расположенных выше по разрезу. В этих породах имеются мелкие включения оливина в плагиоклазе и плагиоклаза в оливине. Крупные оливины могут иметь неправильные очертания с заливами, хвостами. Также оливины встречаются в виде включений в ойокристах клинопироксена. В этой ситуации сложно выделить границы зерен оливина. Большая разнородность популяции оливина выражается в средней по нескольким образцам CSD, которое имеет в полулогарифмических координатах вид выгнутой гиперболы. Отсутствие точек на графиках CSD не позволяет проверить достоверность представления данных двумя отрезками. Известно, что плагиоклаз плохо деформируется и обладает малой плотностью, вследствие чего троктолитовые кумулаты, видимо, подвергались незначительной компакции. Карты микроэлементов оливина из троктолита демонстрируют выразительную ростовую зональность по фосфору в ядрах сохранившихся “as grown” кристаллов. Наблюдаемое обрезание ростовой зональности по фосфору связано с процессами растворения и роста. Соискатель изложил в этой главе большой объем информации по CSD оливина и предъявил убедительную связь структуры с составом оливин содержащих пород Йокондовыренского массива.

Третья глава посвящена исследованию Мончеплутона и комагматичных ультрамафитов. Плутон представлен в обнажениях как система блоков различного состава, возможно с тектоническими контактами. Автором исследовано тело ультрамафитов вскрытое скважиной M1 и интерпретированного как фрагмент подводящей системы для Мончеплутона. Оливин в образцах M1 обычно сильно корродирован ортопироксеном и серпентином. Все измеренные CSD оливина близки к

логлинейным и имеют лишь незначительно выраженные максимумы функции распределения. Также автором охарактеризованы породы дунитового блока имеющего неясное соотношение со всем массивом и включающего Сопчеозерского месторождение хромита. В шлифах видно, что все минералы уплощены и имеют ясную параллельную ориентировку. Степень анизотропии текстуры много выше, чем в дунитах Йоко-Довыренского массива. Это указывает на то, что текстура связана с тектоническими деформациями. Многие CSD оливина имеют явно выраженный логнормальный характер. Причем форма пика уплощена до плато, что можно связать с механическим воздействием. Хромит в руде часто замещает оливиновый агрегат и иногда заполняет интерстиции между кристаллами. Приведенные автором черты присущи «podiform» офиолитовым хромитам, в которых кристаллизация хромита связывают с флюидным переносом. Ярко выраженная зональность оливина по никелю и железу также говорит об относительно низкой (не магматической температуре) тектонических деформаций. Сопряженная система ориентировок может отвечать сдвиговым напряжениям и разрушениям (в том числе пластическим) отвечающим росту локального давления (среднего напряжения) за счет низкотемпературной кристаллизации хромита с ростом объема. Таким образом, полученные автором данные характеризуют режим деформаций не связанных с магматизмом и компакцией.

Четвертая глава диссертации посвящена Ловозерскому расслоенному массиву. Автором измерены распределения по размерам кристаллов нефелина из уртитов. Они составляют незначительную часть расслоенного комплекса эвдиалитовых луявритов. Слои существенно нефелиновые кумулаты имеют небольшую мощность 1-20 метров. В связи с малой плотностью и механическими свойствами нефелина и небольшой мощностью слоев, они не претерпели заметную компакцию а также не испытали композиционную конвекцию интерстициального расплава, уплотняющегося при кристаллизации. Распределения по размерам нефелина в совокупности близки к распределениям по размеру оливина в троктолитах с высоким содержанием плагиоклаза, которые при формировании также не подверглись существенной компакции. Автором они классифицированы как логлинейные и бимодальные по нефелину. Выделены две генерации нефелина содержащего (1) и не содержащего (2) эгирин, который образуется при понижении температуры при распаде твердого раствора с нефелином. Отмечается, что в некоторых образцах преобладает одна (1 или 2) генерация, а в некоторых представлены обе. Соискатель с помощью программы MELTS нашел, что кристаллы разных генераций отвечают эпизодам полибарической кристаллизации магмы в процессе подъема. Также представлены распределения

рудных минералов лопарита и апатита. Апатит характеризуется идеальным логлинейным CSD, что говорит о его прямой кристаллизации из расплава. Логнормальная форма распределения лопарита, как и хромита Мончегеплутона, видимо, свидетельствует о поздней кристаллизации этих минералов и не связана с субсолидусной перекристаллизацией. Из этого следует, что форма распределения не может быть однозначным критерием механизма ее формирования.

В пятой главе рассмотрен кинетический и динамический контекст полученных результатов. Автор попытался, опираясь на литературу и свою интерпретацию наблюдений распределений по размерам оливинов и картам распределения фосфора, реконструировать умозрительную динамическую историю формирования интрузивов. Интерпретация всех локальных повышений содержания фосфора как следов дендритов или высокой скорости роста оливина из расплава приводит автора к необходимости обосновать высокие переохлаждения, как в начале, так и в конце застывания интрузива. Также автор попытался дать очередное объяснение (их уже предложено немало) механизма формирования логлинейного распределения кристаллов по размеру. Для этого использована модель, описывающая кристаллизацию однокомпонентного расплава с постоянной скоростью охлаждения. При использовании допущения о повышении скорости кристаллов с размером соискатель получил CSD, совпадающее с логлинейным распределением по размерам оливина из дунита Йоко-Довыренского массива.

В кратком разделе «Заключение» суммируются представления рассматриваемой проблемы и формулируются общие выводы.

Проделанная работа внесла существенный вклад в изучении структур магматических кумулатов и механизмов их формирования. Широкий охват объектов исследования от ультрабазитовых оливин-содержащих кумулатов до кумулатов Ловозерского массива, где главной фазой является нефелин – позволил охарактеризовать распределения по размерам легко деформируемого оливина и «жесткого» нефелина. Это позволяет убедительно связать формирование логнормального распределения по размерам с взаимодействием с интеркумулясным расплавом. Данные диссертанта позволяют сравнить текстуры ультрамафитов, возникшие в результате тектонических деформаций при относительно низких температурах и деформаций кумулуса при магматических температурах. Автор с коллегами получил первые в России данные картирования магматического оливина по микроэлементам, включая фосфор. Уникальные данные по оливину из троктолитов Йоко-Довыренского массива впервые показали сохранения первичной ростовой

зональности оливина по фосфору, не стертой за время длительных субсолидусных процессов.

В целом, содержание работы позволяют говорить о ней как о серьезном и полноценном исследовании, потенциал которого будет раскрываться еще много лет. Титаническая работа по оцифровке структуры сотен шлифов магматических пород и компьютерная обработка данных проделана на высоком профессиональном уровне и заслуживает высочайшей оценки. Диссертационная работа, с ее охватом различных аспектов теоретической и практической петрологии магматических пород однозначно оправдывает представление её по специальности 1.6.4 – Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых.

Защищаемые диссертантом научные положения базируются на анализе фактических материалов и результатов исследований, приводимых в разных главах работы.

Первое защищаемое положение констатирует деление распределений кристаллов по размерам в изученных интрузивах на три класса: логлинейного, бимодального и логнормального. В качестве механизмов формирования приписываются рост из расплава при одном, двух актах нуклеации и перекристаллизации за счет частичного растворения, соответственно. Обоснованность защищаемого положения не вызывает сомнения.

Во втором защищаемом положении диссертант утверждает, что зональность кумулусного оливина по фосфору в оливиновых и оливин-плагиоклазовых кумулатах Йоко-Довырена и Мончеплутона свидетельствует о распространении в магматических камерах начального скелетного роста при высоком переохлаждении (более 10–30°C), частичном растворении мелких зерен, растворении под давлением, быстром зарастании пор кумулуса на последнем этапе затвердевания. По-моему мнению, диссертант недооценил влияние дополнительных факторов ведущих к обогащению и локализации фосфора в оливине: деформаций и флюида. Он не придавал значение явным признакам низкотемпературных тектонических деформаций и связанных с этим изменений текстуры породы и распределения фосфора в оливине дунитового блока Мончеплутона. При этом его выводы полностью согласуются с современными взглядами китайских исследователей и их последователей и могут быть в этом качестве приняты.

Третье защищаемое положение говорит о корреляции между химическим составом пород, CSD и зональностью оливина в дунитах Йоко-Довырена и Мончеплутона. Это положение подтверждено наблюдениями об обеднении пород с

логнормальным распределением оливина по размерам, формируемом при промывании кристаллического агрегата интеркумулясным расплавом, хромом и элементами, накапливающимися в сульфиды. Оно не вызывает сомнения.

Диссертация содержит ряд спорных с моей точки зрения положений. Большое значение автор приписывает неясным зонам повышенной концентрации фосфора, обнаруженным в некоторых кристаллах оливина. Во второй главе такие кристаллы найдены в образце дунита. Кристаллы имеют вид серии уплощенных, деформированных при компактизации зерен. Эти пятна похожи на результат перераспределения фосфора, возможно изначально приуроченного к ядрам кристаллов, при пластической деформации. Эта трактовка особенно убедительно для кристаллов оливина, описанных в оливин-хромитовых сростках из дунитового блока Мончеплутона (глава 3). Автором представлены карты распределения микроэлементов для двух образцов из дунитового блока. В образце дунита по фосфору отчетливо видны субзерновые (внутри большого кристалла оливина) границы с признаками пластической деформации. Эти границы также проявлены по быстрым элементам железу и кальцию. Все указывает на низкую температуру (не магматическую) деформаций и на перераспределение фосфора в этом процессе. Такую же картину имеет распределение микроэлементов в образце агрегата оливина и хромита из хромитита. В этом образце удлиненные кристаллы оливина имеют две сопряженные системы ориентации. Фосфором обогащены линейные зоны в оливине вдоль этих направлений, причем в некоторых случаях виден переход к трещинам в оливине с той же ориентировкой, стенки, которых обогащены фосфором.

Формирование обогащенных фосфором зон может быть связано также с появлением флюида обогащенного фосфором на поздней стадии кристаллизации кумулула. На тройном стыке зерен оливина из троктолита Йоко-Давыренского массива (вторая глава) найдена асимметричная зона нарастания оливина с фосфором со стороны одного из кристаллов. Эта зона начинается с очень резкой границы обогащенной фосфором, но обедненной титаном. Автор связывает вариации содержания фосфора только с кинетикой роста из расплава и вынужден придумывать сценарии резкого охлаждения. Вместе с тем на поздней стадии кристаллизации в поровом пространстве появляется флюид, оказывая огромное влияние на реологию и состав оливина. Маловодный щелочной флюид может содержать значительное количество фосфора и вызвать резкий рост его содержания в кайме. Асимметрия обрастания может быть связана с порой заполненной флюидом и расплавом. Наличие флюида в современных ультрамафитовых кумулатах под КГВ подтверждается геофизическими методами.

Автор ограничивает описание распределений по размерам принятыми в литературе. Тогда как распределение кристаллов оливина по размеру в троктолитах и нефелина в уртитях хорошо описывается в билогарифмических координатах степенной функцией. CSD оливинов из троктолитов аппроксимируются степенной функцией $n(R)=a/R^{-4+5}$. Показатель степени может отвечать какому-то фрактальному процессу (для пузырей флюида в пирокластике $k=2.8$). Фрактальное распределение может отвечать многоактной (непрерывной?) нуклеации. К фрактальному стремится распределение по размерам оливинов в мантийных перидотитах.

В четвертой главе приводится классификация кристаллов оливина по содержанию ориентированных вростков эгирина. Нефелин представляет твердый раствор собственно нефелина, тридимита и эгирина. Поскольку распад твердого раствора происходит при низкой температуре, в субсолидусе, то неясно, чем отличались кристаллы этих генераций при кристаллизации из расплава. Может быть содержанием железа, т.е температурой кристаллизации? В настоящее время нет достаточного объема экспериментальных данных и адекватных моделей твердых растворов в подсистемах Ab-Ne, Ne-Aeg, что делает невозможным строгий расчет диаграмм плавкости в щелочных системах и не позволяет оценить температуру кристаллизации по полному содержанию железа в нефелине. В связи с этим также неясно, по какой модели твердых растворов считает MELTS щелочные системы.

Глава 5. Используемая автором модель подходит для исследования закалочной кристаллизации и стеклования однокомпонентного расплава при достаточно большой скорости охлаждения. Температура максимума скорости нуклеации в реальных многокомпонентных силикатных расплавах ниже на 100-250°C максимума скорости роста и достигается лишь в зонах закалки (первые 1-10 см от контакта) в дайках на переходе к участкам стеклования. В области умеренных переохлаждений скорость нуклеации экспоненциально нарастает от переохлаждения при слабо растущей скорости роста. Именно такое объяснение для формирования логнормального распределения предлагал Marsh (1998). Экспоненциальный характер нарастания скорости нуклеации при малых переохлаждениях приводит к появлению конечного порога гомогенной нуклеации из расплава (минимального переохлаждения), хорошо известного из эксперимента. Близкое по природе значение минимальной величины сброса давления, необходимое для начала гомогенного зарождения пузырей из расплава рассчитано и подтверждено экспериментально многими авторами (в том числе, и нами в ИЭМ).

Перечисленные замечания не влияют на общую объективно высокую оценку представленной работы. Ценные данные, полученные соискателем, и твердо установленные факты можно было изложить короче. Однако, включение спорных вопросов в диссертацию порождает плодотворные дискуссии, задающие направление дальнейшей работы.

Исследование С.Н. Соболева, несомненно, найдет применение в практической работе многих исследователей, которые изучают процессы формирования ультрабазитов и щелочных пород. Полученные в работе результаты обладают несомненной новизной, а диссертация представляет собой законченное исследование, выполненное на высоком уровне. Результаты диссертации могут служить хорошей основой для дальнейших исследований и найти применение на геологических факультетах университетов и в геологических институтах РАН и МИНГЕО. Материалы диссертации были представлены на 16-ти международных и российских конференциях и опубликованы в 5-ти статьях в реферируемых журналах, рекомендованных ВАК. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, представляет собой законченную научно-квалификационную работу и полностью удовлетворяет критериям «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а её автор, Соболев Сергей Николаевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.4 – Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых.

Официальный оппонент:

Главный научный сотрудник ИЭМ РАН
доктор физ.-мат. наук



Симакин А.Г.

28.04.2025

Институт Экспериментальной минералогии им. акад. Д.С. Коржинского Российской академии наук (ИЭМ РАН)

142190, г. Черноголовка, МО, ул. Осипьяна, д. 4, ИЭМ РАН

Тел.: +7(49652)44425, E-Mail: IEM_direct@iem.ac.ru

Подпись д.ф.-м.н. Симакина А.Г. заверяю

Учёный секретарь ИЭМ РАН к.г.-м.н Т.Н. Ковальская



Я, Симакин Александр Геннадьевич, даю согласие на включение персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

28 апреля 2025 г.

Сведения об официальном оппоненте

Я, Симакин Александр Геннадьевич, даю свое согласие выступить в качестве официального оппонента по диссертации Соболева Сергея Николаевича «СТРУКТУРНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА ДИНАМИКИ ОБРАЗОВАНИЯ КУМУЛАТОВ В РАССЛОЕННЫХ ИНТРУЗИВАХ» по специальности 1.6.4 «Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых», представленной на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук.

О себе сообщаю:

Фамилия, имя, отчество: Симакин Александр Геннадьевич

Ученая степень: доктор физико-математических наук

Должность: заведующий лабораторией физико-химических проблем магматизма, главный научный сотрудник

Наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт экспериментальной минералогии им. Д.С. Коржинского Российской академии наук (ИЭМ РАН)

Адрес организации: 142432 Российская Федерация, Московская область, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 4

Телефон: +7(49652)5853

e-mail: simakin@iem.ac.ru

Список основных публикаций по теме рецензируемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

Low Crustal Fluid Reservoirs in Ultramafic Cumulates of Kamchatka AG Simakin, OY Shaposhnikova Petrology 2023, 31 (6), 705-717.

Convective Melting and Water Behavior around Magmatic-Hydrothermal Transition: Numerical Modeling with Application to Krafla Volcano, Iceland AG Simakin, IN Bindeman Journal of Petrology, 2022, 63 (8), egac074.

Experimental study of interaction of carbonic fluid with cumulus minerals of ultrabasic intrusions at 950° C and 200 MPa AG Simakin, TP Salova, OY Shaposhnikova, SI Isaenko, AN Nekrasov Petrology, 2021, 29, 371-385

Experimental Study of Pt Solubility in the CO-CO₂ Fluid at Low fO₂ and Subsolidus Conditions of the Ultramafic-Mafic Intrusions A Simakin, T Salova, AY Borisova, GS Pokrovski, O Shaposhnikova, Minerals, 2021, 11 (2), 225

Fo and Ni relations in olivine differentiate between crystallization and diffusion trends B Gordeychik, T Churikova, T Shea, A Kronz, A Simakin, G Wörner Journal of Petrology, 2020, 61 (9), egaa083.

Crystallization of Cpx in the Ab-Di system under the oscillating temperature: contrast dynamic modes at different periods of oscillation AG Simakin, VN Devyatova, AN Nekrasov, 2020, Advances in Experimental and Genetic Mineralogy: Special Publication to 50th

Я, Симакин Александр Геннадьевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку, в том числе на размещение сведений на сайте ФГБУН Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН.

Симакин А.Г.



Дата: 28 апреля 2025 г.

Подпись А.Г. Симакина удостоверяю:

Учёный секретарь ИЭМ РАН к.г.-м.н Т.Н. Ковальская

