

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Соболева Сергея Николаевича

на тему: **«Структурно-геохимические свидетельства динамики образования кумулатов в расслоенных массивах»**, представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук

по специальности 1.6.4 – Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых

Диссертационная работа Соболева С.Н. посвящена проблеме формирования и эволюции расслоенных интрузивов на примере Йоко-Довыренского, Мончегорского и Ловозерского массивов. Зачастую в литературе бытует мнение, что расслоенные интрузивы формируются в спокойных геодинамических обстановках и характерны для кратонных образований. В то же время показано, что расслоенные ультрамафит-мафитовые интрузивы формируются в различных геодинамических обстановках: в офиолитах, в островодужных и внутриплитных обстановках и даже в коллизионных (Изох 1999). При этом время их формирования может быть очень коротким. Даже для такого уникального и огромного плутона как Бушвельд оценки предельного времени его формирования, включая остывание, не превышают 300 тысяч лет. В настоящее время разработаны программы семейства MELTS и КОМАГМАТ (Ghiorso, Sack 1995; Арискин, Бармина, 2000), которые позволяют проводить оценки составов родоначальных магм, их температуры и фугитивность кислорода. В то же время наиболее дискуссионными и актуальными для изучения являются механизмы заполнения интрузивных камер и эволюции кумулусных систем. Ряд авторов предполагают кристаллизацию в закрытой системе, например, для массива Кивакка (Е.В. Коптев-Дворников, Я. Бычкова). Также предполагается пульсационное заполнение интрузивной камеры при поступлении новых порций магм, фракционирование которых могло происходить в системе промежуточных камер. Подобная система эшелонированных камер реконструирована нами на примере Западного Сангилена (Egorova et al., 2006; Шелепаев, 2012). Подобные системы эшелонированных магматических камер диагностированы нами для лампроитовых даек массива Рябиновый на Алдане (Изох и др., 2025), а также для камптонитовых даек Западного Сангилена (Изох и др., 2024). В то же время для расслоенных интрузивов со сложной ритмичной расслоенностью внедрение новой порции магмы доказать достаточно трудно. В этом плане несомненно оценки распределения кристаллов по размеру (CSD – crystal size distribution), которые проведены С.Н. Соболевым для Йоко-Довыренского, Мончегорского и Ловозерского расслоенных массивов имеют важное значение для оценки

динамики кристаллизации магм, которые представляют собой гетерофазную систему (расплав, кристаллы и флюидная фаза). В тоже время помимо распределения кристаллов по размеру для оценки динамики образования кумулятов важное значение имеет и ориентировка кристаллов. Подобные петроструктурные работы проводились в классических работах А. Николя для офиолитовых комплексов, а также Р. Латыповым для массива Колтилайнен. Подобные исследования проводились томской школой петрографов (А. И. Гончаренко, А.И. Чернышев).

В главе 1 приводится обзор литературных данных по общим вопросам динамики магматических камер; обсуждаются проблемы кинетики нуклеации и роста; дается понятие распределения кристаллов по размеру, как результата их сочетания и приводится упрощенная кинетическая модель (Spohn et al., 1988); дается обзор различных режимов роста, картин зональности и кинетических эффектов при распределении несовместимых элементов в кристалл. В заключение приводится обзор опубликованных данных по CSD в кумулатах различных интрузивов и кратко обсуждаются интерпретации данные авторами работ. Надо отметить, что из приведенного обзора следует, что время формирования кумулятов очень короткое, явно не геологические времена. Также следует отметить критический анализ работ Марша (Marsh, 1998), которые широко цитируются петрологами. Наличие такой главы значительно облегчает рассмотрение полученных автором материалов.

В качестве объектов исследования были выбраны три хорошо исследованных расслоенных интрузива, относящихся к различным формационным типам: Йоко-Довыренский дунит-троктолит-габброноритовый интрузив в Забайкалье, Мончегорский дунит-гарцбургит-ортопироксенит-габброноритовый интрузив и Ловозерский щелочной интрузив на Кольском полуострове. Во всех массивах исследовались преимущественно ранние примитивные кумулаты (продукты уплотнения и затвердевания кристаллического осадка) с высоким содержанием кумулусных фаз (обычно $>70\%$). В результате тщательной и кропотливой работы автором получены наборы согласованных данных CSD в примитивных кумулатах из трех крупных расслоенных интрузивов (Йоко-Довыренский, Мончегорский и Ловозерский) на представительных выборках зерен кумулусных минералов, гарантирующих воспроизводимость измерений. Надо отметить, что автором разработана специальная методика обработки шлифов для построения CSD. На основании сопоставления полученных CSD и анализа литературных данных показано, что распределения представляют три главных типа: логлинейное, бимодальное и логнормальное. Это является несомненно достижением автора, причем важно отметить,

что все выделенные типы распределения установлены в расслоенных массивах различного формационного типа: дунит-троктолит-габброноритовый (Йоко-Довырен), дунит-гарцбургит-ортопироксенит-габброноритовый (Мончегорск) и щелочно-ультраосновной (Ловозеро).

Отдельным самостоятельным блоком исследования является детальное изучение зональности оливинов и особенно по распределению в них фосфора. Автором методами элементного картирования по специальной методике в условиях высоких токов на микроанализаторах линейки JEOL JXA для пород Йоко-Довыренского массива и Мончегорского комплекса получены картины зональности кристаллов оливина по содержанию фосфора. При этом выявлены признаки начального скелетного роста, осцилляций скорости роста, посткумулясной резорбции зерен и заключительного зарастания межзерновых пор оливином. Эти данные позволяют выявлять интертеллурические фазы от оливинов, кристаллизующихся в камере или подвергшихся перекристаллизации при компакции. Более того автору впервые удалось показать, что различные картины зональности кристаллов оливина по фосфору соответствуют специфическим формам CSD. 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 включаются режимы скелетного роста и формируется осцилляторная зональность оливина. Это особенно наглядно показано на примере Йоко-Довыренского массива. Для Мончегорского массива это не столь очевидно.

В изученных дунитах базит-гипербазитовых массивов установлена корреляция типа CSD оливина с содержаниями меди, серы и хрома в породах. Это достаточно аргументировано показано для дунитов Йоко-Довыренского массива. В них установлено, что максимальные содержания “рудных” компонентов демонстрируют кумулаты с логлинейным распределением кристаллов оливина по размеру, тогда как обедненными Cu, S и Cr оказались породы с логнормальными CSD. Логнормальная форма распределения по размеру, наряду с признаками преимущественного растворения мелких зерен (записанными в зональности), согласуется с воздействием на первичный кумулулс инфильтрующегося расплава, который в режиме компакции обеспечивал вынос “рудных” компонентов.

Весьма интересным оказывается поведение серы, циркония и хрома в дунитах Йоко-Довырена, где сера отражает количество сульфида (в том числе растворенного в расплаве), а цирконий захороненного в кумулулсе расплава. Составы дунитов распадаются

на два тренда. Первый маркирует обогащение серой при примерно постоянном содержании интеркумулусного силикатного расплава (постоянном Zr), и превышает предел SCSS, который для данных составов оказывается близок к 0.1 мас. % для чистого расплава. Это означает избыточную механическую аккумуляцию сульфида и иногда хромита в дунитах с логлинейным CSD на этапе осаждения оливина.

В троктолитах и верлитах наиболее распространено бимодальное CSD. При этом установлена зональность кумулусного плагиоклаза в виде ядер с относительно низким An и включениями клинопироксена. Зональность оливина проявлена в основном в распределении фосфора, где читаются черты осцилляторной, секториальной и скелетной зональности. Ядра в плагиоклазе можно интерпретировать как интрателлурические вкрапленники новой порции магма. При кристаллизации в глубинных условиях наблюдается раскисление плагиоклаза, а также может исчезать оливин-плагиоклазовая котектика.

С моей точки зрения важный вывод, который вытекает из данной работы то, что бимодальное распределение в большинстве случаев является признаком резкого ускорения охлаждения и дополнительной нуклеации, причинами которых внедрение новой порции высокотемпературного расплава в интрузивную камеру. При этом анализ ранних кумулатов расслоенных интрузивов должен происходить с учетом возможного наличия интрателлурических кристаллов, которые могут в некоторых случаях слагать практически всю популяцию кумулуса. Присутствие интрателлурических кристаллов отмечено во всех трех изученных массивах. В Ловозерском массиве, нефелин всех горизонтов, вероятно, имеет в основном интрателлурическую природу. При этом надо иметь в виду, что в отличие от оливина, ортопироксена и плагиоклаза (в массивах Йоко-Довырен и Мончегорск) нефелин должен всплывать в массиве Ловозеро. Также важным моментом работы является то, что контрастность составов и соответственно температур характерна для ранних этапов формирования камер, тогда как на поздних она минимальна.

Мне представляется, что детальная проработка материала по CSD и зональностям оливинов по дунитам и троктолитам для Йоко-Довыренского массива вполне было бы достаточно для успешной защиты кандидатской диссертации. По существу, все рассуждения по модели формирования, включая компакцию, строятся на материалах по этому интрузиву. Для Мончегорского и Ловозерского массивов также получены оригинальные данные по CSD и зональностям оливинов, но они носят скорее предварительный характер, хотя и не противоречат защищаемым положениям. Это

подкрепляется и публикациями. Значимые публикации автора посвящены именно результатам по Йоко-Довыренскому массиву, тогда как по другим только тезисы.

Из небольших замечаний отмечу следующее. При характеристике петрографии по Мончегорскому массиву было бы полезно показать положение фотографий шлифов по разрезу. То же касается и Ловозерского массива.

Автореферат дает представление о цели, задачах и методах исследования, защищаемые положения обоснованы фактическим материалом, опубликованы в соответствующих работах и докладывались на многочисленных конференциях. Непосредственно по результатам работы С.Н. Соболевым опубликовано 5 работ из списка ВАК, а также многочисленные тезисы и материалы конференций.

В диссертационной работе решена научная задача корреляции распределений кристаллов по размеру в примитивных кумулатах из расслоенных интрузивов с картиной зональности отдельных зерен в популяции и геохимическими особенностями пород. На основе этих данных предложена интерпретация динамики образования рассмотренных кумулатов и модифицирована кинетическая модель образования распределений кристаллов по размеру при затвердевании магм.

Представленная к защите диссертационная работа полностью соответствует требованиям, предъявляемых к кандидатским диссертациям, установленным в п. 9-14 Постановления правительства РФ "О порядке присуждения учёных степеней" от 24.09.2013 № 842 в действующей редакции (вместе с "Положением о присуждении учёных степеней"). Работа соответствует паспорту специальности 1.6.4 - «Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых», а именно пунктам: 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. Автор работы Сергей Николаевич Соболев заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.4 - минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых.

Официальный оппонент

Изох Андрей Эмильевич,

доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории петрологии и рудоносности магматических формаций ФГБУН Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,

Почтовый адрес: Российская федерация, 630090, г. Новосибирск, просп. Ак. Коптюга, д. 3

Электронная почта: izokh@igm.nsc.ru

Тел. +7 913 060 3240

Я, Изох Андрей Эмильевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.



ПОДПИСЬ УДОСТОВЕРЯЮ
ЗАВ. КАНЦЕЛЯРИЕЙ
ШИПОВА Е.Е.
21.04.2025г.

А.Э. Изох

21.04.2025

Сведения об официальном оппоненте

Я, Изох Андрей Эмильевич, 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: Изох Андрей Эмильевич

Ученая степень: доктор геолого-минералогических наук

Ученое звание: профессор

Должность: главный научный сотрудник лаборатории петрологии и рудоносности магматических формаций ФГБУН Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН

Наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева (ИГМ СО РАН)

Адрес организации: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3

Телефон: +7 913 060 3240

e-mail: izokh@igm.nsc.ru

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

1. Timina T.Yu., Smirnov S.Z., Kuzmin D.V., Kotov A.A., Rybin A.V., Danilovsky V.A., Izokh A. E. Late Pleistocene mafic magmatism and its relation to large Caldera-Forming eruptions on Iturup Island: an example of Klumba Volcano, Kuril Islands // *Petrology*. 2025. V. 33(1). P. 1–22. <https://doi.org/10.1134/s0869591124700309>
2. Kuzmin I.A., Tolstykh N.D., Izokh, A.E. The Phenomenon of Reverse Zoning in Picrite Gabbro-Dolerites of the Talnakh Intrusion // *Dokl. Earth Sc.* 2025. V. 520, 29. <https://doi.org/10.1134/S1028334X24605170>
3. Chayka I.F., Izokh A.E., Sotnikova I.A., Alymova N.V., Kolotilina T.B., Karimov A.A., Shcherbakov V.D., Lobastov B.M. Petrology of rocks of the lamproite and granite-syenite series of the Bilibin (Lomam) Massif (Aldan–Stanovoy Shield) // *Russian Geology and Geophysics*. 2025. V. 66 (4). P. 424–449. <https://doi.org/10.2113/rgg20244784>
4. Izokh A.E., Letnikova E.F., Izbrodin I.A., Ivanov A.V., Shkolnik S.I., Doroshkevich A.G. High-K Rocks of the Late Riphean Mara Paleovolcano, Biryusa Uplift, South of the Siberian Platform // *Stratigr. Geol. Correl.* 2024. V. 32. P. 374–395. <https://doi.org/10.1134/S0869593824700060>
5. Vrublevskii V.V., Chugaev A.V., Tishin P.A., Kotel'nikov A.D., Izokh A.E., Kazenova F., Kremer I.O. Isotopic (Nd, Sr, Pb) composition of the Permo–Triassic and late Cretaceous

basaltoids in the Minusa Depression (Southern Siberia, Kop'evoy Uplift): Heterogeneity of mantle sources of mafic magmas // Russian Geology and Geophysics. 2024. V. 65(9), P. 1041–1051. <https://doi.org/10.2113/rgg20244708>

6. Doroshkevich A.G., Savatenkov V.M., Izbrodin I.A., Prokopyev I.R., Kruk M.N., Izokh A.E.,

Nosova A.A. Petrology and source characteristics of the Arbarastakh alkaline ultramafic carbonatite-phoscorite complex, the Aldan-Stanovoy Shield // Lithos. 2023. V. 464–465, 107458. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2023.107458>

7. Изох А.Э., Чайка И.Ф., Гаськов И.В., Егорова В.В. Дифференциация лампроитовой магмы (на примере мезозойских высококалийевых даек массива Рябиновый, центральный Алдан) // Геология и геофизика. 2024. Т. 65. № 2. С. 200–221

8. Изох А.Э., Егорова В.В., Шелепаев Р.А., Шелепов Я.Ю. Мегакриты оливина в щелочнобазальтоидных дайках Западного Сангилена, Юго-Восточная Тува // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2024. Т. 517. №1. С. 78–84. doi: 10.31857/S2686739724070094

9. Turkina, O.M., Izokh, A.E. Heterogeneous Subcontinental Lithospheric Mantle below the South Margin of the Siberian Craton: Evidence from Composition of Paleoproterozoic Mafic Associations // Russian Geology and Geophysics. 2023. V. 64(10), 1141–1160. <https://doi.org/10.2113/rgg20234575>

10. Vrublevskii V.V., Kotelnikov A.D., Tishin P.A., Izokh A.E., Kazanova F., Kremer I.O. Geochemical Evidence for Multi-Depth Magma Generation for Permian–Triassic Dolerite and Late Cretaceous Basanite of the Minusa Paleorift, Siberia // *Doklady Earth Sciences*. 2022. V. 506(2). P. 729–733. <https://doi.org/10.1134/s1028334x22600487>

11. Turkina O.M., Izokh A.E., Lavrenchuk A.V., Shelepov Ya.Yu. Composition and Isotope Parameters of Metabasalts and Gabbroids of the Onot Granite–Greenstone Block, Southwestern Siberian Platform, as Indicators of Lithospheric Mantle Evolution from the Archean to Paleoproterozoic // Petrology. 2022. V. 30(5). P. 499–522. <https://doi.org/10.1134/s0869591122040063>

12. Polyansky O.P., Izokh A.E., Semenov A.N., Selyatitskii A.Yu., Shelepaev R.A., Egorova, V.V. Thermomechanical Modeling of the Formation of Multi-Chamber Intrusions for Identifying the Relationship of Plutonic Metamorphism with Gabbro-Diorite Massifs of Western Sangilen, Tuva, Russia // Geotectonics. 2021. V. 55(1). P. 1–19. <https://doi.org/10.1134/s001685212101009x>

Я, Изох Андрей Эмильевич, 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.

Изох А.Э.
21.04.2025

Подпись А.Э. Изоха удостоверяю:

