

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ГЕОХИ РАН
Д.Х.Н. чл.-корр. РАН



Р.Х. Хамизов

«марта 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки **Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН)** о диссертации **Сергея Николаевича СОБОЛЕВА «СТРУКТУРНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА ДИНАМИКИ ОБРАЗОВАНИЯ КУМУЛАТОВ В РАССЛОЕННЫХ ИНТРУЗИВАХ»**, представленной на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.4 - минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых.

Диссертация **«СТРУКТУРНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА ДИНАМИКИ ОБРАЗОВАНИЯ КУМУЛАТОВ В РАССЛОЕННЫХ ИНТРУЗИВАХ»** выполнена в лаборатории термодинамики и математического моделирования природных процессов ГЕОХИ РАН во время обучения в очной аспирантуре ГЕОХИ РАН.

В 2019 соискатель окончил Геологический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова по направлению 05.03.01 Геология с присвоением степени бакалавра. В 2021 году соискатель окончил Геологический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова по направлению 05.04.01 Геология с присвоением степени магистра. В 2021-2024 гг. соискатель обучался в очной аспирантуре ГЕОХИ РАН по направлению Науки о Земле по профилю Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых, где после окончания ему была присвоена квалификация «Исследователь. Преподаватель-исследователь». Во время подготовки диссертации соискатель работал в должности младшего научного сотрудника (с 2021 по 2024 год) и позднее научного сотрудника (с 2024 года по настоящее время) в лаборатории термодинамики и математического моделирования природных процессов ГЕОХИ РАН.

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана ГЕОХИ РАН 24 февраля 2025 года.

Научный руководитель: доктор геолого-минералогических наук Арискин Алексей Алексеевич, профессор кафедры петрологии и вулканологии Геологического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», ведущий научный сотрудник ГЕОХИ РАН.

По результатам рассмотрения вышеозначенной диссертации принято следующее заключение.

Актуальность темы исследования. Информация о количественных параметрах структуры кумулятивных пород (распределения кристаллов по размеру или **Crystal Size Distribution – CSD**) и зональности по примесным элементам (фосфор в оливине) в настоящее время представлена в литературе в ограниченном виде, что обусловлено трудоемким процессом ее получения. В то же время, развитие в последние годы моделей первичной кристаллизации (Marsh., 1988, 1998; Higgins, 2006; Spohn et al., 1988; Hort, Spoh, 1991; Симакин, 2005; Toramaru, Kichise, 2023) и преобразования (Lifshitz, Slyozov, 1961; DeHoff, 1991; Higgins, 2002; Hunt et al., 2017; Mills, Glazner, 2013; Da Silva et al., 2017; Simakin, Bindeman, 2008; Simakin et al., 2020) популяций кристаллов в силикатных расплавах, а так же экспериментальных работ по изучению вхождения примесных элементов в оливин при разных скоростях кристаллизации (Milman-Barris et al.,

2008; Shea et al., 2019) делают актуальным использование природной информации о CSD и зональности для изучения широкого круга процессов, играющих роль при становлении расслоенных интрузивов и кумулятивных пород. Такой подход, дополненный корреляциями с геохимическими данными позволяет расширить представления о динамике внутрикамерной дифференциации, включая кристаллизацию пограничных слоев, формирование и эволюцию кумулусных систем.

Конкретное личное участие соискателя. Все материалы, касающиеся анализа, обработки и обобщения использованной в работе петролого-геохимической информации, являются продуктом научной деятельности соискателя. В частности, им проведены по несколько полевых сезонов и отобран материал на трех расслоенных массивах (Йоко-Довыренском, Мончегорском и Ловозерском), самостоятельно измерены в ручном и полуавтоматическом режиме около 100 000 кристаллов оливина, хромшпинелида, нефелина, лопарита и апатита, получены геохимические данные по Мончегорскому плутону, обработаны и проанализированы карты распределения фосфора и некоторых других примесных элементов (Ti, Al, Ca, Ni) в оливине, проведено термодинамическое моделирование кристаллизации магм изученных массивов, предложена новая численная модель образования логлинейного CSD.

Степень достоверности результатов исследований. Достоверность полученных результатов определяется широким разнообразием и представительностью природного материала и согласованностью между численными модельными расчетами и тестовыми выборками. Результаты исследований опробованы при реализации проектов РНФ, отражены в докладах на международных и российских конференциях, а также публикациях в рецензируемых научных изданиях.

Научная новизна. Впервые для Йоко-Довыренского, Мончегорского и Ловозерского интрузивов для разных типов кумулатов приводятся данные по CSD и зональности оливина по примесным элементам (в первую очередь – Р). Показано, что распределения представляют три главных типа: логлинейное, бимодальное и логнормальное. Выявлено противоречие между представлением о медленной кристаллизации на последних стадиях затвердевания кумулатов и впервые обнаруженным обогащением фосфором оливина, заместившего поровое пространство при окончательном затвердевании кристаллической каши. На примерах фосфорной зональности и CSD оливина показано, что ранний этап кристаллизации большей части оливиновых кумулатов протекал при относительно высоких переохлаждениях 10-30°C и более, когда включатся режимы скелетного роста и формируется осцилляторная зональность оливина. В зональности оливина из дунитов и троктолитов Йоко-Довыренского массива описаны признаки компактизации кумулатов путем растворения под давлением на контактах зерен. Этот эффект (известный из экспериментальных работ) ранее не наблюдался на природном оливине. Для дунитов Йоко-Довыренского и Мончегорского интрузивов установлена корреляция типа CSD оливина и валового содержания в рудных компонентах (Cu, Ni, ЭПГ, Cr).

С использованием метода геохимической термометрии для нефелиновых пород Ловозерского массива и моделирования кристаллизации, оцененного исходного расплава, продемонстрировано, что бимодальная зональность нефелина уртитов и бимодальное CSD могут быть результатом вторичной нуклеации в условиях адиабатического подъема щелочной магмы, содержащей разное количество интрателлурического нефелина.

Предложена модификация кинетической модели (Spohn et al., 1988), которая позволяет получить логлинейное CSD с использованием нормальных кинетических функций скорости нуклеации и роста, а также переменной зависимости скорости роста от размера зерен.

Практическая значимость работы. Работа вносит практический вклад в развитие методологии петролого-геохимических и количественных петрографических исследований процессов внутрикамерной дифференциации магм. Тогда как в технологическом процессе решается прямая задача – варьирование условий для получения кристаллического продукта нужной дисперсности и структуры, в настоящей работе развивается обратный подход, где по известной структуре пород выясняется эволюция условий (в первую очередь, переохлаждения и перегрева) в магматических системах, приводящая к данной гранулометрии, габитусу и зональности кумулусных зерен.

Размеченные изображения шлифов могут быть использованы для обучения моделей машинного зрения, основанных на искусственном интеллекте. Их развитие в последние годы имеет лавинообразный характер (Bukharev et al., 2018; Jiang et al., 2018; Murtazin et al., 2023; Han, Liu, 2024; Hassan et al., 2024; Zhang et al., 2024; Liu et al., 2024) и в скором времени может эффективно способствовать росту доступной количественной петрографической информации.

Ценность научных работ соискателя складывается из значительных по объему и качеству гранулометрических данных для кумулятов расслоенных массивов и набора наблюдений фосфорной зональности оливина в них, уникального по количеству отраженных петрогенетических процессов.

Научная специальность, которой соответствует диссертация. По тематике, методам исследования, предложенным новым научным положениям диссертация соответствует паспорту специальности научных работников 1.6.4. – Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых.

Пункты, которым соответствует работа:

2. Физика, химия и термодинамика минералов, современные физикохимические методы исследования минералов.

3. Генетическая минералогия, исследование парагенезисов минералов и эволюции минералогенеза в природных и техногенных системах; экспериментальная минералогия.

13. Изучение химического состава природного вещества в геологических и связанных с ними системах (земной коре, глубинных геосферах Земли, гидросфере, атмосфере, техносфере, внеземных объектах, живом веществе) и процессах, исследование состояния, форм нахождения, закономерностей распространенности и поведения (распределения, концентрирования, фракционирования) химических элементов и их изотопов.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем ученой степени. Все основные научные выводы, которые находятся в основе защищаемых положений, отражены в материалах опубликованных автором статей и тезисов научных докладов. По теме диссертации автором опубликовано 21 печатная работа, среди которых 16 материалов конференций и тезисов докладов и 5 статей в ведущих профильных журналах («Петрология», «Геология и геофизика», «Minerals»), входящих в перечень ВАК РФ (К1) и индексируемых базами Scopus и Web of Science.

Статьи:

1. **Соболев С.Н.**, Арискин А.А., Николаев Г.С., Пшеницын И.В.. Три типа распределения кристаллов оливина по размеру в дунитах Йоко-Довыренского массива как сигналы различной истории их кристаллизации // Петрология. 2024. Т. 32. № 4. С. 509–526.

2. **Соболев С.Н.**, Арискин А.А., Николаев Г.С., Пшеницын И.В. Распределения кристаллов по размеру как ключ к эволюции протокумulusa в расслоенных массивах: эксперименты, расчеты и практика определения CSD // Петрология. 2023. Т. 31. № 6. С. 649–665.

3. Арискин А.А., Данюшевский Л.В., Фиорентини М., Николаев Г.С., Кислов Е.В., Пшеницын И.В., Япаскерт В.О., **Соболев С.Н.** Петрология, геохимия и происхождение сульфидоносных и эпг-минерализованных троктолитов из зоны Конникова в Йоко-Довыренском расслоенном интрузиве// Геология и геофизика. 2020. Т. 61. № 5–6. С. 748–773.

4. Ariskin A.A., Tessalina S.G., Kostitsyn Y.A., Pshenitsyn I.V., **Sobolev S.N.**, Nikolaev G.S. Kislov E.V. Re-Os Systematics in the Layered Rocks and Cu-Ni-PGE Sulfide Ores from the Dovyren Intrusive Complex in Southern Siberia, Russia: Implications for the Original Mantle Source and the Effects of Two-Stage Crustal Contamination // Minerals. 2023. V. 13 P. 1356. doi: 10.3390/min13111356.

5. Pshenitsyn I.V., Ariskin A.A., Korost D.V., **Sobolev S.N.**, Yapaskurt V.O., Nikolaev G.S., Kislov E.V. X-ray Computed Tomography of PGE-Rich Anorthosite from the Main Reef of the Yoko-Dovyren Layered Massif // Minerals. 2023. V.13. P. 1307, doi: 10.3390/min13101307.

Результаты исследований по теме диссертации докладывались на 24 совещаниях и конференциях: ежегодных семинарах по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии (ВЕСЭМПГ, ГЕОХИ РАН, Москва) в 2018, 2020, 2022, 2023 гг.; всероссийских конференциях «Физико-химические факторы эндогенного петро- и рудогенеза: новые рубежи»

(ИГЕМ РАН, Москва) в 2019, 2024 гг.; XXI, XXIV, XXV международных конференциях «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле» в 2020, 2023, 2024 гг. (ГЕОХИ РАН, Москва); XX, XXI Ферсмановской научной сессии (ГИ КНЦ РАН, Апатиты) в 2023, 2024; международных молодежных научных форумах «Ломоносов» (МГУ, Москва) в 2020, 2021, 2024 гг.; XII международной школе по наукам о Земле имени профессора Л.Л. Перчука (Петропавловск-Камчатский) в 2022 г.; European Geosciences Union General Assembly (Вена) в 2020 г.; VI, VII, VIII всероссийских с международным участием конференциях «Ультрамафит-Мафитовые Комплексы: геология, строение, рудный потенциал» 2019 – Сахюрта, 2022 – Апатиты, 2023 – Новосибирск; научно-производственной конференции «Обстановки платинометалльного рудообразования и вопросы их идентификации» (Петрозаводск) в 2022 г.; XII, XIII международных научно-практических конференциях «Геология, прогноз, поиски и оценка месторождений алмазов, благородных и цветных металлов» (ЦНИГРИ, Москва) в 2023, 2024 гг.; конференции «Щелочной и кимберлитовый магматизм Земли и связанные с ним месторождения стратегических металлов и алмазов» (ГИ КНЦ РАН, Апатиты) в 2023 г.

Диссертация проверена в системе антиплагиат. В диссертации соблюдены ссылки на авторов и источники заимствования материала.

Диссертация вносит вклад в решение двух актуальных научных проблем: (1) развитие методологии и накопление данных о CSD и зональности зерен породообразующих минералов в природных интрузивах, (2) природа сопряженности динамических и кинетических процессов в магматических камерах.

Постановили:

Диссертация Сергея Николаевича СОБОЛЕВА рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.4 - минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых.

Заключение принято на заседании расширенного семинара лаборатории термодинамики и математического моделирования природных процессов ГЕОХИ РАН 3 марта 2025 года. Присутствовало на заседании 25 человек, из них докторов наук 11 человек. Результаты голосования: «за» - единогласно. Протокол № 1 от 3 марта 2025 года.

Председатель семинара, д.х.н., г.н.с.,
зав.лаб. термодинамики и математического
моделирования природных процессов



В.А. Дорофеева

Секретарь семинара, к.х.н., н.с.
лаб. термодинамики и математического
моделирования природных процессов



О.А. Девина

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Ленина и Ордена
Октябрьской Революции Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского
Российской академии наук (ГЕОХИ РАН).

119991, г. Москва, ул. Косыгина, д.19. Телефон: + 7 (499) 137-14-84. Факс: + 7 (495) 938-20-54
Электронная почта: director@geokhi.ru. Сайт: www.geokhi.ru.