

УДК 552.086 (571.56)

ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОСТАВА И СТРОЕНИЯ СУЛЬФИДНЫХ ВКРАПЛЕННЫХ РУД В ПИКРИТОВЫХ ГАББРО-ДОЛЕРИТАХ ОКТЯБРЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (НОРИЛЬСКИЙ РУДНЫЙ УЗЕЛ)

Иван Иванович Никулин¹✉, Андрей Олегович Калашников²,
Иван Олегович Крылов³, Михайлова Юлия Александровна⁴,
Николай Юрьевич Грошев⁵, Раиль Илгизарович Кадыров⁶

¹ ООО «Норникель Технические Сервисы» (ООО «НН ТС»), Санкт-Петербург, Россия; iinikulin@gmail.com ✉

² Геологический институт Кольского научного центра (ГИ КНЦ РАН), Апатиты, Россия; kalashnikov@geoksc.apatity.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; ikrylov46@gmail.com

⁴ Казанский (Приволжский) Федеральный университет, Казань, Россия; ylya_korchak@mail.ru

⁵ Казанский (Приволжский) Федеральный университет, Казань, Россия; nikolaygroshev@gmail.com

⁶ Казанский (Приволжский) Федеральный университет, Казань, Россия; Rail7777@gmail.com

Аннотация. Проанализированы руды из скважин, пробуренных в Хараелахском интрузиве Талнахского рудного узла. Прожилково-вкрапленная сульфидная медно-никелевая минерализация в пикритовых габбро-долеритах на Восточном фланге Октябрьского месторождения охарактеризована как интерстициально-каплевидное оруденение. Образцы для каждого типа руд исследованы методом рентгеновской 3D-томографии и проанализированы с применением фрактальной теории. По результатам исследования сделан вывод о связи образцов интерстициально-каплевидного оруденения при различном масштабе с фрактальной размерностью рудных минералов. Трехмерная фрактальная размерность рентгено-томографической фазы из сульфидов и минералов группы шпинели составляет в среднем 2,13, а двумерная только сульфидных агрегатов оруденения — в среднем 1,15, что согласуется с эмпирическим правилом Мандельброта, согласно которому трехмерная фрактальная размерность на единицу больше двумерной. Числовые значения фрактальной размерности, описывающие динамику ликвации, могут иметь важное значение для технологии обогащения новых типов руд с флангов месторождения, а также служить дополнительным критерием для выявления во вкрапленных рудах зон с наибольшей интенсивностью рудной минерализации при поисковых и геологоразведочных работах в Норильском рудном районе.

Ключевые слова: Норильская металлогеническая провинция, Талнахский рудный район, Октябрьское месторождение, Норильский рудный узел, сульфидные вкрапленные руды, теория фракталов, фрактальный анализ

Для цитирования: Никулин И.И., Калашников А.О., Крылов И.О., Михайлова Ю.А., Грошев Н.Ю., Кадыров Р.И. Фрактальный анализ состава и строения сульфидных вкрапленных руд в пикритовых габбро-долеритах октябрьского месторождения (Норильский рудный узел) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 1. С. 60–74. doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-1-60-74

FRactal Analysis of the Composition and Structure of Sulfide Interspersed Ores in Picrite Gabbro-Dolerites of the Oktyabrsky Deposit, Norilsk Ore Field

Ivan I. Nikulin¹✉, Andey O. Kalashnikov², Ivan O. Krylov³, Julia A. Mikhailova⁴,
Nikolay Yu. Groshev⁵, Rail I. Kadyrov⁶

¹ Norilsk Nickel Technical Services LLC, Saint Petersburg, Russia; iinikulin@gmail.com

² Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia; kalashnikov@geoksc.apatity.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; ikrylov46@gmail.com ✉

⁴ Kazan Federal University (Institute of Geology and Petroleum Technologies), Kazan, Russia; ylya_korchak@mail.ru

⁵ Kazan Federal University (Institute of Geology and Petroleum Technologies), Kazan, Russia; nikolaygroshev@gmail.com

⁶ Kazan Federal University (Institute of Geology and Petroleum Technologies), Kazan, Russia; Rail7777@gmail.com

Abstract. The analysis of ore samples taken from wells drilled on the Eastern flank of the Oktyabrskoye deposit was carried out. In the vein-disseminated sulfide copper-nickel ores of the deposit, three types of mineralization are distinguished, which clearly differ from each other: interstitial-teardrop-like, interstitial, tear-shaped-interstitial. A sample of each type of ore was examined by 3D tomography and analyzed using fractal theory. Based on the results of the study, a conclusion was made about the relationship between the fractal dimensions of ore minerals and the dynamics of the formation of various types of ores. The pattern of changes in the intensity of mineralization from the thickness of the layers is established. The results obtained may be of great importance in relation to the technology of enrichment of new types of ores from the flanks of the deposit, and also be an additional criterion for identifying

in disseminated ores zones with the highest intensity of ore mineralization during prospecting and exploration in the Norilsk ore region.

Keywords: Norilsk metallogenic province, Talnakh ore district, Oktyabrskoye deposit, Norilsk ore node, sulfide interspersed ores, fractal theory, fractal analysis.

For citation: Nikulin I.I., Kalashnikov A.O., Krylov I.O., Mikhailova J.A., Groshev N.Yu., Kadyrov R.I. Atomic analysis of sulfide interspersed ores in picrite gabbro-dolerites of the Oktyabrsky deposit using fractal theory. *Moscow University Geol. Bull.* 2023; 1: 60–74. doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-1-60-74 (In Russ.).

Введение. Норильский промышленный район (НПР) занимает площадь около 45 тыс. км² в северо-западной части Среднесибирского плоскогорья. В его пределах известно более 10 месторождений мирового класса с сульфидными рудами меди, никеля, платиноидов и других металлов. Сульфидные руды традиционно разделяются на богатые, вкрапленные и медистые. При геологоразведочных работах в этом районе главной задачей считается выявление осевых зон интрузивов с массивными сульфидными медно-никелевыми рудами. Вкрапленные руды распространены широко, но строгие закономерности их залегания с наибольшей концентрацией не определены. Это ставит сложные задачи перед геологами, осуществляющими эксплуатационно-разведочные и поисковые работы, решение этих задач обычно приводит к удорожанию проектов.

Основанием для наших исследований послужили эмпирические наблюдения геологов о том, что геологические системы, в частности рудные поля и рудоконтролирующие сети тектонических нарушений, имеют иерархическую организацию. Эти структуры несут генетическую информацию о предыдущем уровне организации. Если определенным образом разделить каждый уровень так, чтобы на других уровнях выделились такие же дробные размеры, то можно описываемую систему характеризовать одним уравнением, отвечающим единому дробному значению. Это дробное значение можно с некоторой долей условности представить как коэффициент самоподобия исследуемой геологической системы. В реальности у одной системы может быть несколько дробных чисел, что обусловлено как раз неоднородной природой всего вокруг. Такие системы с одним или несколькими коэффициентами самоподобия обладают фрактальными свойствами, т. е. представляют собой совокупность разномасштабных элементов, причем распределение элементов на более мелком масштабном уровне в статистическом смысле подобно распределению в более крупных масштабах.

Рудные тела в земной коре распространены неравномерно и сконцентрированы в отдельных рудных районах, в пределах которых распределение месторождений и рудопроявлений носит такой же неравномерный характер. На более малых масштабных уровнях, в рамках месторождений, выделяются отдельные рудные тела и рудные зоны, в пределах которых рудная минерализация также распределена неоднородно. Степень неоднородности распределения характеризуется фрактальной размерностью множества, которая, в отличие от

топологической размерности, — дробная величина.

В отличие от безрудных интрузивов, кристаллизация которых обусловлена однократным внедрением магмы в закрытой системе [Радько, 1991], все рудоносные интрузивы Норильской металлогенической провинции образуют зональные магматические тела, формирование которых обусловлено динамической кристаллизацией при прохождении больших объемов магмы в условиях открытой системы [Геология Норильской ..., 2020]. Различные условия образования пород обуславливают количественные и качественные отличия петрографических структур и текстур в разных фациях рудоносных интрузивов. Эта зональность до настоящего времени изучена весьма слабо, хотя имеет весьма контрастный характер, что делает ее применимой для локального и регионального прогноза сульфидных платино-медно-никелевых месторождений и может служить индикатором рудоносности интрузивов. Динамика движения рудоносной магмы обуславливает вещественные свойства сульфидной минерализации — формирование конкретных минеральных видов и их химический состав в отношении как макро-, так и микроэлементов. Каждый агрегат рудных минералов с дробной размерностью характеризуется набором морфологических характеристик.

Методичное, математически обоснованное извлечение типизированного значения формы сульфидных агрегатов мы принимаем в качестве их атомизации до дробной величины. В тех случаях, когда вид имеет регулярный образ, его можно описать разными методиками, например, с помощью фрактальной геометрии. Так, каждый вычисленный регулярный образ в этом случае называется паттерном. Регулярный образ, часто встречающийся в геометрии агрегатов сульфидных минералов вкрапленных руд, назван нами условно фрактальным паттерном. Фрактальная размерность сульфидных агрегатов — характеристика динамики перколяции рудоносного флюида. Как следствие фрактальная размерность сульфидных агрегатов есть математически обоснованный индикаторный признак этих вещественных свойств, т. е. описывает многомерные свойства руды (приближаясь хотя бы к 99% природной формы), которые в совокупности почти невозможно описать традиционными методами. Выявление закономерностей роста рудных минералов позволяет проследить геометрию рудных зон в интрузивном массиве, что положительно скажется на проведении эксплуатационных, разведочных или поисковых работ.

Фрактальный анализ используется в геологии с 1980-х гг., один из примеров, приведенных Б. Мандельбротом для популярного объяснения сущности фрактальной теории, — распределение меди по месторождениям [Mandelbrot, 1982]: зависимость запасов меди от числа месторождений с соответствующими запасами имеет экспоненциальный характер и, принимая во внимание, что это распределение отражает пространственное (геометрическое) распределение меди в земной коре, можно заключить, что медь распределена фрактально, как в статистическом, так и в геометрическом смысле. Позже эти, во многом умозрительные, выводы подтвердились работами геологов как на локальном уровне (в масштабе рудного района), так и на региональном (масштаб металлогенической провинции) [Blenkinsop, Sanderson, 1999; Carlson, 1991; Haddad-Martim et al., 2017; Ivanyuk et al., 2012; McCaffrey, Johnston, 1996; Горяинов, Иванюк, 2001].

С развитием вычислительной техники фрактальный анализ стал применяться в поисковых работах, фрактальную размерность различных отражений геологической природы стали использовать как поисковый признак. Шире всего фрактальный анализ и его варианты (мультифрактальный, сингулярный) нашли применение при анализе геохимических полей с целью поисков полезных ископаемых [Afzal et al., 2017; Chen, Cheng, 2018; Cheng et al., 1994; Cheng, Grunsky, 2000; Pourgholam et al., 2021; Wang et al., 2013; Xiao et al., 2016; Zuo, Wang, 2015]. Кроме прикладного значения, фрактальный анализ геологических данных имеет и фундаментальное значение для понимания формирования магматических объектов и гидротермальных систем [Goryainov et al., 2013; Perugini et al., 2003; Roberts et al., 1999; Yakymchuk et al., 2013; Горяинов и др., 2007, 2008]. С помощью расчёта фрактального размера выявлены дайки, прослежены сингенетичные с магматизмом тектонические структуры, на основе чего сделан вывод о стадийности внедрения и связи с региональными тектоническими структурами [Kruhl, 2013; Perugini, Poli, 2012; Peternell et al., 2010, 2011]. Результаты этих работ указывают на то, что атомизация природных объектов с выявлением фрактальной меры (размерности) необходима для математически обоснованного описания динамики произошедших природных процессов [Gavrilit et al., 2019].

Краткая геологическая характеристика района. Геолого-структурная позиция Норильского рудного района определяется пограничным положением на стыке краевых структур Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты. Район входит в состав Предтаймырской металлогенической зоны, в пределах которой развито сульфидное оруденение медно-никелевой формации и в меньшей степени непромышленные проявления сульфидно-магнетитовой и медно-цеолитовой формаций. Оруденение связано с дифференцированными интрузиями базит-гипербазитового состава, которые

формируют различные по масштабу месторождения и рудопроявления, объединенные в рудные районы Норильский, Талнахский, Вологодчанский, Имангдинский, Южно-Норильский и Тальми-Кумгинский [Геология Норильской ..., 2020].

Тектоническое строение Норильского района определяется наличием в его пределах крупной отрицательной структуры II порядка — Норильско-Хараелахского вулканогенного прогиба. Он прослежен в северо-северо-восточном направлении через всю территорию района на 350 км. В северо-восточной части района направление его простирается изменяется до субширотного восток-северо-восточного. Ширина прогиба колеблется от 50 км в юго-западной части до 80–90 км в центральной и северо-восточной частях [Геология Норильской..., 2020]. Главные дизъюнктивные структуры в районе представлены Норильско-Хараелахским, Боганидским и Имангдинско-Летнинским глубинными разломами, а также опережающими их Северо-Хараелахским и Кета-Ирбинским разломами. В составе Норильско-Хараелахского вулканогенного прогиба выделен ряд мульдобразных структур, в одной из которых (Хараелахской) известны два месторождения — Октябрьское и Талнахское, локализованные в одноименных интрузивах (рис. 1).

Геологическое строение Норильского района обусловлено наличием трех структурных этажей. Нижний этаж образован кристаллическими породами архея и нижнего-среднего протерозоя. Средний этаж сложен дислоцированными, слабометаморфизованными отложениями верхнего протерозоя, которые на востоке служат чехлом древней платформы, а на западе — складчатым основанием для более молодой платформы. Верхний этаж включает в себя отложения венда-кайнозоя и представляет собой чехол платформы с байкальским основанием. Он наиболее изучен в своде северной части Хантайско-Рыбинского вала и на левобережье р. Енисей. Представлен терригенными и карбонатными осадками и включает в себя пять структурных ярусов: венд-нижнепалеозойский, средне-верхнепалеозойский, верхнепалеозойский, верхнепалеозойско-нижнемезозойский и мезозойско-кайнозойский.

Интрузивный магматизм широко проявлен в виде комплексов недифференцированных нормальных, субщелочных, щелочных базитов и дифференцированных базит-ультрабазитовых интрузивов пермско-триасовой трапповой формации. Последние вмещают горизонты сульфидного медно-никелевого оруденения. В юго-западной части Вологодчанской мульды проявлен также кислый магматизм в виде Болгохтохского штока гранитпорфиров, сиенитпорфиров и граносиенитов с медно-молибденовым оруденением, предположительно мезозойского возраста [Радько, 1991]. Дифференцированные рудоносные интрузии разнообразны по составу и образуют ряд от высокомагнезиальных интрузий до интрузий, отвечающих нормальному составу

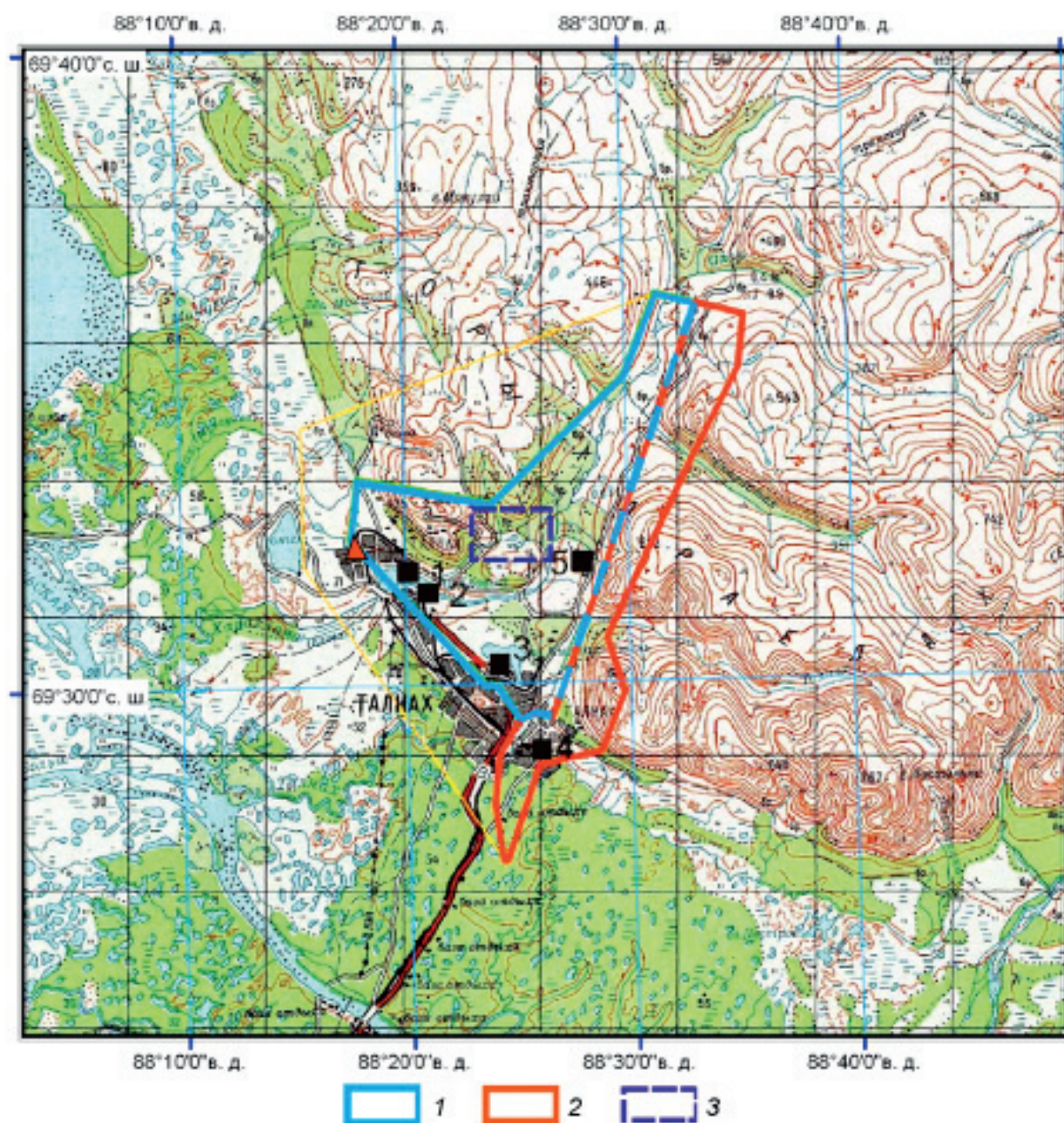


Рис. 1. Обзорная карта района: 1 — Октябрьское, 2 — Талнахское месторождения, 3 — участок исследования

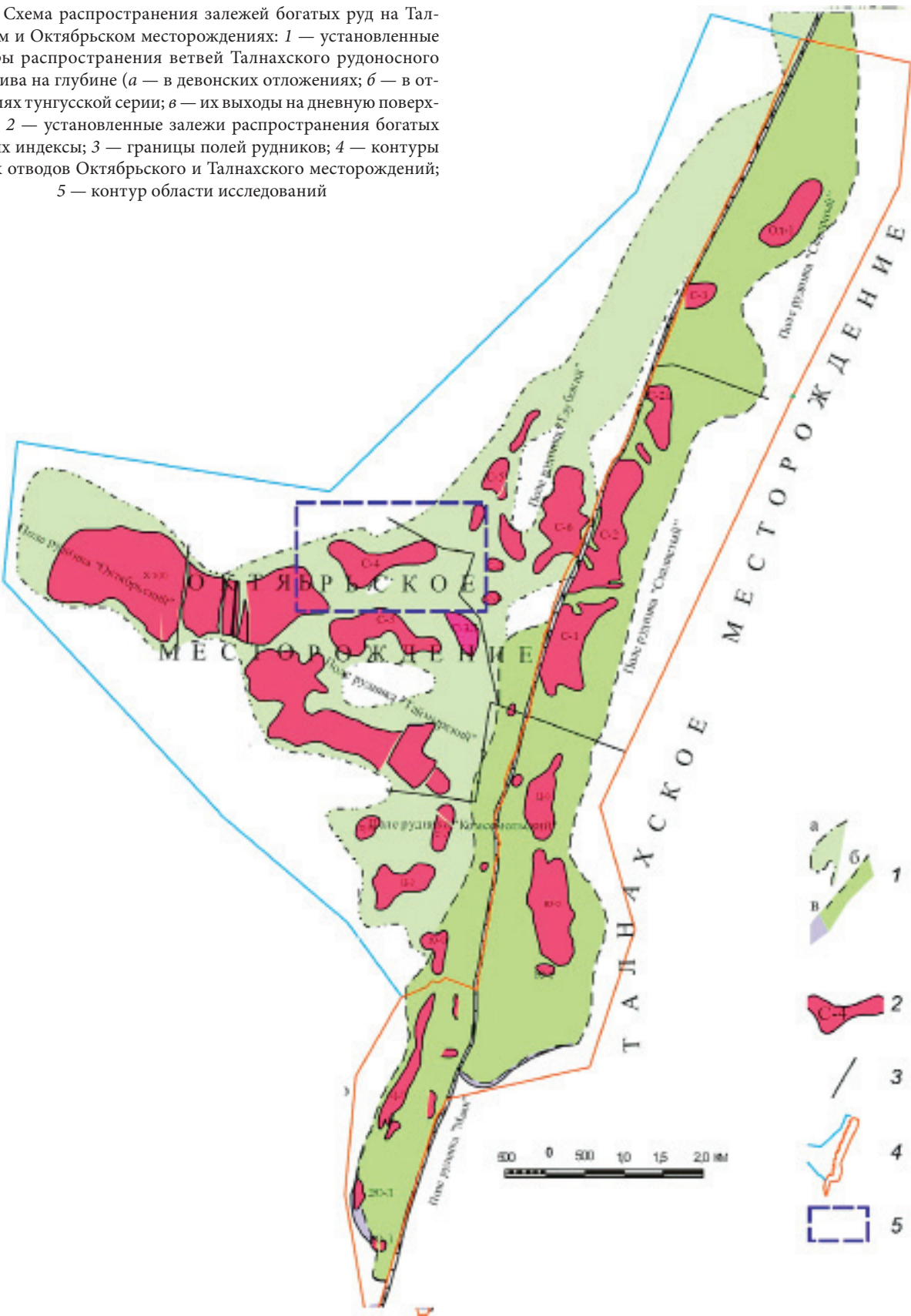
интрузивов трапповой формации. По особенностям внутреннего строения, состава и степени рудоносности среди них выделены следующие комплексы: моронговский, фокинский и норильский. Норильский комплекс представлен несколькими типами, объединенными общностью происхождения и времени формирования (от конца гудчихинского до конца надеждинского включительно): в ранние фазы внедрялись интрузии круглогорского и нижнеталнахского типов, в завершающие фазы — интрузии зубовского и норильского типов. С последним связано промышленное медно-никелевое оруденение в районе.

Октябрьское месторождение — составная часть Хараелахской вулканотектонической мульды, одной из основных структур Норильско-Хараелахского

прогиба. Его позиция в геологической структуре определяется приуроченностью к центральной части прогиба, наличием дифференцированного интрузивного массива норильского комплекса с сульфидным оруденением, которое локализовано в девонском горизонте в юго-западном борту Хараелахской мульды, смежном с северо-восточным крылом Кайеркано-Пясинской брахиантиклинали. По ее периферии сконцентрированы почти все известные в районе месторождения сульфидных медно-никелевых руд (рис. 1, 2).

Установленные залежи с богатыми рудами, слагающие Октябрьское и Талнахское месторождения, по масштабу и запасам образуют Талнахский рудный узел (ТРУ). Его тектоническую структуру формируют разломы северо-восточного и северо-за-

Рис. 2. Схема распространения залежей богатых руд на Талнахском и Октябрьском месторождениях: 1 — установленные контуры распространения ветвей Талнахского рудоносного интрузива на глубине (а — в девонских отложениях; б — в отложениях тунгусской серии; в — их выходы на дневную поверхность); 2 — установленные залежи распространения богатых руд и их индексы; 3 — границы полей рудников; 4 — контуры горных отводов Октябрьского и Талнахского месторождений; 5 — контур области исследований



падного простирания, ведущее положение среди них занимает главный шов Норильско-Хараелахского разлома, представляющий собой левосторонний сбросо-сдвиг с вертикальной амплитудой смещения от 10 до 300 м (рис. 3). В пределах района исследо-

вания рудная залежь разрывными нарушениями не затронута.
Хараелахский дифференцированный интрузив, с которым пространственно и генетически связаны промышленные медно-никелевые руды Октябрь-

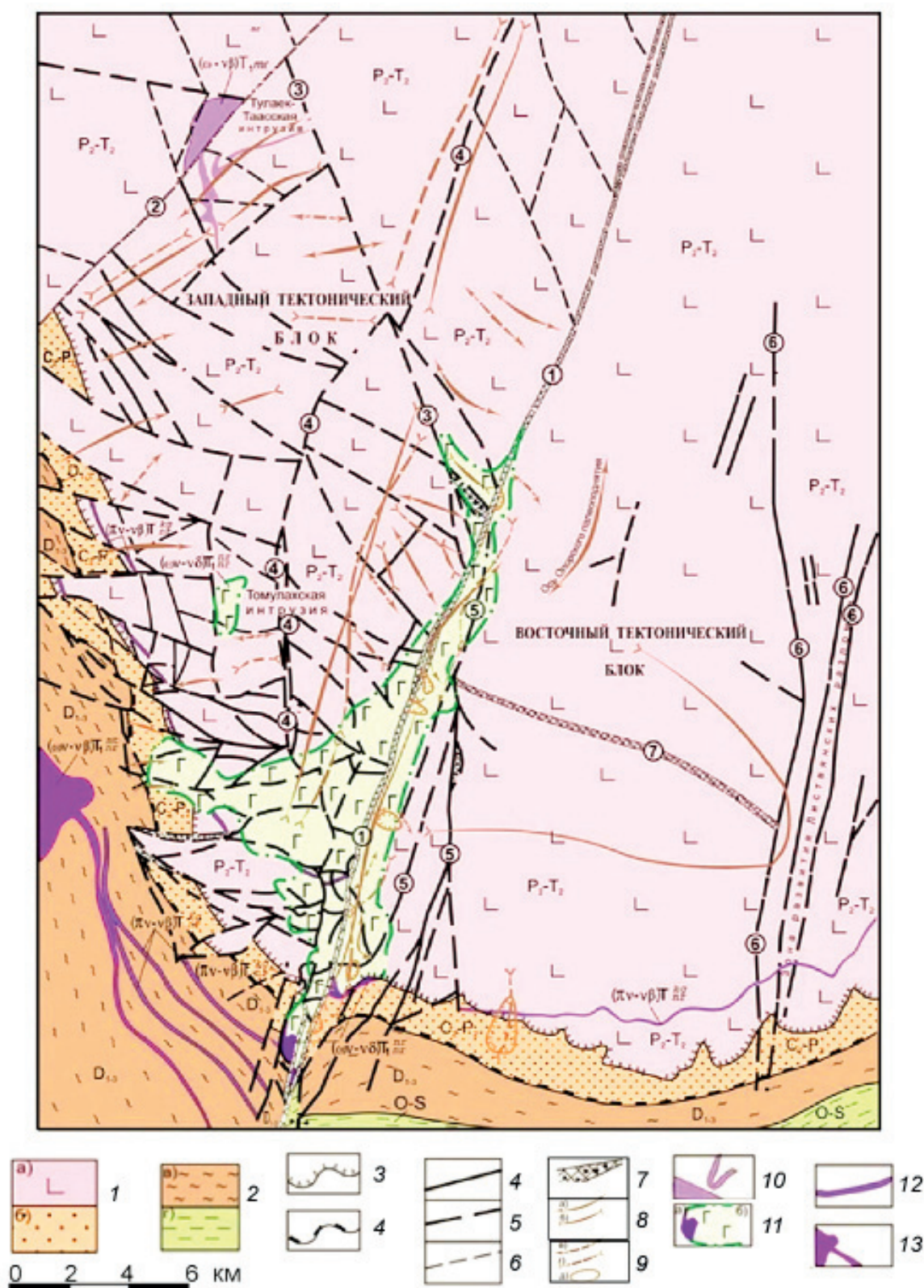


Рис. 3. Геолого-структурная схема Талнахского рудного узла, по [Соколов, 2001], с дополнениями: 1 — верхнепалеозойский — нижнемезозойский структурный ярус (а — туфолоавовые образования верхнепалеозойского–нижнемезозойского подъяруса — Хараелахская трапповая мульда; б — лагунно-континентальные отложения верхнепалеозойского подъяруса); 2 — нижне-среднепалеозойский структурный ярус, лагунно-морские и морские отложения (в — девонские, г — нижнеордовикские–верхнесилурийские); 3 — граница Хараелахской мульды; 4 — граница верхнепалеозойско-нижнемезозойского структурного яруса с нижне-среднепалеозойским; 5–6 — главные структурно-формирующие разломы: 5 — установленные, 6 — предполагаемые, 7 — прочие разрывные нарушения; 8 — тектоническая зона дробления, смятия и брекчирования; пликативные структуры: 9 — в отложениях девона; 10 — в подошве тунгусской серии; интрузивные образования: 11 — моронговского типа, субпластовые тела, силлы, дайки; 12 — верхнеталнахская рудоносная интрузия; 13 — круглогорского типа, силлообразные тела габбро-долеритов; 14 — нижнеталнахского типа, пластообразные габбро-долериты

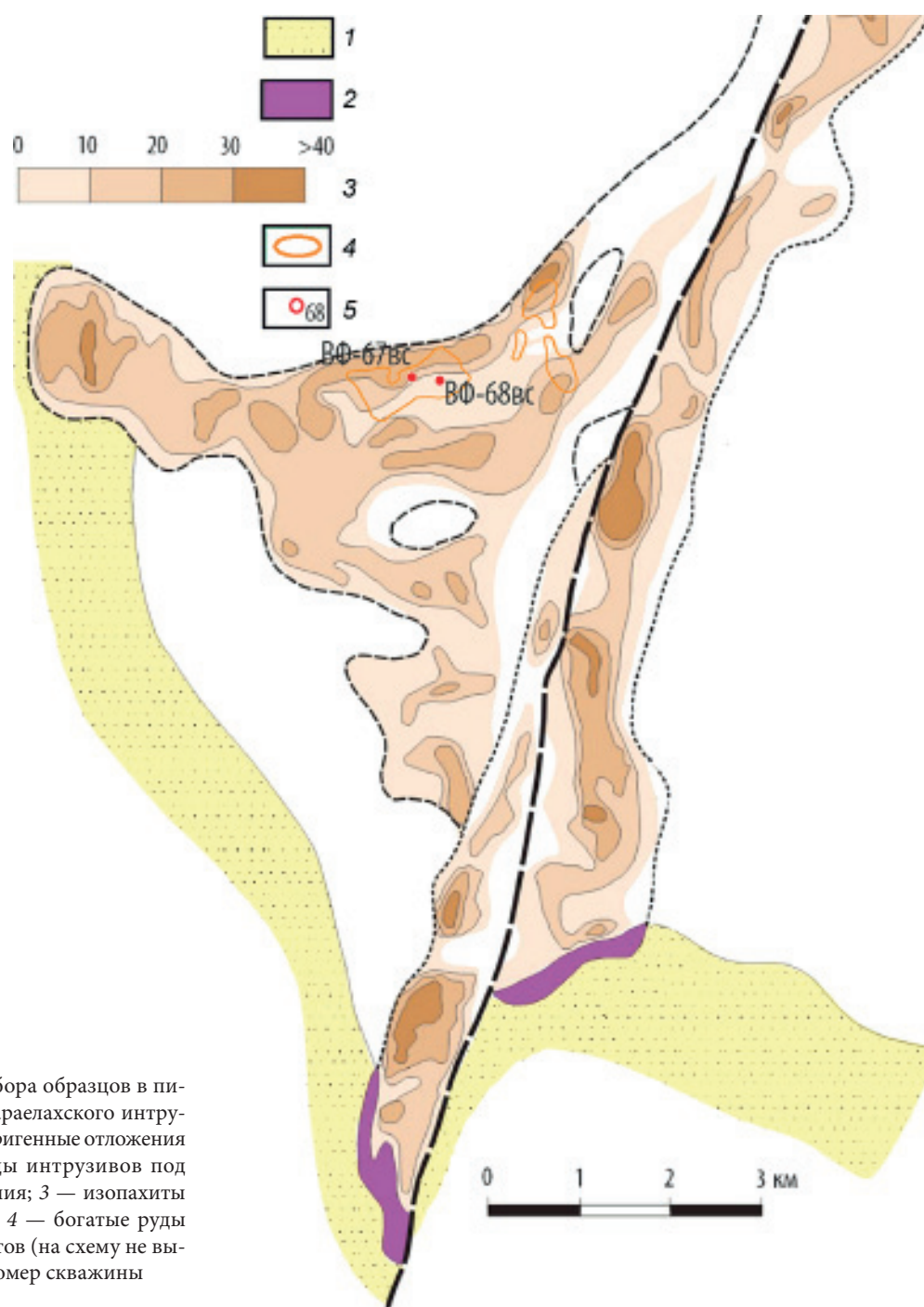


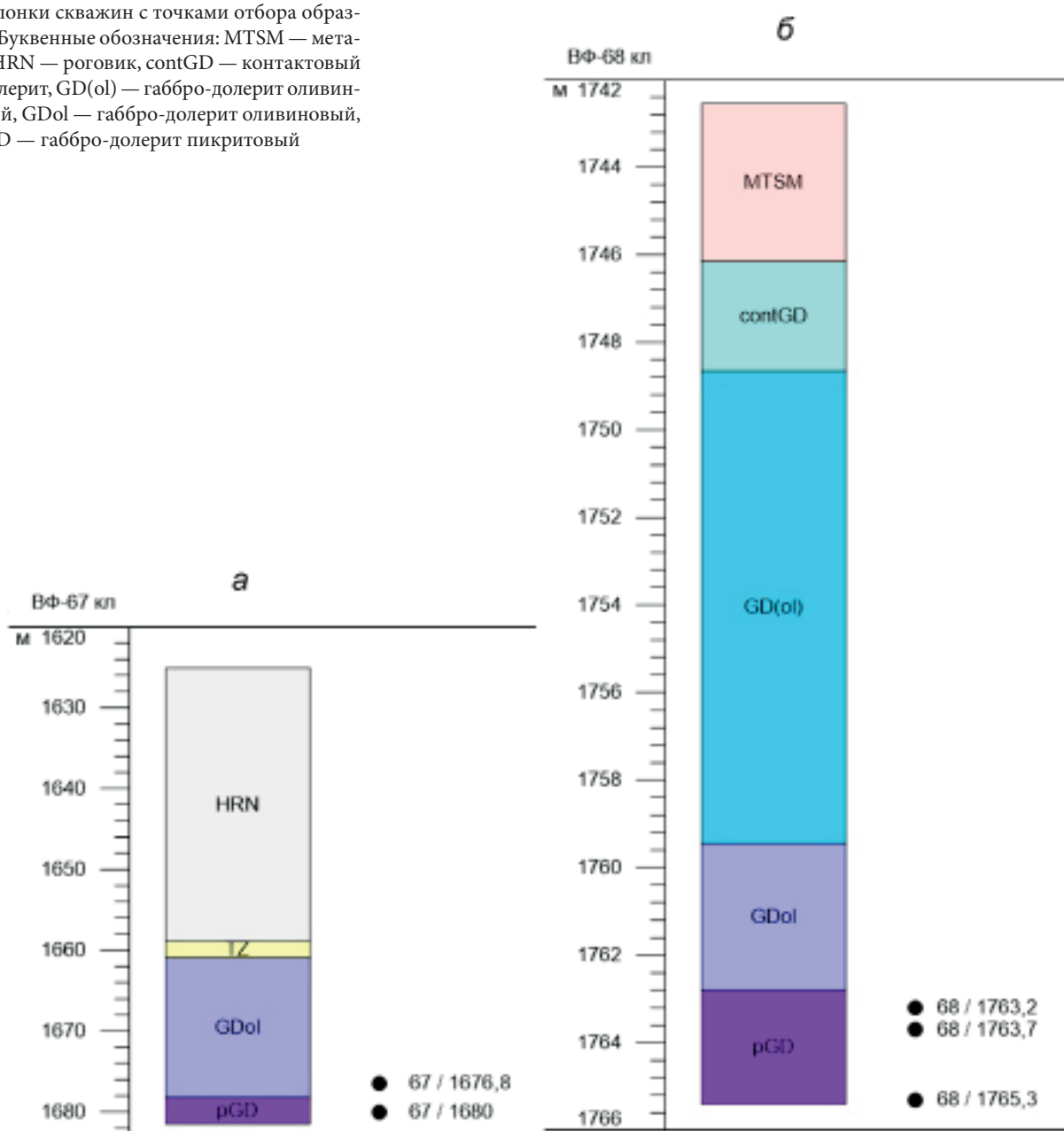
Рис. 4. Схема фактического отбора образцов в пикритовых габбро-долеритах Хараелахского интрузива по [Казаков, 2021]: 1 — терригенные отложения тунгусской серии; 2 — выходы интрузивов под рыхлые четвертичные отложения; 3 — изопахиты пикритовых дифференциатов; 4 — богатые руды вне пикритовых дифференциатов (на схему не вынесены все залежи); 5 — номер скважины

ского месторождения [Радько, 1991; Геология..., 2020], относится к норильскому типу интрузий. В структуре ТРУ интрузив приурочен к западному крылу Норильско-Хараелахского разлома. В плане он представляет собой треугольник, длина сторон которого 8–10 км. По морфологии интрузив представляет собой лентообразное тело шириной около 2 км и длиной 7 км, полого погружающееся в северо-восточном направлении (в соответствии с падением вмещающих пород). Западная часть интрузива представляет собой собственно Хараелахскую ветвь.

Границы Хараелахского интрузива, в отличие от границ Октябрьского месторождения, не очерчены четко. Это связано с тем, что на флангах дифференцированный интрузив постепенно сменяется мало-

мощными, слабодифференцированными силлами оливиновых и безоливиновых габбро-долеритов, а также недифференцированными телами долеритов и микро-долеритов. За условную границу принят контур развития такситовых и пикритовых разновидностей габбро-долеритов (при мощности интрузии 15–25 м). Рудоносный интрузив локализован в девонских терригенно-карбонатных отложениях на контакте курейской и разведочнинской свит. В направлении погружения на северо-восток он переходит в отложения зубовской свиты нижнего девона. В пределах западных флангов интрузия воздымается до уровня мантуровской свиты. Мощность интрузива на изучаемом участке изменяется от 0 до 120 м, в среднем 70 м.

Рис. 5. Колонки скважин с точками отбора образцов (а, б). Буквенные обозначения: MTSM — метасоматит, HRN — роговик, contGD — контактовый габбро-долерит, GD(ol) — габбро-долерит оливин-содержащий, GDol — габбро-долерит оливинный, pGD — габбро-долерит пикритовый



Материалы и методы исследования. Исследованы образцы из двух геологоразведочных скважин, пробуренных на восточном фланге Октябрьского месторождения (рис. 4).

Скважина ВФ-67кл пройдена до глубины 1681,5 м через верхние части Хараелахского интрузива — тектоническую зону, оливиновые габбро-долериты и пикритовые габбро-долериты (рис. 5, а). Из пикритовых габбро-долеритов отобраны три образца с сульфидной минерализацией (4–6 об.%). Скважина ВФ-68кл-2 полностью пересекает Хараелахский интрузив, закрыта на глубине 1775,1 м (рис. 5, б). Три образца из пикритовых габбро-долеритов насыщены интерстициальными и вкрапленными сульфидами (6–8 об.%).

Исследование образцов происходило в несколько этапов: минераграфическое описание; геохимическое определение петрогенных и рассеянных

элементов, а также элементов платиновой группы, золота и серебра; 3D-томография, компьютерное вычисление фрактальных размерностей и анализ полученных данных.

Химический состав минералов определялся локальным рентгеноспектральным анализом на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Leo 1450 (Carl Zeiss, Германия), оборудованном ЭДС-спектрометром Aztec Ultimmax 100 (Oxford Instruments, Великобритания) в Геологическом институте Кольского научного центра РАН. Для каждого комбинированного шлифа получен 24 изображения в обратно-рассеянных электронах (BSE-изображения): шлиф разбивали на 12 участков (три по вертикали и 4 по горизонтали) для получения максимально ровной картины — без дефокусировки на периферии и без муарового эффекта, вызванного мелким масштабом съемки.

Для каждого участка съемку выполняли в двух режимах контрастности: средняя контрастность — для получения различных изображений силикатной части и высокая контрастность — для получения различных изображений оксидов, сульфидов и минералов платиновой группы. Затем для каждого участка были получены карты распределения элементов: Al, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Na, Ni, P, S, Si, Ti. С помощью рентгеноспектрального анализа выполняли диагностику всех фаз крупнее 10 мкм и определяли химический состав сульфидов и выборочно — порообразующих минералов. Химический состав определяли в наиболее однородных зонах зерен путем получения спектров не менее чем в трех точках одного зерна, а затем, если разница между анализами не превышала 5%, усредняли.

Элементы определены в Институте химии и технологии редких элементов Кольского научного центра РАН. Кремний определяли методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на приборе ICPE 9000 (ИСП АЭС, Шимадзу, Япония) после сплавления. Низкую концентрацию кремния дополнительно измеряли методом спектрофотометрии (реагент — гетероомолибденовая поликислота) по синей окраске. Определение потерь при прокаливании проводили при температуре 1000 °C, углерода и серы — на автоматизированном анализаторе ELTRA CS-2000 (производитель ELTRA, Германия). Остальные 42 элемента устанавливали методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС), прибор ELAN 9000 DRC-e (производитель Perkin Elmer, США).

Содержание элементов платиновой группы, золота и серебра определяли в ООО «Институт Гипроникель» масс-спектрометрическим методом с индуктивно связанной плазмой (iCAP Q модели iCAP Qc), а также атомно-абсорбционным спектрометром iCE 3300.

Трехмерная рентгеновская томография образцов руд выполнена в Казанском федеральном университете с помощью микро- и нанофокусной исследовательской рентгеновской системы для компьютерной томографии General Electric V|tome|X S 240 (Германия). Этот метод позволяет регистрировать и анализировать внутреннюю структуру объекта без нарушения его строения и целостности (метод был предложен в 1972 г. Г. Хаунсфилдом и А. Кормаком, удостоенными за эту разработку Нобелевской премии [Hounsfield, 1995]). Метод основан на измерении и компьютерной обработке разности ослабления рентгеновского излучения в зависимости от изменения плотности и атомного состава вещества.

Атомизацию агрегатов сульфидов и дальнейшее определение их 2D-фрактальной размерности проводили с помощью программы GG_3 [Чернявский, Степенщиков, 2021] по изображениям в обратно-рассеянных электронах (BSE-изображения). При этом минеральные виды в сульфидных агрегатах

не выделялись. Это связано с тем, что сульфидные агрегаты формируются в результате кристаллизации твердого раствора моносulfида (monosulphide solid solution, MSS), и только после кристаллизации MSS разделяются на отдельные виды сульфидов. Паттерн заполнения пространства рудным веществом (т.е. структурно-текстурные характеристики рудной минерализации) сформировался на стадии внедрения рудоносных флюидов и кристаллизации MSS. Поэтому в исследовании 2D-фрактальной размерности сделан акцент на сульфидные агрегаты в целом. Разделение паттернов различных фаз (групп фаз) и определение их 3D-фрактальной размерности на основе данных рентгеновской компьютерной томографии также проводили с помощью программы GG_3. В результате компьютерной томографии формировался файл данных о наборе фаз, близких по рентгеновской плотности, для каждой из которых определяли следующие объемные и морфометрические характеристики.

1. *Объем фазы (мм³) и объемная доля в объеме всего образца (%).* Объем определяется за счет подсчета количества вокселей — элементов объемного изображения, отнесенных к определенной фазе или ко всему образцу. Размеры всех вокселей одинаковы и известны из параметров сканирования.

2. *Площадь поверхности фазы (мм²).* Определяется из суммы площадей граней вокселей, не соприкасающихся с гранями других вокселей своей фазы. Размеры всех вокселей одинаковы и известны из параметров сканирования.

3. *Фрактальная размерность.* Показатель сложности поверхности объекта, который количественно определяется как поверхность этого объекта, заполняет пространство. Истинные фрактальные объекты имеют формы поверхности, которые повторяются во многих пространственных масштабах. Фрактальная размерность измеряется на основе метода «Box counting 3D» [Chappard, et al., 2001]. Применительно к трехмерным изображениям фрактальная размерность — довольно эффективный индикатор измерения и сравнения шероховатости поверхности. Это также хороший индикатор для оценки того, как фаза заполняет пространство: чем менее гладкая поверхность, тем больше фрактальная размерность. Его также можно интерпретировать как количественную оценку того, насколько сложна поверхность и как она заполняет пространство. Настоящий фрактальный объект, по сути, имеет дробное, нецелочисленное измерение, т.е. представляет собой поверхность, заполняющую трехмерное пространство, имеющую размерность между 2 и 3. При этом в случае с фазами, имеющими небольшой объем по сравнению с объемом всего образца, метод «Box counting 3D» может выдавать значения фрактальной размерности менее 2, тем не менее даже в этом случае он остается информативным морфометрическим параметром.

4. *Степень анизотропии* — параметр, который вычисляет меру трехмерной неоднородности. Это

хороший индикатор для обнаружения ориентированных структур вдоль определенной оси направления. Эта мера основана на анализе собственных значений средней длины пересечения под разными углами и заключается в применении метода средней длины перехвата (MIL), в котором набор лучей проходит через исследуемую структуру под большим количеством 3D-ракурсов. MIL для каждого угла рассчитывается как среднее значение для всех линий сетки. Длина пересечения каждого луча с встреченным объектом измеряется и усредняется по сетке лучей. Распределение средней длины пересечения в зависимости от угла анализируется с помощью разложения на собственные значения. Этот анализ позволяет выделить минимальное и максимальное собственные значения: чем ближе эти значения, тем меньше структурная анизотропия [Harrigan, 1984]. Равенство максимальных (E_{\max}) и минимальных (E_{\min}) собственных значений векторов означает, что они не являются главным структурным направлением

$$DA = \left(1 - \left[\frac{E_{\min}}{E_{\max}} \right] \right).$$

(1)

Степень анизотропии равна 0 для идеальной изотропии и 1 для полной анизотропии. В общем виде понятие фрактал определено в представленной работе как объект, состоящий из частей, которые условно самоподобны. Более строго фрактал определяется как множество точек в евклидовом пространстве, имеющее дробную метрическую размерность [Falconer, 2003]. Фрактальную размерность можно определить, отталкиваясь от евклидовой размерности. Евклидова (топологическая) размерность фигуры определяется числом координат, необходимых для однозначного определения положения на ней любой ее точки. Так, точка — нуль-мерный объект, линия — одномерный, поверхность — двумерный, объемная фигура — трехмерный объект. Если разделить единичный отрезок на любое число N равных частей, то каждую часть можно считать копией всего отрезка, уменьшенной в $1/r$ раз. Очевидно, что N и r связаны соотношением $Nr = 1$. Точно так же, если единичный квадрат разбить на N равных квадратов с площадью, в $1/r^2$ раз меньшей площади исходного квадрата, N и r будут связаны соотношением $Nr^2 = 1$, а в случае аналогичного разбиения куба — соотношением $Nr^3 = 1$. Таким образом, размерность D этих фигур равна степени при коэффициенте подобия r :

$$Nr^D = 1.$$

(2)

Следовательно,

$$D = \frac{\log N}{\log(1/r)}.$$

(3)

Вычисленная таким образом размерность называется размерностью подобия D_S . Существует класс

Таблица 1

Химический состав пикритовых габбро-долеритов
Хараелахского интрузива по данным ICP-МС

Состав	Номер образца				
	67/1677.8	67/1680	68/1763.2	68/1763.7	68/1765.3
Na ₂ O,	0,91	0,32	0,45	0,82	0,45
MgO	5,65	9,98	18,74	19,93	18,52
Al ₂ O ₃	6,94	3,01	4,89	7,05	3,59
P ₂ O ₅	0,105	0,068	0,083	0,073	0,083
K ₂ O	0,51	0,25	0,25	0,21	0,29
CaO	4,18	1,57	3,01	3,32	1,78
TiO ₂	0,59	0,34	0,35	0,49	0,43
MnO	0,11	0,10	0,15	0,19	0,19
Fe ₂ O ₃	11,30	11,84	18,93	23,68	15,91
SiO ₂	45,31	41,84	33,91	35,88	34,37
C	0,082	0,116	0,129	0,115	0,131
S	0,297	0,856	3,40	3,51	1,33
Sc, г/т	26,6	18,3	13,2	14,8	15,0
V	177,0	104,5	102,9	150,1	122,7
Cr	2287	2763	2372	2009	470
Co	71,9	126,6	279,0	279,2	190,4
Ni	452,9	2205	8708	8411	4784
Cu	151,5	2679	14511	11995	6582
Zn	91,3	71,5	104,0	95,6	115,2
Rb	8,77	3,27	4,92	4,24	5,35
Sr	176,2	53,7	50,5	50,0	53,3
Y	9,83	4,20	10,29	7,01	9,22
Zr	48,1	23,3	35,3	27,5	33,7
Nb	2,23	1,27	1,55	1,51	1,55
Ag	<0,001	0,035	4,34	4,73	1,75
Ba	84,3	30,2	26,0	20,5	21,0
La	3,54	1,66	2,96	2,39	6,06
Ce	8,66	4,08	6,87	5,56	13,0
Pr	1,17	0,55	0,90	0,75	1,60
Nd	5,64	2,72	4,30	3,55	6,96
Sm	1,80	0,83	1,17	0,98	1,62
Eu	0,57	0,27	0,34	0,29	0,37
Gd	1,92	0,88	1,39	0,80	1,82
Tb	0,33	0,15	0,24	0,20	0,28
Dy	2,14	1,03	1,64	1,29	1,68
Ho	0,44	0,20	0,34	0,26	0,32
Er	1,31	0,63	1,12	0,80	1,02
Tm	0,18	0,090	0,16	0,111	0,13
Yb	1,22	0,59	1,24	0,77	1,02
Lu	0,19	0,087	0,17	0,11	0,13
Hf	1,25	0,55	0,87	0,72	0,82
Ta	0,090	0,061	0,052	0,11	0,055
Pb	1,68	6,52	14,1	11,64	4,19
Th	0,50	0,20	0,55	0,31	2,84
U	0,25	0,14	0,17	0,15	0,34

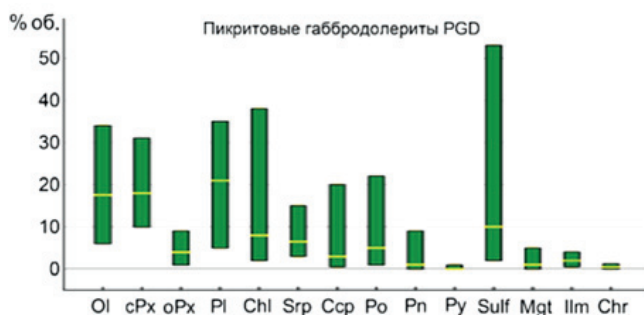


Рис. 6. Модальный состав пикритовых габбро-долеритов восточного фланга Октябрьского месторождения. Высота колонок — от минимального до максимального значения, желтая линия на каждой колонке — медианное значение содержания минерала. Буквенные обозначения: Ol — оливин, cPx — клинопироксен, oPx — ортопироксен, Pl — плагиоклаз, Chl — хлорит, Srp — серпентин, Ccp — халькопирит, Po — пирротин, Pn — пентландит, Py — пирит, Sulf — суммарное содержание сульфидов, Mgt — магнетит, Ilm — ильменит, Chr — хромит

объектов, характеризующихся дробной величиной D_s , которая в этом случае выступает в качестве одной из разновидностей фрактальной размерности, а сами объекты называются фракталами.

Результаты исследований и их обсуждение.

Пикритовые габбро-долериты представляют собой средне-мелкозернистые породы темно-зеленовато-серого цвета, с массивной, реже пятнистой текстурой (за счет редких плагиоклазовых сростаний до 2 см). Породы содержат увеличивающуюся с глубиной сульфидную минерализацию (от долей процента до 3–12%), а в некоторых участках — хромитовую минерализацию (табл. 1). Исследуемая крупная пластообразная залежь вкрапленных руд характеризуется выдержанной мощностью и равномерным распределением полезного компонента.

Модальный состав пикритовых габбро-долеритов (рис. 6) указывает на преобладание в них сульфидной минерализации.

Агрегаты сульфидов заполняют интерстиции между зернами породообразующих силикатов либо образуют отдельные крупные капли. Минерографическое описание морфологии сульфидных вкрапленностей в изученных образцах позволило выделить три четко отличающихся типа оруденения: 1) интерстициально-каплевидная, 2) интерстициальная и 3) неравномерная каплевидно-интерстициальная.

Оруденение с интерстициально-каплевидной сульфидной вкрапленностью (тип минерализации 1) характеризуется присутствием относительно крупных (до 4 см в поперечнике) капель сульфидов. Форма капель округлая, неправильная, иногда вытянутая. Кроме капель, сульфиды заполняют интерстиции между зернами силикатных минералов. В целом морфологию этого типа оруденения можно описать как крупные капли, которые либо частично соединены между собой тонкими ветвящимися

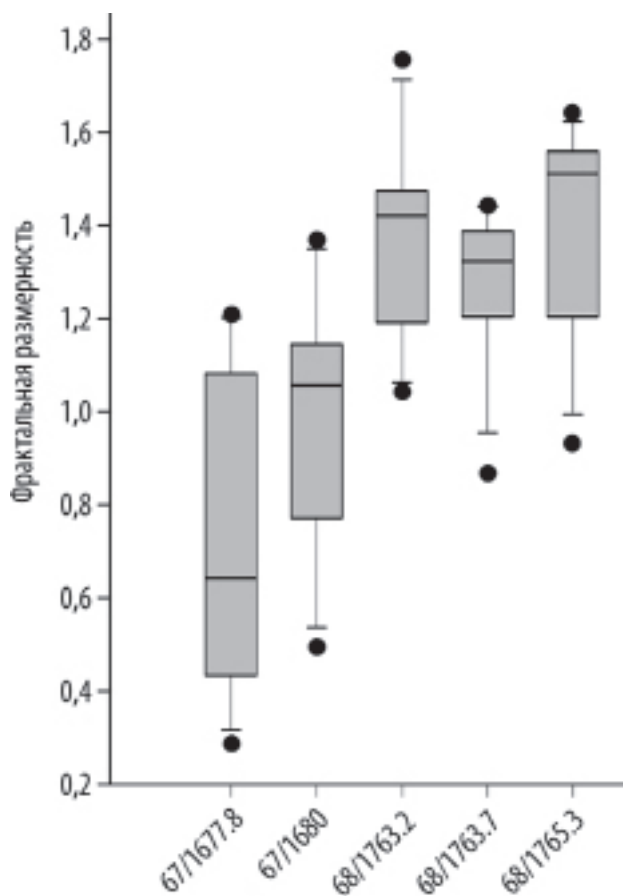


Рис. 7. Статистические характеристики 2D-фрактальной размерности сульфидных агрегатов в пикритовых габбро-долеритах

сульфидными прожилками, либо окружены ветвящимися сульфидными прожилками.

Оруденение с интерстициальной сульфидной вкрапленностью (тип минерализации 2) не имеют капель как таковых, а сульфиды расположены исключительно в интерстициях породообразующих силикатов.

Неравномерную каплевидно-интерстициальную сульфидную вкрапленность (тип минерализации 3) мы считаем промежуточным типом между первым и вторым. Здесь сульфиды образуют и капли, и интерстициальную вкрапленность как в первом типе оруденения, но в отличие от оруденения первого типа, капли распределены неравномерно и имеют меньший размер.

Статистические характеристики 2D-фрактальной размерности рудных агрегатов указывают на то, что наибольшие медианные значения характерны для первого типа рудной минерализации, а минимальные — для второго типа (рис. 7). Кроме того, первый тип характеризуется максимальным разбросом значений. В целом, распределение фрактальных размерностей близко к нормальному для всех трех типов рудной минерализации (табл. 2).

Двумерная фрактальная размерность сульфидных агрегатов оруденения первого типа в среднем составляет 1,15, второго типа — 0,86, а третьего — 1,04.

Таблица 2

Статистические характеристики 2D-фрактальной размерности сульфидных агрегатов

Тип минерализации	Минимум	Нижний квартиль	Медиана	Среднее арифметическое	Верхний квартиль	Максимум	Стандартное отклонение
1	0,29	0,74	1,10	1,04	1,30	1,76	0,38
2	0,93	1,20	1,51	1,42	1,56	1,64	0,22
3	0,87	1,20	1,32	1,28	1,39	1,44	0,16

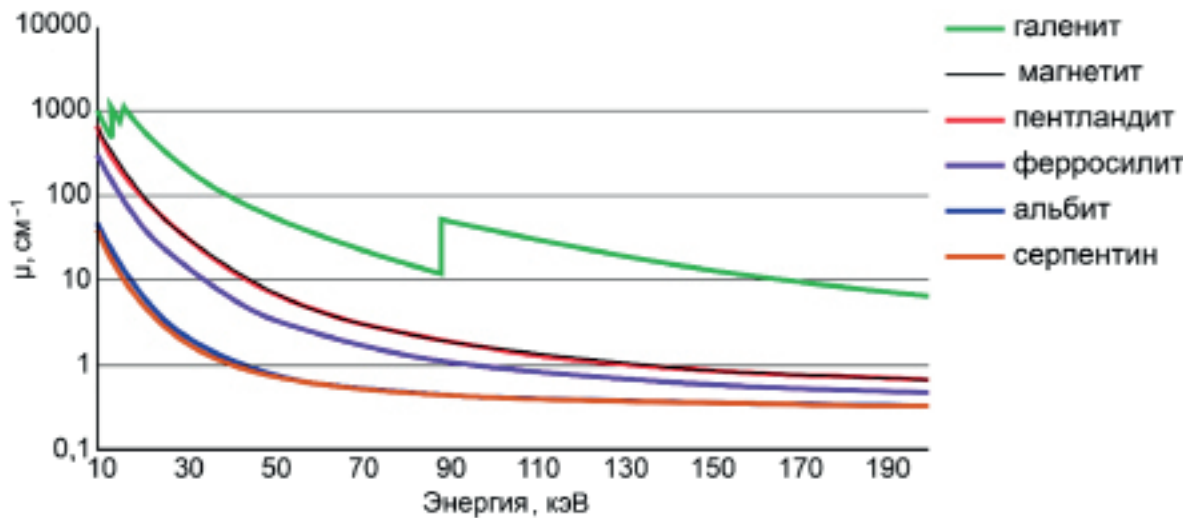


Рис. 8. Значения коэффициентов поглощения (μ) исследуемых минералов, группируемые в четыре фазы

Таблица 3

Выделяемые в изученных образцах фазы по данным 3D-томографии

Группа	Минералы	Цвет на изображениях
Фаза 1	Минералы платиновой группы, галенит	Красный
Фаза 2	Сульфиды и оксиды железа: пирротин, пентландит, халькопирит, кубанит, пирит, ильменит, минералы группы шпинели	Желтый
Фаза 3	Оливин, пироксен, амфибол, биотит, мусковит	Синий
Фаза 4	Плаггиоклазы, тальк, серпентин	Зеленый

Трехмерная рентгеновская томография позволила собрать несоизмеримо больший объем информации о строении исследуемого объекта (в нашем случае неразрушенного интервала керна) по сравнению с анализом двумерных срезов (шлифов, аншлифов, полированных штудов). Для исследуемых образцов на основе предварительной информации о минеральном составе и энергии рентгеновского излучения (≈190 КэВ) выделено четыре группы фаз, различающихся по степени поглощения рентгеновского излучения (рис. 8 и табл. 3).

Одна из этих фаз объединяет в себе сульфиды и оксиды (рис. 9, 10). Объемные и морфометрические

характеристики представляют собой цифровые данные об объеме, площади поверхности минерального агрегата, 3D-фрактальной размерности и анизотропии для выделенных фаз образцов с разным типом минерализации (табл. 4).

Пикритовые габбро-долериты имеют среднюю мощность около 22 м, а значения наибольшей мощности варьируют от 32 до 41 м. Рудное тело вкрапленных руд четко контролируется распространением пикритовых и такситовых габбро-долеритов Хараелахского интрузива, в частности, морфологическими особенностями самого рудоносного интрузива. Разные фрактальные размерности и анизотропия образцов отражают сложную динамику формирования.

Заключение. В горизонте вкрапленных руд на восточном фланге Октябрьского месторождения сверху вниз по разрезу наблюдается смена условий кристаллизации рудных минералов. Каждый агрегат рудных минералов с дробной размерностью характеризуется регулярным образом (фрактальным паттерном).

Фрактальная размерность и анизотропия оруденения могут быть индикаторами различных природных типов руд, что позволяет рекомендовать их расчет и анализ при разведочных и эксплуатационных работах. Полученные результаты также могут служить дополнительным критерием при выборе технологии обогащения вкрапленных руд.

Таблица 4

Объемные и морфометрические характеристики выделенных фаз

Тип минерализации			Номер образца				
			67 / 1677,8	67 / 1680,0	68 / 1763,2	68 / 1763,7	68/1765.3
			1	1	1	3	2
Фаза 2	Объем	мм ³	1771,32	2820,09	2867,53	3714,76	1116,49
		%	1,95	2,94	5,42	4,03	2,29
	Площадь поверхности	мм ²	346,15	22063,16	16315,47	18567,26	10240,16
	Фрактальная размерность		2,0496	2,1859	2,1315	2,0686	2,0314
	Анизотропия		0,4945	0,5214	0,5440	0,5203	0,5113
Фаза 3	Объем	мм ³	65366,18	71832,48	14922,66	38470,76	20081,04
		%	71,85	74,97	28,22	41,73	41,17
	Площадь поверхности	мм ²	520,14	140158,83	108066,0	260900,8	102222,56
	Фрактальная размерность		2,5724	2,6367	2,5189	2,5873	2,5238
	Анизотропия		0,4906	0,4984	0,5137	0,5067	0,5242
Фаза 4	Объем	мм ³	23858,0977	21189,9590	35098,3906	50039,0781	27590,17
		%	26,23	22,12	66,38	54,28	56,57
	Площадь поверхности	мм ²	497,68	115753,12	98929,57	245707,86	95315,74
	Фрактальная размерность		2,4947	2,5412	2,5390	2,5943	2,5169
	Анизотропия		0,5435	0,5366	0,5149	0,5045	0,541

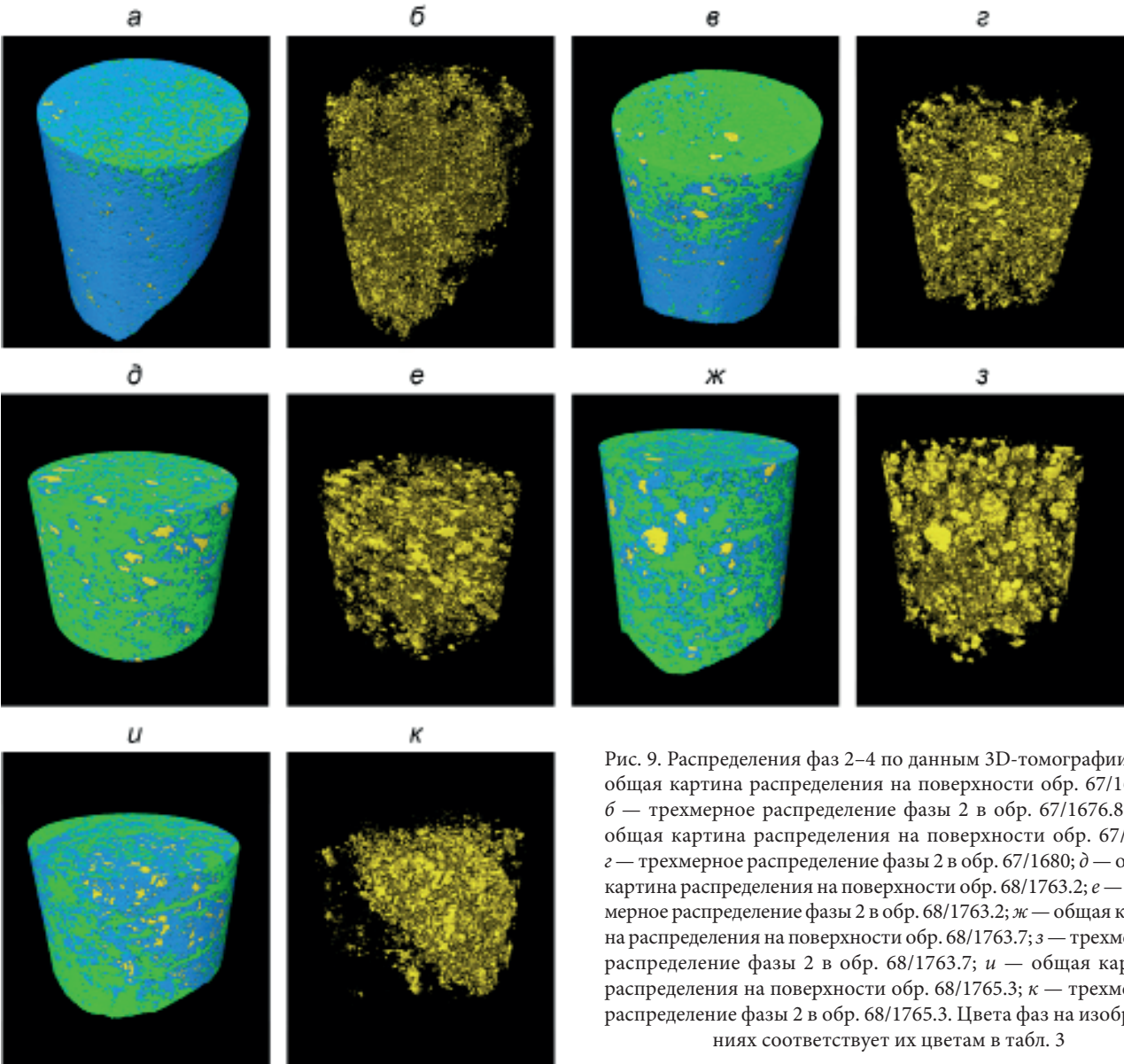


Рис. 9. Распределения фаз 2–4 по данным 3D-томографии: а — общая картина распределения на поверхности обр. 67/1676.8; б — трехмерное распределение фазы 2 в обр. 67/1676.8; в — общая картина распределения на поверхности обр. 67/1680; г — трехмерное распределение фазы 2 в обр. 67/1680; д — общая картина распределения на поверхности обр. 68/1763.2; е — трехмерное распределение фазы 2 в обр. 68/1763.2; ж — общая картина распределения на поверхности обр. 68/1763.7; з — трехмерное распределение фазы 2 в обр. 68/1763.7; и — общая картина распределения на поверхности обр. 68/1765.3; к — трехмерное распределение фазы 2 в обр. 68/1765.3. Цвета фаз на изображениях соответствует их цветам в табл. 3

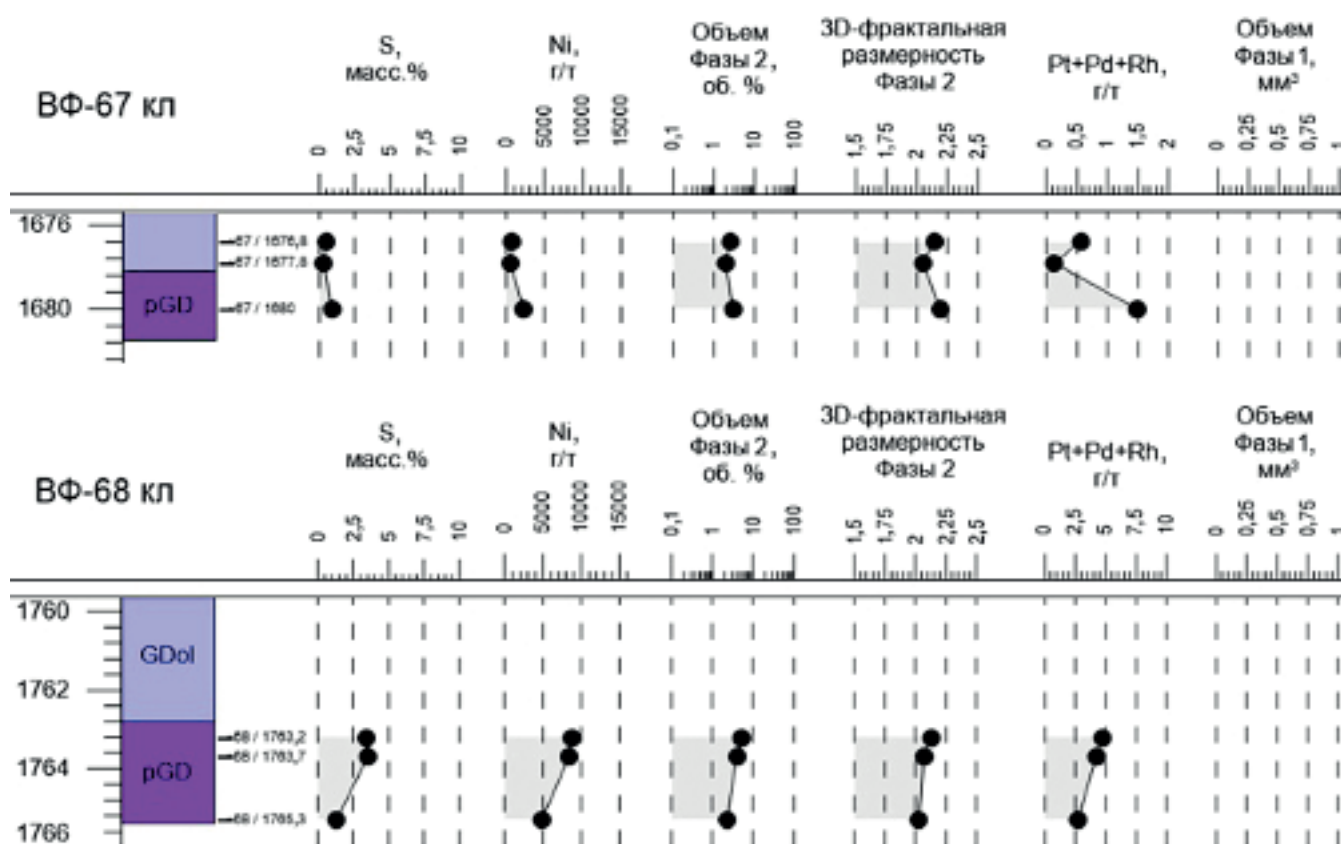


Рис. 10. Фрагменты геологических колонок по результатам рентгеновской компьютерной томографии пикритовых дифференциатов. Буквенные обозначения см. на рис. 5

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Геология Норильской металлогенической провинции / Под ред. И.И. Никулина. М.: МАКС Пресс, 2020. 524 с.

Горяинов П.М., Иванюк Г.Ю. Самоорганизация минеральных систем. М.: ГЕОС, 2001. Т. 312. 256 с.

Горяинов П.М. Иванюк Г.Ю. и др. Структурная организация рудной зоны Коашвинского апатит-нефелинового месторождения // Отч. геология. 2007. № 2. С. 55–60.

Радько В.А. Модель динамической дифференциации интрузивных траппов северо-запада Сибирской платформы // Геология и геофизика. 1991. № 11. С. 19–27.

Чернявский А.В., Степеничиков Д.Г. Метод сегментации изображения для подсчета процентного содержания минералов с помощью авторской программы // Тр. Ферсмановской науч. сессии ГИ КНЦ РАН. 2021. № 18. С. 414–418.

Afzal P., Ahmadi K., Rahbar K. Application of fractal-wavelet analysis for separation of geochemical anomalies // J. African Earth Sci. 2017. Vol. 128. P. 27–36.

Blenkinsop T.G., Sanderson D.J. Are gold deposits in the crust fractals? A study of gold mines in the Zimbabwe craton // Geol. Soc. Lond. Spec. Publ. 1999. Vol. 155. N 1. P. 141–151.

Carlson C.A. Spatial distribution of ore deposits // Geology. 1991. Vol. 19. N 2. P. 111–114.

Chappard D., Legrand E., Haettich B. et al. Fractal dimension of trabecular bone: comparison of three histomorphometric computed techniques for measuring the architectural two-dimensional complexity // J. Pathology: A Journal of the Pathological Soc. of Great Britain and Ireland. 2001. Vol. 195, N 4. P. 515–521.

Chen G., Cheng Q. Fractal-based wavelet filter for separating geophysical or geochemical anomalies from background // Mathem. Geosci. 2018. Vol. 50, N 3. P. 249–272.

Cheng Q., Agterberg F.P., Ballantyne S.B. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods // J. Geochem. explor. 1994. Vol. 51, N 2. P. 109–130.

Cheng Q., Xu Y., Grunsky E. Integrated spatial and spectrum method for geochemical anomaly separation // Natural Resources Res. 2000. Vol. 9, N 1. P. 43–52.

Falconer K. Fractal geometry: mathematical foundations and applications. England, John Wiley & Sons, 2004.

Gavriliuț A., Mercheș I., Agop M. Atomicity through fractal measure theory. England, Springer Intern. Publ., 2019. 28 p.

Goryainov P.M., Ivanyuk G.Y., Kalashnikov A.O. Topography formation as an element of lithospheric self-organization // Russ. Geol. and geophysics. 2013. Vol. 54, N 9. P. 1071–1082.

Haddad-Martim P.M., de Souza Filho C.R., Carranza E.J.M. Spatial analysis of mineral deposit distribution: A review of methods and implications for structural controls on iron oxide-copper-gold mineralization in Carajás, Brazil // Ore Geol. Rev. 2017. Vol. 81. P. 230–244.

Harrigan T.P., Mann R.W. Characterization of microstructural anisotropy in orthotropic materials using a second rank tensor // J. Materials Sci. 1984. Vol. 19, N 3. P. 761–767.

Hounsfield G.N. Computerized transverse axial scanning (tomography): P. 1. Description of system // British J. Radiology. 1973. Vol. 46, N 552. P. 1016–1022.

Ivanyuk G., Yakovenchuk V., Pakhomovsky Y. et al. Self-organization of the Khibiny alkaline massif (Kola Peninsula, Russia). Croatia, Rijeka: InTech, 2012. 131 p.

Kruhl J.H. Fractal-geometry techniques in the quantification of complex rock structures: a special view on scaling regimes, inhomogeneity and anisotropy // J. Structur. Geol. 2013. Vol. 46. P. 2–21.

Mandelbrot B.B. The fractal geometry of nature. N.Y.: WH freeman, 1982. Vol. 1. 152 p.

McCaffrey K.J.W., Johnston J.D. Fractal analysis of a mineralised vein deposit: Curraghinalt gold deposit, County Tyrone // *Mineral. Deposita*. 1996. Vol. 31, N 1. P. 52–58.

Perugini D., Poli G., Mazzuoli R. Chaotic advection, fractals and diffusion during mixing of magmas: evidence from lava flows // *J. Volcanology and Geothermal Res.* 2003. Vol. 124, N 3–4. P. 255–279.

Perugini D., Poli G. The mixing of magmas in plutonic and volcanic environments: analogies and differences // *Lithos*. 2012. Vol. 153. P. 261–277.

Peternell M., Bitencourt M., Kruhl J.H. et al. Macro and micro-structures as indicators of the development of syntectonic granitoids and host rocks in the Camboriú region, Santa Catarina, Brazil // *J. South Amer. Earth Sci.* 2010. Vol. 29, N 3. P. 738–750.

Peternell M., Bitencourt M.F., Kruhl J.H. Combined quantification of anisotropy and inhomogeneity of magmatic rock fabrics — An outcrop scale analysis recorded in high resolution // *J. Structur. Geol.* 2011. Vol. 33, N 4. P. 609–623.

Pourgholam M.M. et al. Detection of geochemical anomalies using a fractal-wavelet model in Ipack area, Central Iran // *J. Geochem. Explor.* 2021. Vol. 220. P. 106–675.

Roberts S., Sanderson D.J., Gumiel P. Fractal analysis and percolation properties of veins // *Geol. Soc. Lond. Spec. public.* 1999. Vol. 155, N 1. P. 7–16.

Wang W., Zhao J., Cheng Q. Application of singularity index mapping technique to gravity/magnetic data analysis in southeastern Yunnan mineral district, China // *J. Applied Geophysics*. 2013. Vol. 92. P. 39–49.

Xiao F., Chen Z., Chen J. et al. A batch sliding window method for local singularity mapping and its application for geochemical anomaly identification // *Computers & Geosci.* 2016. Vol. 90. P. 189–201.

Yakymchuk C. et al. Leucosome distribution in migmatitic paragneisses and orthogneisses: A record of self-organized melt migration and entrapment in a heterogeneous partially-molten crust // *Tectonophysics*. 2013. Vol. 603. P. 136–154.

Zuo R., Wang J. Fractal/multifractal modeling of geochemical data: A review // *J. Geochemic. Explor.* 2016. Vol. 164. P. 33–41.

Статья поступила в редакцию 01.12.2022,
одобрена после рецензирования 12.12.2022,
принята к публикации 12.03.2022