

Норильские рудоносные интрузивы и сульфидные руды. К 120-летию М. Н. Годлевского

Михаил Николаевич Годлевский – один из создателей современной геологии Норильского региона, ведущий специалист в области магматических сульфидных месторождений. Все серьезные научные труды и производственные отчеты по Норильскому региону содержат ссылки на знаменитую книгу М. Н. Годлевского «Траппы и рудоносные интрузии Норильского района» [11]. Ниже рассмотрено современное состояние некоторых проблем, которые исследовал М. Н. Годлевский в Норильском регионе.

ЭРНСТ МАКОВИЧ СПИРИДОНОВ, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры минералогии геологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, ведущий научный сотрудник Минералогического музея им. А. Е. Ферсмана РАН, ernstspiridon@gmail.com

Norilsk ore-bearing intrusives and sulfide ores. To the 120th anniversary of the birth of M. N. Godlevsky

E. M. SPIRIDONOV

Lomonosov Moscow State University, A. E. Fersman Mineralogical Museum of the Russian Academy of Sciences, Moscow

Mikhail Nikolaevich Godlevsky is one of the creators of modern geology in the Norilsk region, and a leading specialist in the field of magmatic sulfide deposits. All serious scientific works and production reports on the Norilsk region contain references to the famous book by M. N. Godlevsky "Traps and ore-bearing intrusions of the Norilsk region" [11]. Below we consider the current state of some of the problems that M. N. Godlevsky investigated in the Norilsk region.

Геологическая позиция и строение Норильского рудного поля

М. Н. Годлевский ясно показал отличие Норильского от иных регионов Восточно-Сибирской платформы: заметная дислоцированность, обилие разрывных нарушений, существенная доля пикритов среди вулканических траппов и богатых магнезиальным оливином габбро-долеритов среди интрузивных траппов.

Норильское рудное поле находится в пределах дориффейской Восточно-Сибирской платформы, недалеко от границы с Западно-Сибирской эпикаледонгерцинской плитой, над мощным выступом высокоплотных пород основного состава (рис. 1) [10], в зоне краевых дислокаций в северо-западной части платформы. Мощность земной коры здесь 42–47 км, из них 34–40 км – толщи кристаллических сланцев и амфиболитов архейского и протерозойского возраста с телами гранитов (фундамент платформы), и 8–12 км – несколько дислоцированные и слабо метаморфизованные толщи рифея–венда–фанерозоя (плитный чехол платформы) [69]. Фундамент платформы разбит массой разломов. Рудные узлы Норильский (на юго-западе рудного поля) и Талнахский (на северо-востоке рудного поля, между ними

20 км) размещены в плитном чехле платформы. Плитный чехол слагают терригенные отложения R (~2,5 км), пестроцветные ангидрит-карбонатно-терригенные толщи от R₃ до C (~5,5–9 км), угленосная толща С–Р (тунгусская серия) (~0,5 км), платобазальты P₂–T₁ (до 4–5 км) [69]. Толщи ангидрита содержат линзы галита и рассолов, пятна нефтидов.

Траппы P₂–T₁ развиты не только на Восточно-Сибирской платформе, но и выполняют мощные рифты в Западно-Сибирской плите. При формировании трапповой формации преобладали процессы растяжения земной коры и сопутствующая эффузивная деятельность, их периодически сменяли процессы сжатия и интрузивная деятельность. Состав вулканических траппов – от щелочных оливиновых базальтов до резко преобладающих толеитовых базальтов континентального типа, интрузивных базальтов – от безрудных толеитовых габбро-долеритов до рудоносных оливиновых габбро-норит-долеритов повышенной калийности [11, 24, 51, 65, 75].

О соотношении эффузивных траппов и рудоносных интрузивов норильского типа

Данный вопрос имеет принципиальное значение для выяснения генетического типа гигантских

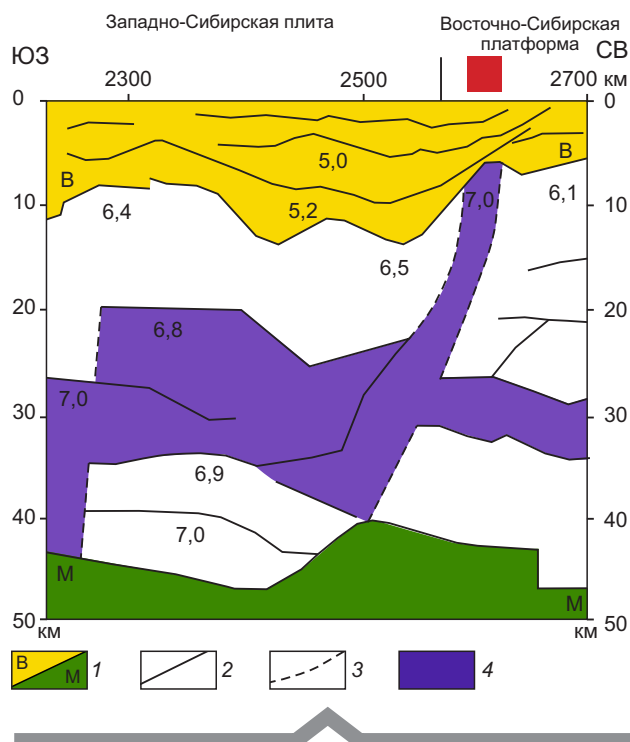


Рис. 1. Фрагмент сейсмического профиля «Батолит» [10]:

1 – опорные сейсмические границы (В – фундамент, М – поверхность Мохо); 2 – внутрикоровые сейсмические границы; 3 – границы блока с различными скоростными характеристиками; 4 – блоки земной коры, сложенные породами основного состава; числа на рисунке – значения скоростей продольных волн, км/с; красным показано географическое положение Норильского рудного поля

Норильских месторождений: эти месторождения – плутоногенные или субвулканические? Кроме того, для месторождений Норильского рудного поля характерна аномально высокая мощность сульфидных залежей при скромной мощности рудоносных интрузивов. Интересную гипотезу для объяснения этих соотношений выдвинул В. А. Радько [37]. Суть её в том, что через камеры рудоносных интрузивов прошли огромные массы базальтовых расплавов, которые затем сформировали толщу эффузивов трапповой формации, но «по дороге оставили» в камерах интрузивов свой «рудный груз»; эта гипотеза подхвачена западными учёными и очень популярна [72]. Проанализируем, насколько с этой интересной гипотезой согласуются данные по реальной геологии Норильского региона.

Эффузивы трапповой формации Восточно-Сибирской платформы – производные бесчисленных трещинных излияний, сформировались в условиях тектонического растяжения [33]. Эффузивные траппы Норильского региона не содержат ни одной капли

сульфидов. В центре вулканических плато покровы залегают горизонтально, у базальтов правильная вертикальная столбчатая отдельность. Мульдообразное залегание платобазальтов в Норильском регионе обусловлено смятием совместно всей толщи вулканических траппов от ивакинской до моронговской свит вместе с подстилающими осадочными толщами [9, 69]. В этих пологих брахисинклинальных складках – с юго-запада на север и северо-восток Норильской, Вологодчанской, Хараелахской, Сыверминской – мощность вулканитов в их центре и на крыльях одинакова. В местах замыкания брахисинклиналей платобазальты трапповой формации смяты, у них исчезла столбчатая отдельность (рис. 2). Возможно, плитный чехол Восточно-Сибирской платформы в Норильском регионе был смят при раскрытии мощных рифтов на севере Западно-Сибирской плиты.

Великолепный знаток геологии Норильского региона М. Н. Годлевский и его ученики В. К. Степанов, Д. М. Туровцев, А. П. Лихачёв, В. В. Юдина, Э. А. Кулагов, которые детально изучили весь объём



Рис. 2. Северное замыкание Норильской брахисинклинали. Западная стенка карьера Угольный Ручей. Фото автора:

высота стенки 13 м; смятые платобазальты ивакинской свиты, у которых исчезла правильная столбчатая отдельность

поисково-разведочных скважин, в том числе Талнахского рудного узла, карьеры рудников Угольный ручей и Медвежий ручей, заметную часть подземных выработок рудников Заполярный, Маяк, Октябрьский, Комсомольский и Таймырский, надёжно установили, что рудоносные интрузивы норильского типа не имели выхода на палеоповерхность [6, 11, 15, 24, 32, 51, 52, 54]. Следовательно, напрямую они не связаны с вулканами трапповой формации P_2-T_1 .

Судя по геологической карте Норильского региона масштаба 1:200 000 [9], все вулканические свиты трапповой формации смяты совместно. Недеформированные рудоносные интрузивы прорвали и контактово метаморфизовали дислоцированные вулканы трапповой формации и подтрапповые толщи. Рудоносные интрузивы – расслоенные, залегание первичной расслоенности габброидных пород в них пологое.

Н. А. Кривошук показал, что вулканические траппы и породы рудоносных интрузивов некомагматичны [28]. Оценка давления при формировании этих интрузивов, по М. Н. Годлевскому и В. К. Степанову, – 0,8 кбар, что соответствует глубине становления 2,5 км от палеоповерхности. Для рудоносных интрузивов норильского типа характерно наличие пегматоидных габбро-долеритов [13, 21], крупно- и гигантокристаллических сульфидных руд [8, 45]. Итак, норильские месторождения – плутоногенные [45, 56].

Таким образом, красивая гипотеза В. А. Радько, «просто» объясняющая огромное количество магматогенных сульфидных руд в интрузивах норильского типа, не согласуется с последовательностью геологических событий, с реальными соотношениями эффузивных траппов и рудоносных интрузивных траппов [72].

Механизм внедрения рудоносных интрузивов норильского типа

По данным В. К. Степанова [51, 73], Норильские рудоносные интрузивы внедрились в обстановке сжатия, при смятии слоистых толщ рамы интрузивов. Согласно принципу Эйлера, при этом образуются линзовидные полости, которые «работают как помпы», происходит всасывание магматического материала и формируются интрузивные тела. Характер течения расплавов – ламинарный. По данным В. К. Степанова [51, 52] и натурным наблюдениям, сульфидные расплавы внедрились из глубинного источника синхронно с силикатными расплавами, породившими рудоносные интрузивы норильского типа. В. К. Степанов предположил, что три несмешивающиеся расплава с количественным соотношением ~100:10:1 сформировали коаксиальное

цилиндроподобное в разрезе тело, где самый тяжёлый сульфидный расплав находился в центре; его окружал менее тяжёлый кашеобразный базитовый расплав с обильными кумулятивными оливином и хромшпинелидом, вокруг них находился наименее тяжёлый толеит-базальтовый расплав.

Предложенный способ внедрения объясняет: 1) каким образом в верхнюю часть плитного комплекса платформы внедрились тяжёлые расплавы, в том числе сульфидный; 2) возможность образования двух горизонтов «пикритовых» пород в рудоносных интрузивах – стандартного нижнего и нестандартного верхнего; 3) наличие тонкокристаллических долеритов и стекловатых пород (так называемых «псевдотахилитов») на слепых окончаниях Хараелакского и Верхнеталнахского интрузивов [24 и др.] – при всасывании первые порции базитового расплава быстро «убежали» от теплового фронта поднимающихся расплавов и сформировали эффузивоподобные породы на интрузивном уровне. С большой долей вероятности можно предположить, что внедрение рудоносных интрузивов норильского типа произошло в процессе смятия толщ вулканических траппов и подтрапповых толщ при раскрытии мощных рифтов на северо-востоке Западно-Сибирской плиты.

Интрузивный процесс был неоднородным – относительно спокойное внедрение, при котором возникли участки интрузивов с пологими дном и кровлей, сменялось условиями, когда магматические массы буквально выпихивали пространство, образуя депрессии дна интрузивов. При этом движение магматической колонны тормозилось, из «струи» сульфидного расплава начинался дождь или град сульфидных капель [43]. Часть капель застряла в кашеобразном «пикритовом» горизонте, значительная часть просочилась до дна, образовав озёра сульфидного расплава именно в депрессиях дна интрузивов. По А. П. Лихачёву [32], при торможении интрузивного процесса ламинарное течение расплавов сменялось турбулентным, что способствовало интенсификации сульфидного дождя. Временами происходило взламывание пород рамы, при этом возникали интрузивные брекчии и, соответственно, гибридные магматические породы, то богатые кварцем и (или) гранофировыми агрегатами гранитного состава, то богатые кордиеритом, то с массой обломков хромитоносных лейкогаббро. Размер обломков осадочных пород в таких брекчиях достигал 150 м, например, в интрузиве Норильск-II [6].

Зачастую весьма неоднородное распределение магматических пород в объёме интрузивов могло быть вызвано тем, что следующие порции расплавов перемещали – «толкали» вперёд ранее сформированные магматические массы [32, 51, 52]. Особенно

неравномерно распределены породы «пикритового» горизонта с каплями сульфидов. По данным В.К. Степанова [73]: 1) «пикритовые капельники» слагают до 60% мощности Норильского интрузива в скважинах Е-17 (Ергалах) и РЕ-92 (Чибицей) и до 70% мощности в отдельных участках головных частей Талнахского (Верхнеталнахского) и Хараелахского (Таймырского) рудоносных интрузивов; 2) в более глубоко залегающих северных продолжениях Талнахского и Хараелахского интрузивов «пикритовых капельников» мало; 3) установлена прямая корреляция мощности горизонта «пикритовых капельников» и обилия в них сульфидов и мощности сульфидной залежи в данной депрессии дна интрузивов; 4) нижний и верхний горизонты оливиновых габбро-долеритов – такситовых оливиновых габбро-долеритов содержат однотипную вкрапленность сульфидов; 5) нижний и верхний «пикритовые» горизонты содержат различную по составу вкрапленность сульфидов и хромшпинелидов.

Установлено сложное неоднородное строение главного (в будущем) типа руд Норильского рудного поля – капельников горизонта «пикритов» = габбро-норит-перидотитов с сульфидными каплями. Магматические породы данного горизонта обычно описывают как пикритовые габбро-долериты. Термин долериты к ним не приложим, поскольку плагиоклаз в этих породах ксеноморфный. Это габбро-норит-перидотиты, меланотроктолиты, плагиолерцолиты. В вертикальном разрезе данного горизонта присутствует несколько уровней обогащённых и обеднённых сульфидными каплями.

О вероятном источнике исходных расплавов рудоносных интрузивов норильского типа

Основной объём этих интрузивов слагают габбро-долериты призматически-зернистые, оливиновые, оливинсодержащие, безоливиновые, лейкократовые, анортозитовые, такситовые; меланотроктолиты, плагиолерцолиты. Для этой ортомагматической ассоциации характерна анортозитовая тенденция магматической дифференциации [41]. Судя по составу оливина (Fe хризолит и гиалосидерит), хромшпинелидов (низкохромистые Ti алюмомагнезиохромит и алюмохромит, Ti феррихромит), пироксенов, Mg ильменита, рудоносные интрузивы – производные базитовых (пикробазальтовых) расплавов невысокой щёлочности.

Заметную часть рудоносных интрузивов слагают гибридно-метасоматические и гибридные породы (магматизированные и мигматизированные роговики) – габбро-нориты, нориты, кварцевые нориты, кордиеритовые нориты; габбро-диориты, кварцевые габбро-диориты, гранофировые габбро-диориты.

По данным ведущих исследователей Норильских месторождений, породившие их магматические системы имели глубинный мантийный источник [11, 27, 32, 56, 65, 66, 75, 76].

Детальные исследования геохимии вулканических траппов показали достаточно монотонную картину для всех свит, кроме нижней части надеждынской свиты, которая сложена лейкобазальтами с резко пониженным содержанием Mg, Cr, Ni, Cu, S, Pd, Pt, Au и заметно повышенным содержанием REE, U, Ba, Rb [65]. Был сделан вывод, что при контаминации расплавов платобазальтов низов надеждынской свиты веществом земной коры возникли лейкобазальты и комплементарные им расплавы, обогащённые оливином, хромшпинелидом, сульфидами Fe-Ni-Cu, Pd,

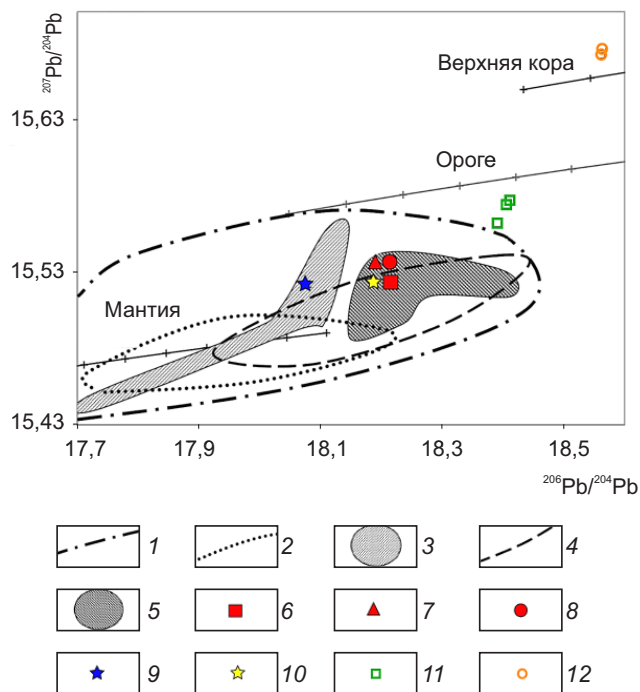


Рис. 3. Изотопный состав свинца трапповой формации Норильского региона:

1 – базальты [65, 76]; 2 – габбро-долериты Норильских интрузивов [65, 76]; 3 – сульфидные руды Норильского рудного узла [76]; 4 – габбро-долериты Талнахского и Хараелахского интрузивов [65, 76]; 5 – сульфидные руды Талнахского рудного узла [76]; 6 – магматический PbSss, Талнах [46]; 7 – пневматолитовый галенит, Талнах [46]; 8 – пневматолитовый алтаит, Талнах [46]; 9 – звягинцевит и атоцит, Норильск [46]; 10 – полярит и плюмбопалладинит, Талнах [46]; 11 – галенит из арсенидно-карбонатных жил, Талнах [71]; 12 – галенит из уранинит-серебро-арсенидно-карбонатных жил, Талнах [71]; линии эволюции изотопного состава Pb в мантии и коре, по [18]

Pt, Au, то есть исходные магмы рудоносных интрузивов норильского типа. По оценке А. Дж. Налдретта [66], этот процесс с лихвой обеспечивал ресурсы Pd, Pt, Au Норильского рудного поля. Скрупулёзные подсчёты реального площадного распространения лейкобазальтов надеждиной свиты с дефицитом Mg, Cr, Ni, Pd, Pt, выполненные Н. А. Криволицкой, показали гораздо более скромный масштаб таких лейкобазальтов; возникло сомнение в оценке А. Налдретта [28, 29].

Судя по изотопии свинца (рис. 3), все образования трапповой формации Норильского региона имели единый мантийный источник. Мантийные магмы трапповой формации были в заметной степени контаминированы веществом континентальной коры, что коррелируется с данными по геохимии широкого круга химических элементов [65, 66, 76]. Изотопный состав Pb рудоносных интрузивов и магматических сульфидных руд Норильского и Талнахского рудных узлов в значительной степени различается – в Талнахском Pb заметно более радиогенный [43, 46].

Установлен очень узкий диапазон вариаций изотопного состава Pb магматического PbSss и пневматолитовых галенита и алтаита Талнаха, практически такой же, как в пневматолитовых плюмбопалладините и полярите Талнаха [46]. Изотопный состав Pb пневматолитовых звягинцевита и атокита Норильска существенно отличен от талнахского и находится в поле состава Pb норильских руд [46]. Это свидетельствует о генетических связях сульфидных руд с конкретными интрузивами, о различных мантийных промежуточных очагах для Норильского и Талнахского рудных узлов, о более высокой степени контаминации мантийных магм Талнаха, чем и обусловлен его гигантский масштаб [43].

О реальности существования сульфидных расплавов

По наблюдениям Е. Н. Сухановой и М. Н. Годлевского, вдоль сульфидных жил месторождения Норильск-I, секущих пласты углей, угли превращены в кокс [15, 53]. В рудниках Медвежий Ручей, Заполярный, Маяк, Комсомольский, Скалистый вдоль контактов сульфидных жил с углями развиты оторочки апоугольного графита (рис. 4). У контактов сульфидных жил, залегающих в роговиках по песчаникам и алевролитам аркозового состава, развиты палингенные гранофиры и аплитовидные породы гранитного состава [11, 15, 24, 30]. По расплавленным включениям в кварце этих гранофиров получена оценка температур их формирования 950–920 °С. Всё это – свидетельства реального существования высокотемпературных сульфидных расплавов.



Рис. 4. Рудник Скалистый, гор. -800 м. Фото автора:

сульфидный расплав механически активно внедрился в угли тунгусской серии; часть пласта угля с оторочкой апоугольного графита почти оторвана сульфидным расплавом от горизонта углей

Источники и генезис рудоносных сульфидных расплавов

Многие геологи, изучавшие норильские руды, считают, что исходные для них сульфидные расплавы – продукт ликвации силикатных магм рудоносных интрузивов [8, 11, 12, 27, 30, 36 и др.]. Иное мнение – сульфидные расплавы мантийные, внедрённые совместно с силикатными расплавами [51, 52, 54, 66 и др.]. В обоих вариантах оставалось непонятым различие изотопного состава серы и содержаний благородных металлов во вкрапленных рудах «пикритового горизонта» и в сплошных рудах сульфидных залежей. Руды залежей примерно в 1,5 раза беднее благородными металлами, а сера слагающих их сульфидов более тяжёлая, квазиангидритовая. Чтобы разрешить эти противоречия пытались привлечь гипотезу ассимиляции ангидрита силикатными расплавами рудоносных интрузивов. Но, как известно, ангидрит не растворяется в силикатных расплавах. Некоторые западные учёные «открыли» наличие магматического ангидрита в Норильских месторождениях [62], приняв за магматический ангидрит гидротермальных пирротиновых жил; на этом основана новая гипотеза генезиса норильских руд [64].

Возможное решение проблемы видится следующим образом. Рудоносные интрузивы метаморфизовали угли тунгусской серии до графита; угли тунгусской серии содержат 25–38% летучих веществ, интенсивно графитизированные (до 300 м от контакта

с интрузивами) – 4–10% летучих веществ [15]. При этом возникло огромное количество высокотемпературных восстановленных газов (CH_4 , H_2 , CO и др.). Как предполагал М. Н. Годлевский, эти газы активно взаимодействовали с ангидритом толщ палеозоя. При сульфатредукции возникли газы с S , H_2S , SO_2 , COS , изотопный состав серы в них ангидритовый, богат ^{34}S . Попадая в остывающие, сокращающиеся в объёме горячие интрузивы и роговики, такие газы интенсивно взаимодействовали с железосодержащими минералами. Прошли процессы сульфуризации, сформировались тонкая вкрапленность сульфидов в интрузивных породах и роговиках и вторичные сульфидные расплавы [23], которые смешались с глубинными мантийными сульфидными расплавами, заметно разбавили их, при этом изотопный состав серы сульфидных залежей стал заметно более тяжёлым, квазиангидритовым [43]. Это отчасти объясняет огромное количество сульфидных расплавов в Норильском рудном поле и утяжелённый квазиангидритовый изотопный состав серы сульфидных залежей [14, 63], а также пониженное содержание в них же благородных металлов в сравнении с рудами – капельниками, повышенное содержание в сидеронитовых и массивных рудах радиогенного (корового) Os . Данные по геохимии летучего Re свидетельствуют, что система интрузив–сульфидные залежи имела закрытый характер [75].

О механическом взаимодействии сульфидоносных интрузивов и рамы интрузивов

Уточнённая модель формирования рудоносных интрузивов норильского типа учитывает механическое взаимодействие сульфидоносных мантийных расплавов и рамы интрузивов, прежде всего, механическую нагрузку [44]. Из-за неравномерной нагрузки вышележащих толщ на кровлю Хараелахского, Талнахского (Вехнеталнахского) и Норильского интрузивов значительная часть сульфидных расплавов была выжата из тыловой и промежуточной частей тридцатикилометровой ленты интрузивов в их головную часть, расположенную гипсометрически выше, где нагрузка вышележащих толщ была значительно меньше. Ярко это фиксировано в форме Хараелахского интрузива с его наиболее мощной и широкой головной частью субширотного простирания, размещённой на выходе из-под Хараелахской брахисинклинали, сложенной многокилометровой толщей платобазальтов. Именно к этой головной части Таймырского интрузива приурочена гигантская самая крупная в мире Главная Хараелахская залежь магматических сульфидных руд субширотного простирания. Более легкоплавкие поздние дифференциаты – Ni-Fe-Cu сульфидные расплавы с высокой концентрацией Pd , Pt ,

Au , Ag – были выжаты во фронтальную часть интрузивов почти целиком, частично и далее за пределы интрузивов [44]. Этим прежде всего и объясняется непропорционально большая мощность сульфидных залежей в головных частях интрузивов при скромной мощности самих интрузивов. Сульфидные расплавы Талнахского рудного узла выжимались вдоль зоны Главного Норильско-Хараелахского разлома, от которого расходились отдельными струями, формируя многочисленные залежи сплошных и жильных руд. Эффективный способ выявления таких струй и, соответственно, поиска новых рудных тел разработал В. А. Радько [38]. Иногда сульфидные расплавы были выжаты и за пределы ореола контактового метаморфизма, это – богатые Pd жилы тонкозернистых медистых руд рудника Морозова на северном склоне горы Рудной (месторождение Норильск-1).

Текстуры сульфидных агрегатов рудных жил и залежей

В большинстве случаев текстуры сульфидных агрегатов массивные, так как кристаллизация происходила одновременно из множества центров. В крупных и гигантских сульфидных телах и в отходящих от них жилах размер кристаллов сульфидных твёрдых растворов Mss составляет от 3–5 до 30–40 см,

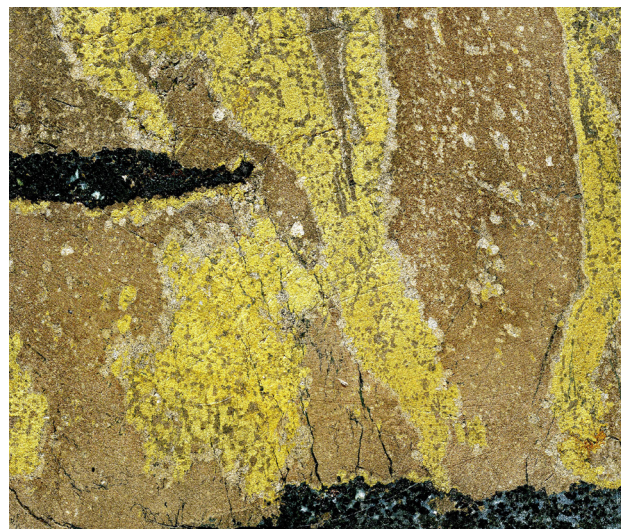


Рис. 5. Рудник Медвежий Ручей, Норильск-1. Коллекция и фото автора:

кристаллы – вкрапленники Mss_2 (коричневатые), ориентированные перпендикулярно нижней стенке пологой жилы в оливиновых габбро-долеритах, вокруг вкрапленников светлая оторочка из переотложенного «распадного» пентландита; матрица – агрегат кристаллов Iss . 106 × 89 мм

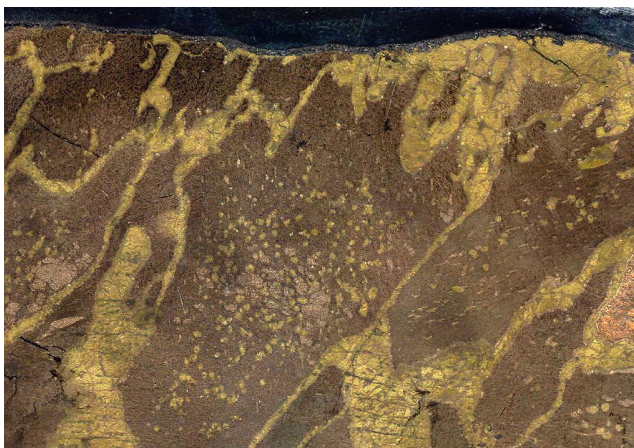


Рис. 6. Сульфидная жила. Рудник Комсомольский, гор. -480 м.
Коллекция и фото автора:

кристаллы – вкрапленники Mss_2 (коричневатые) ориентированы с наклоном направо (реально на северо-восток) навстречу движению сульфидного расплава; матрица – агрегат кристаллов Iss . 129 × 119 мм. Пологая жила в роговиках

изредка превышает 1 м, это крупно- и гигантокристаллические агрегаты. Таковы кристаллы Mss сульфидных жил, оперяющих Главную Хараелахскую залежь на средних горизонтах западного фланга рудника Комсомольский. Во вкрапленных рудах размер кристаллов Mss в каплях обычно <15 мм. В маломощных сульфидных жилах рудника Морозова, расплав которых выжат из интрузива Норильск-I на сотни метров – за пределы ореола контактового метаморфизма, размер кристаллов Mss не превышает 1,5 мм. Тем не менее мелкие кристаллики Mss испытали распад на халькопирит, пентландит и подчинённый пирротин.

В пологозалегающих сульфидных жилах иногда проявлены текстуры ориентированного роста кристаллов: из застойного расплава – перпендикулярно подложке (рис. 5), из движущегося расплава – с отклонением навстречу течения сульфидного расплава (рис. 6). Это из наблюдений сульфидных жил рудника Комсомольский, где направление течения сульфидного расплава было от Главного Норильско-Хараелахского разлома на юго-запад.

О взаимодействии рудоносных сульфидных расплавов с окружающими породами

Сульфидные расплавы не равновесны с силикатными породами. Вдоль контактов их тел от мелких капель и жил магматических сульфидов до гигантских залежей развиты ореолы замещения минералов магматических пород и роговиков магнетитом,

титаномагнетитом, сульфидами, Ti биотитом, фаялитом, амфиболами, $K-Na$ полевым шпатом и др. При этом сами минералы магматических и контактово-метаморфических пород совершенно свежие, включая такие малостойкие, как оливин, монтичеллит, ромбические пироксены, биотит [8, 22, 24, 25, 44, 48, 49]. Все крупные залежи магматических сульфидов содержат «объедки» габброидов и роговиков и продукты их замещения, чаще представленные кучными скоплениями реакционного магнетита, когда преобладал сульфидный расплав, или титаномагнетита, когда преобладали габбро-долериты [8].

Наиболее широко в ореолах флюидного воздействия распространён флогопит – биотит, который содержит TiO_2 от 11 до 3–4 мас.%, что отвечает температуре кристаллизации до 1150 °С. Количество метакристаллов новообразованного крупнопластинчатого биотита над Главной Хараелахской сульфидной залежью в роговиках местами достигает 30% их объёма, в приконтактных габбро-долеритах – до 20%. Таким образом, прошёл существенный привнос калия и, соответственно, вынос натрия. Возможно, что описанные Д. М. Туровцевым [54] альбититы в экзоконтактных ореолах рудоносных интрузивов порождены околорудной биотитизацией.

В ряде ореолов флюидного воздействия место биотита занимают амфиболы – эденит, ферроэденит, $Sl-K$ гастингсит, которые интенсивно замещали пироксены габбро-долеритов, и санидиноподобный $K-Na$ полевой шпат, замещавший лабрадор.

На месторождении Норильск-I известны руды с «миндалекаменной» текстурой, развитые там, где интрузив внедрился в базальты ивакинской свиты с обильными газовыми пустотами. При застывании и сокращении в объёме интрузива сульфидные расплавы были из него в заметной степени выжаты. Часть их мигрировала в породы рамы и по сети тонких <0,05 мм трещин инжецировала вмещающие базальты. Возникли серии малых отливок сульфидных расплавов в газовых пустотах базальтов с поперечником 1–23, обычно 4–6 мм. Вдоль путей миграции сульфидных расплавов и вокруг сульфидных отливок базальты преобразованы на расстоянии 1–15, обычно 2–4 мм (рис. 7). Реакционные – фаялит, феррогортонолит (рис. 8), феррогиперстен, ферропихонит, высокотитанистые флогопит, анортит, санидин – развиты вдоль путей миграции сульфидных расплавов, вокруг и в сульфидных отливках. Минералы титанавитовых базальтов с обилием Fe^{3+} замещены силикатами и оксидами с обилием Fe^{2+} , то есть процесс прошёл при участии восстановленных флюидов. Оценки температур образования реакционных фаялита, феррогиперстена, ульвошпинели, флогопита-биотита – от 1150 до 780 °С.

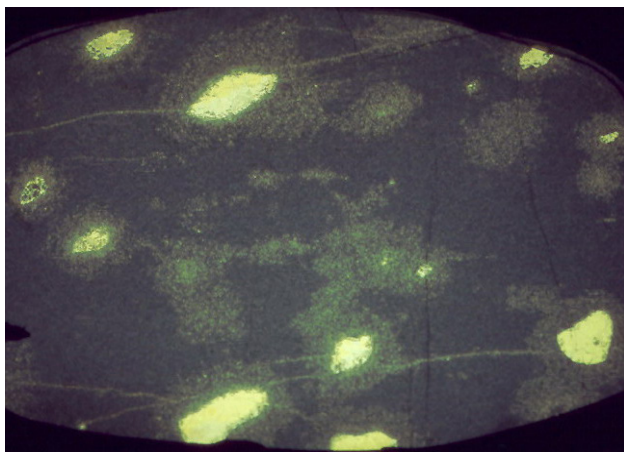


Рис. 7. «Миндалекаменные» руды. Карьер Медвежий Ручей. Месторождение Норильск-I. Коллекция Э. А. Кулагова. Фото автора:

газовые пустоты в титанавгитовых базальтах ивакинской свиты заполнены сульфидным расплавом, который попал в них по сети микротрещин, вдоль которых базальты изменены и импренированы сульфидами. 60 мм

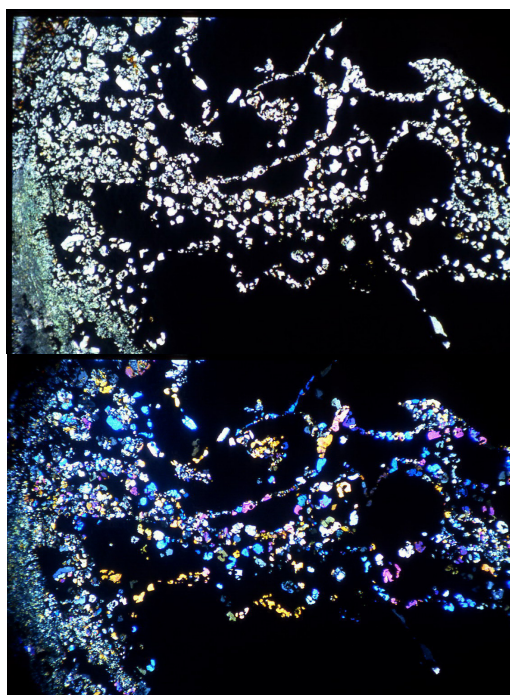


Рис. 8. Продукт взаимодействия сульфидного расплава и титанавгитовых базальтов ивакинской свиты. Карьер Медвежий Ручей. Месторождение Норильск I. Фото автора:

реакционный железистый оливин – феррогортонолит на контакте и внутри сульфидной миниотливки. В проходящем свете, сверху при 1 николе, снизу – николи х. Поле зрения 5 мм

Эволюция – кристаллизационная дифференциация рудоносных сульфидных расплавов. Норильские руды – царство сульфидных твёрдых растворов

Как и в любых магмах, в сульфидных расплавах проходят процессы кристаллизационной дифференциации. В знаменитой статье 1927 г. в «Economic Geology» И. Фогт показал, что кристаллизация природных сульфидных расплавов идёт стандартно: в начале кристаллизуются Fe и Fe-Ni сульфиды (гексагональные, в дальнейшем названные Mss), которые бедны платиновыми металлами; позже кристаллизуются Fe-Cu и Fe-Cu-Ni сульфиды (кубические, в дальнейшем названные Iss), которые обогащены платиновыми металлами и золотом [74]. В норильских рудах такой тренд установил М. Н. Годлевский [11, 12].

По образному выражению М. Н. Годлевского, норильские руды – царство сульфидных твёрдых растворов (пирротин-пентландит, кубанит-халькопирит, халькопирит-пентландит) [11, 12, 16]. Позднее были установлены троилит и галнахит [5, 8, 30], моихукит и путоранит [8, 35, 43, 48, 55].

Тренд кристаллизационной дифференциации сульфидных расплавов обычный, с истощением Fe и накоплением Cu: Mss_1 ($T_{крис.} \sim 1190-1150$ °С, состав близкий к пирротину или троилиту с отклонением к пентландиту), Mss_2 ($T_{крис.} \sim 1100$ °С, состав заметно более медистый, с отклонением к кубаниту или халькопириту), Iss_1 ($T_{крис.} \sim 1000-950$ °С, состав промежуточный между троилитом, кубанитом и пентландитом), Iss_2 (состав промежуточный между кубанитом, халькопиритом и пентландитом), Iss_3 и Iss_4 (состав промежуточный между халькопиритом, кубанитом и пентландитом), Iss_5 ($T_{крис.} \sim 760$ °С, состав промежуточный между халькопиритом и пентландитом). Этим обусловлено зональное строение сульфидных тел от малых капель до крупных залежей [8, 11, 12, 25, 30, 32, 43, 44, 51, 52, 55, 66 и др.]. Ni и Co примерно в равной степени распределены во всех типах сульфидных твёрдых растворов. Состав тех и других близок к MeS.

В крупных сульфидных залежах и в мощных сульфидных жилах, отходящих от этих залежей, то есть при кристаллизации в условиях повышенных температур, состав кристаллов Mss более сернистый, приближающийся к Fe_7S_8 . Массовая кристаллизация Mss такого состава привела к тому, что поздние дифференциаты обеднены серой и из них кристаллизовались сульфидные твёрдые растворы Iss_{1-5} , недосыщенные серой [43, 44, 48].

На любой стадии кристаллизации сульфидных расплавов происходила сепарация кристаллов и остаточного расплава. В результате возникли руды,



Рис. 9. Вкрапленные руды – капельники. Талнахский рудный узел. Скв. РТ-2, глуб. 1442 м. Фото Н. Н. Жукова:

низы сульфидных капель слагают кристаллы Mss_2 , верхи – агрегаты кристаллов Iss

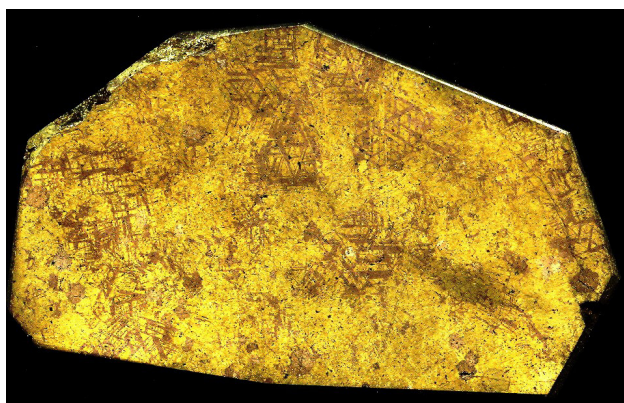


Рис. 10. Сплошные сульфидные руды. Рудник Октябрьский, гор. -530 м. Коллекция и фото автора:

Несколько корродированные вкрапленники («острова») Iss_4 в матрице кристаллов Iss_5 . Iss_4 испытал полиморфный переход кубический→тетрагональный и распад на халькопирит (матрица) и кубанит (ламелли). Iss_5 испытал полиморфный переход кубический→тетрагональный. Из обоих выделился пентландит. 86 × 55 мм

сложенные кристаллами Mss_1 , Mss_1 и Mss_2 , Mss и Iss (рис. 9). Нередко агрегаты Mss пересечены жилками позднего медистого сульфидного расплава. При кристаллизации медистого сульфидного расплава возникли руды, сложенные кристаллами Iss_1 , Iss_2 , Iss_3 , Iss_4 , Iss_4 и Iss_5 (рис. 10), Iss_5 (рис. 11).

Перед завершением кристаллизации крупных тел Fe-Cu-Ni сульфидных расплавов, залегающих среди роговиков под интрузивами, при общем сокращении объёмов произошло выжимание остаточных существенно медистых расплавов, обогащённых благородными металлами, в прилегающие роговики. Частично это были инъекции, большей частью – импреньяции. Возникли импреньяционные, так называемые «медистые руды» (рис. 12).



Рис. 11. Сплошные сульфидные руды. Рудник Маяк, гор. -330 м. Коллекция и фото автора:

агрегат крупных кристаллов Iss_5 ; Iss_5 испытал полиморфный переход кубический→тетрагональный и распад на халькопирит (матрица) и пентландит (скелетные кристаллы). 140 × 86 мм

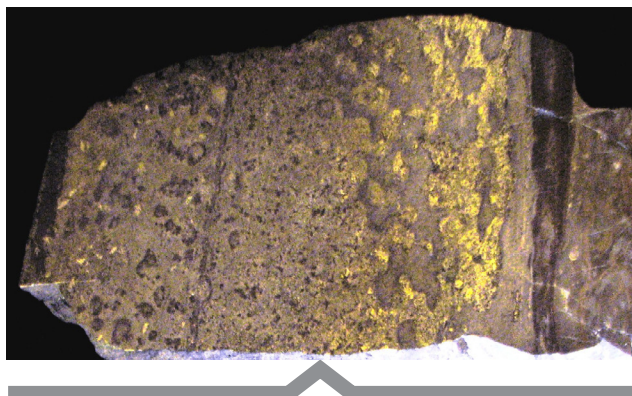


Рис. 12. Импреньяционные «медистые руды». Рудник Таймырский. Рудное тело – 1400 м. Коллекция В. В. Бутенко, фото автора:

приконтактные роговики, пропитанные медистым расплавом. 180 мм

Графические руды – продукты кристаллизации поздних Pb-Cu-Fe-Ni-S расплавов

Уникальная особенность Норильских месторождений – наличие эвтектических руд, сложенных графическими сростаниями $PbSs_3-Iss_{3-5}$, продуктами кристаллизации поздних легкоплавких ($T_{крст.} \sim 550^\circ C$)



Рис. 13. Фрагмент жилы графических руд. Октябрьский рудник, гор. -630 м. Коллекция и фото автора:

графические руды – сростания кристаллов $PbSs_3$, превращённого в галенит (ламелли) и алтаит (мельчайшие тельца распада), и Iss_5 , превращённый в халькопирит (матрица) и пентландит (тельца распада). 47 × 47 мм

сульфидных Pb-Fe-Cu-Ni расплавов. Сульфидные руды – эвтектические сростания слагают гнёзда размером от первых до 15–30 см и секущие жилы нескольких поколений мощностью от 2–3 до 150 см (в исключительных случаях до 3 м) и длиной до 3–15 м в различных частях залежей массивных существенно медистых сульфидных руд (преимущественно в их кровле) в интрузивных породах, а также в роговиках, которые эти руды окружают. Наиболее многочисленны такие гнёзда и жилы в верхней части Главной Хараелахской сульфидной залежи (рис. 13). Причина их появления – обилие К и когерентного Pb в норильских рудно-магматических системах [43].

Графические руды уникально богаты Pd, Pt, Ag, Au, содержат в среднем и (до): Pd – 1200 г/т (5300), Pt – 540 г/т (6120), Ag – 1220 г/т (2990), Au – 17 г/т (88) [44, 49]. Гнёзда и жилы этих руд и непосредственно окружающие их агрегаты сульфидов Cu-Fe-Ni содержат обильную минерализацию Pd, Pt, Ag, Au, включая скопления сперрилита до 45 см.

Субсолидусные твёрдофазные превращения сульфидных твёрдых растворов

При субсолидусных превращениях Mss_3 , слагающий нижние части сульфидных капель, превратился в матрицу железистого пирротина с пластинчатыми ламеллами пентландита и тонкими «змеевидными» ламеллами троилита (рис. 14). Iss_3 , слагающий верхние части сульфидных капель, распался на железистый пирротин и решётчатые сростания халькопирита и кубанита (рис. 15).

При субсолидусных превращениях бедный серой Iss_1 превратился в сростания троилита и (или) железистого пирротина и кубанита с пентландитом. Обогащённый серой Iss_1 превратился в сростания преобладающего магнитного моноклинного пирротина и халькопирита с пентландитом. При субсолидусных превращениях бедный серой Iss_2 превратился в агрегаты кубанита (\pm халькопирит) с включениями пентландита. Обогащённый серой Iss_2 трансформировался в сростания примерно равных количеств пирротина и халькопирита с включениями пентландита. При субсолидусных превращениях Iss_3 и Iss_4 превратились в пластинчатые сростания кубанита и халькопирита с включениями пентландита. При субсолидусных превращениях Iss_5 превратился в агрегаты двойникованных кристаллов халькопирита с включениями скелетного пентландита. Описанная картина характерна для большинства сульфидных жил и залежей рудного поля. В некоторых других, включая Главную Хараелахскую сульфидную залежь, картина более сложная. В низах этих залежей – масса обогащённых серой Mss_1 и Mss_2 , которые распались на магнитный сернистый пирротин (матрица)

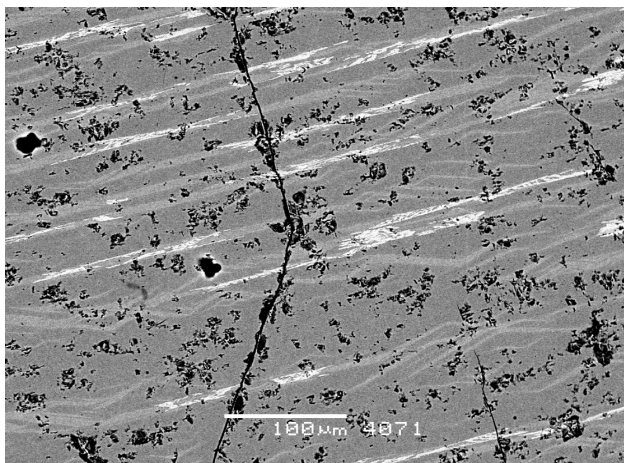


Рис. 14. Вкрапленные руды – «капельники» в плагиоперидотитах Талнахского интрузива. Коллекция В. К. Степанова:

низы сульфидной капли. Продукты субсолидусных превращений сульфидного твёрдого раствора Mss_1 : железистый пирротин (матрица), пентландит (светлые ламелли), троилит (сероватые змеевидные ламелли). В отражённых электронах

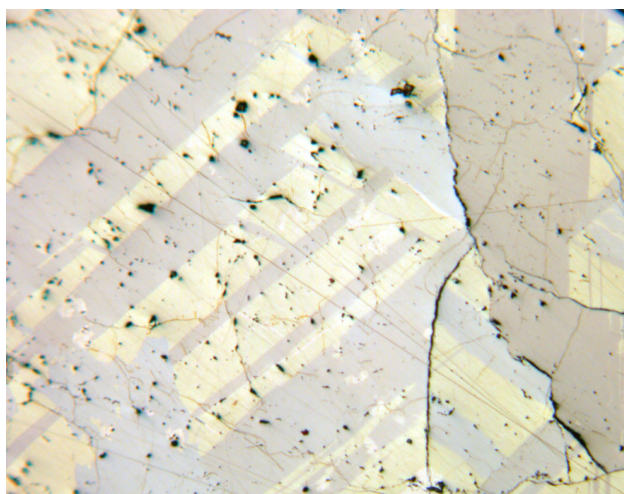


Рис. 15. Вкрапленные руды – «капельники» в плагиоперидотитах Талнахского интрузива. Коллекция В. К. Степанова:

верхи сульфидной капли. Продукты субсолидусных превращений сульфидного твёрдого раствора Iss : железистый пирротин (коричневатый) и решётчатые сростания кубанита (сероватый) и халькопирита. В отражённом свете при 1 никеле

и ламелли пентландита и с тельцами халькопирита в Mss_2 . Поэтому среди поздних продуктов кристаллизации сульфидных расплавов в этих залежах обильны минералы группы халькопирита, недосы-

щенные серой – талнахит $Cu_{18}Fe_{16}S_{32}$ [5, 30], моихукит $Cu_{18}Fe_{18}S_{32}$ [35, 55] и путоранит $Cu_{17}(Fe, Ni)_{18}S_{32}$ [48, 55]. Картина минеральной зональности в этом случае довольно сложная.

Iss эвтектических руд испытал распад на халькопирит + пентландит ± кубанит, халькопирит + талнахит + пентландит ± кубанит, редко на халькопирит + + моихукит + пентландит или путоранит + моихукит. $PbSss$ эвтектических руд испытал распад на галенит $Pb(S_{Te})$ и алтаит $Pb(Fe, S)$. Оценки температуры распада по соотношению серы и теллура в галените и алтаите и по содержанию в них селена от 507 до 420 °С, чаще – 490–470 °С [26]. Это верхний предел температуры образования минералов Pd и Pt, которые замещали структуры распада $PbSss$.

Флюидная дифференциация рудоносных сульфидных расплавов

Сульфидные расплавы рудоносных интрузивов были богаты флюидами. Около каждого тела магматических сульфидов от миниотливок до гигантских тел развиты ореолы флюидного воздействия. Масштаб флюидных ореолов коррелирован с размером тел магматических сульфидов: около миниотливок – до 4 мм, около капель – до 12 мм, около огромной Главной Хараелахской залежи сплошных руд – до 15–20 м [43]. Ореолы флюидного воздействия слагают высокотитанистые биотит и флогопит, гидроксилфторхлорапатит и хлорапатит, гидроксилхлорфторапатит и фторапатит, гастингсит, эденит, ангидрит, титаномагнетит, ильменит с ламеллями бадделеита, щелочные хлорсодержащие сульфиды – джерфишерит и бартонит [8, 11, 45, 70 и др.]. По данным ГРО рудника Комсомол, над центральной частью Хараелахской сульфидной залежи на расстоянии до 15 м от её верхнего контакта любые типы пород содержат в 1,5–2 раза больше Pd, Pt, Au, чем аналогичные породы, расположенные на этом же уровне в стороне. Это результат флюидного воздействия кристаллизующегося сульфидного расплава.

Судя по существенно гидроксильному составу тёмных слюд и амфиболов, вначале в составе флюидов преобладал водяной пар. Благодаря обилию калия практически вся масса водяного пара была связана в биотите, заметная часть в гастингситах и эдените. Далее, судя по эволюции состава пневматолитового апатита, на первое место во флюидах вышел хлор, в дальнейшем – фтор, а также восстановленные газы – монооксид углерода, углеводороды, возможно, и фуллерены и др. Это и обусловило специфический состав минералов благородных металлов, которые возникли при флюидной переработке платиноид- и сербросодержащих сульфидных твёрдых растворов – продуктов кристаллизации сульфидных расплавов

рудоносных интрузивов. Среди них – интерметаллиды системы Pt-Fe, станниды, висмутиды, плюмбиды, куприды, теллуриды и арсениды Pd-Pt, палладогерманид, минералы Au-Ag, Au-Ag-Cu, гессит, а также алтаит [2, 8, 19, 30, 43, 44, 48, 49, 61, 70, 71].

Минерализация благородных металлов первичных норильских сульфидных руд

Благородные металлы первоначально были растворены в сульфидных расплавах, при кристаллизации которых произошла их селекция, так как Ru, Rh, Os, Ir – это Mss-совместимые металлы, а Pt, Pd, Ag, Au – это Iss-совместимые металлы. По этой причине руды, сложенные в основном Mss, – руды существенно пирротинового состава, содержат заметные количества Rh (до 20 г/т), Os, Ru и первые г/т Pd, Pt, Ag. Руды, сложенные Iss, – существенно медистые, богатые кубанитом и минералами группы халькопирита, бедны Rh, Os, Ru, содержат десятки–первые сотни г/т Pd, Pt, Ag и от первых до десятков г/т Au. Уникальные концентрации благородных металлов и их минералов содержат графические руды – эвтектические сростания PbSss, Iss₃₋₅ и медистые сульфидные руды в экзоконтактах жил графических руд; содержание Pd, Pt, Ag в них достигает многих кг/т, Au – сотни г/т [44, 49].

Несмотря на то, что изучению Ag-Au-Pt-Pd минерализации посвящены многочисленные исследования [2, 8, 11, 12, 16, 19, 20, 25, 26, 30, 34, 40, 42–44, 46, 48–50, 61, 66, 70, 71 и др.], мы только начинаем понимать реальную, весьма непростую картину и длительную историю формирования минералов благородных металлов в норильских рудах. Преобладающее количество Rh, Ru, Os, Ir рассеяно в минералах группы пирротина и в пентландите [66]. Основная масса Pd, Pt, Au, Ag в норильских рудах представлена собственными минералами, часто микронного размера [25, 34, 43, 44, 48]. Заметная часть Pd и Ag рассеяна в пентландите, Ag – в кубаните и халькопирите [30]. Минералы благородных металлов примерно однотипны во всех разновидностях руд – от пирротиновых до кубанитовых, халькопиритовых, талнахитовых, моихукитовых, путоранитовых, заметно меняются лишь их содержание и количественные соотношения [25, 34, 43, 49].

Все типы минералов платиновых металлов и Au-Ag слагают метасоматические образования, метакристаллы, гнёзда, простые и сложные, ветвящиеся прожилки, замещают все типы магматогенных сульфидов и продукты их субсолидусных превращений (рис. 16).

Ареалы распространения минералов благородных металлов шире контуров сульфидных залежей и со-

впадают с ореолами воздействия флюидов, выделившихся при кристаллизации сульфидных расплавов. Среди этих образований в 6 метрах выше кровли Главной Хараелахской сульфидной залежи в роговиках без сульфидов в гнезде амфибола и Ti биотита находился кристалл сперрилита длиной 8 мм (рудник Октябрьский, горизонт -530 м) [43]. В мандельштейновых рудах Норильска-I над сульфидными миниотливками в силикатной матрице титанавгитовых базальтов вне сульфидов развиты многочисленные мельчайшие метакристаллы тетраферроплатины, атокита, рустенбургита, майчнерита, электрума, маякита, полярита, паоловита, котульскита и др. [42, 43, 44].

В верхней приконтактной части Главной Хараелахской сульфидной залежи крупнокристаллические пентландит-халькопирит-талнахитовые руды с гнёздами эвтектических руд с галенитом (рудник Октябрьский, горизонт -800 м) содержат метакристаллы соболевскита Pd (Bi, Te), окружённые каймами

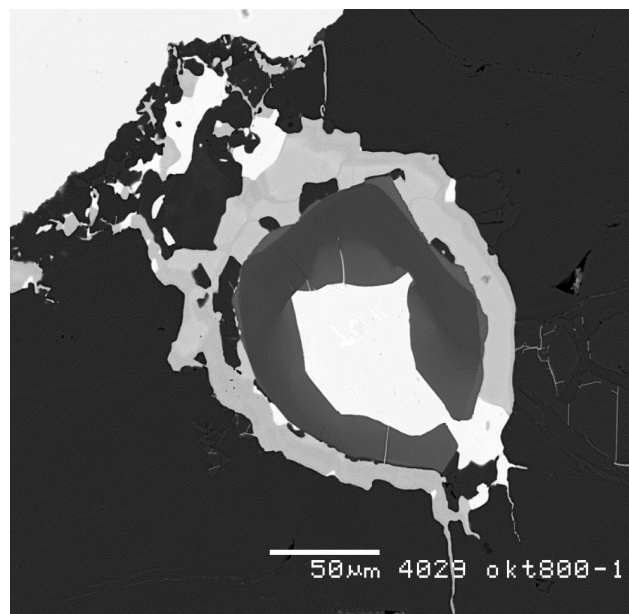


Рис. 16. Сплошные сульфидные руды у кровли Главной Хараелахской сульфидной залежи. Рудник Октябрьский, гор. -710 м. Коллекция С. Н. Белякова:

метакристаллы соболевскита (белые) около контакта галенита (светлый слева вверху) и талнахитовой матрицы (чёрная). Центральный метакристалл соболевскита окружён зональной каймой джерфишерита и талфенисита. На джерфишерит – талфенисит нарос электрум (светло-серый). Электрум также выполняет сеть тонких трещин в талнахите. В отражённых электронах

хлорсодержащих щелочных сульфидов, богатых калием и таллием – джерфишерита $K_6(Fe, Cu, Ni)_{24}S_{26}Cl$ – талфенисита $Tl_6(Fe, Cu, Ni)_{24}S_{26}Cl$ (см. рис. 16). Это прямое доказательство пневматолитового генезиса минералов палладия в норильских сульфидных рудах.

Итак, генезис минералов благородных металлов в норильских рудах – пневматолитовый [43, 44, 49]. При их формировании Pt, Au, Sn, Te, As, Sb, Bi и часть Pd и Ag привнесены флюидами, возникшими при кристаллизации сульфидных расплавов. Cu, Pb, Fe, Ni и часть Pd и Ag заимствованы из сульфидов рудных тел (так, маякит $PdNiAs$ и меньшиковит $Pd_3Ni_2As_3$ заместили пентландит, звягинцевит Pd_3Pb и плюмбопалладинит Pd_3Pb_3 – галенит). Пневматолитовые минералы Pd и Pt представлены интерметаллидами. Это станниды, висмутиды, плюмбиды, куприды и близкие теллуриды, арсениды, антимониды. Поскольку норильские руды – крупнейшее скопление палладия в Мире, постольку они содержат множество его минералов. Сульфидов среди них нет. С ними ассоциируют минералы Au-Cu и Au-Ag. Распределены минералы благородных металлов крайне неравномерно. В одних участках руд преобладают теллуриды Pd (соболевскит и др.), в других – станниды Pd (паоловит или атокит и др.) и Pt (нигглиит), в третьих – арсениды Pd (маякит и др.) и Pt (сперрилит), в четвёртых – висмутиды Pd (фрудит) и Pt (инсизваит), в пятых – антимониды Pd (стибиопалладинит, котульскит) и Pt (геверсит), в шестых – плюмбиды Pd (полярит, звягинцевит), в седьмых – минералы Pt-Fe и др. Размер таких участков от первых мм до метров. Наиболее характерны полиминеральные сростания минералов Pd-Pt-Au-Ag. Размер таких сростаний достигает 2–3 см. С минералами благородных металлов ассоциируют метасомы алтаита размером до 11 см.

Условия образования пневматолитовых минералов благородных металлов норильских руд: верхний предел 490 °C (температура распада $PbSss$); две стадии формирования: 1) при кристаллизации сульфидных расплавов захват благородных металлов в сульфидные твёрдые растворы; 2) флюидная переработка Mss , Iss , $PbSss$ и кристаллизация минералов Pd, Pt, Au, Ag в резко восстановительных условиях при $T \approx 450\text{--}350$ °C, при крайне низкой фугитивности сульфидной серы; судя по ассоциации многих минералов Pd-Pt с тетраурикупридом, температура их образования ниже 390–385 °C – это верхний предел устойчивости тетраурикуприда [67]. Возможно, что транспорт благородных металлов происходил в форме карбониллов, весьма устойчивых при повышенных температурах [3]. Об участии в процессах рудогенеза углеродистых соединений «угольного» проис-

хождения свидетельствует присутствие в норильских рудах палладогерманида Pd_2Ge [61] и когенита Fe_3C [8], сходство изотопного состава углерода в норильских рудах и углях тунгусской серии норильского региона [68].

О реальной длительности формирования норильских рудно-магматических систем

Редкий случай, когда возраст рудных образований строго определён. Изотопный U-Pb возраст по циркону и бадделеиту рудоносных габбро-долеритов – $251,2 \pm 0,3$ Ма [60]. Практически те же датировки получены Rb/Sr и Ag/Ag методом по плагиоклазу и биотиту пород рудоносных интрузивов и Re/Os методом по сульфидным рудам [58]. Этот возраст соответствует границе пермского и триасового периодов, установленной по морской фауне в стратотипе Мейшань в Южном Китае, для которой получена изотопная датировка – $251,2 \pm 0,3$ Ма [57]. В северо-восточной части Восточно-Сибирской платформы развиты траппы, аналогичные норильским, U-Pb возраст которых по циркону и бадделеиту – $251,7 \pm 0,5$ Ма [59], и более молодые щелочные базальтоиды и ультраосновные-щелочные породы Маймеча-Котуйской провинции, U-Pb возраст которых по циркону и бадделеиту и U-Th-Pb возраст по перовскиту – $250,2 \pm 0,3$ Ма [59]. Одни из характерных магматических образований Маймеча-Котуйской провинции – дайки щелочных лампрофиров, в их числе арфведсонит-флогопитовые минетты лампроитовой серии, богатые высокостронциевым апатитом. Точно такие же дайки в Норильском рудном поле в руднике Заполярном пересекли рудоносный интрузив и магматические сульфидные руды [45]. Таким образом, реальная длительность формирования рудно-магматических систем Норильского рудного поля не превышает 1,5 Ма.

Возможная импактная инициация гигантской Сибирской трапповой формации и уникальных Норильских месторождений

По представлениям ведущих петрологов [56 и др.], сибирская трапповая формация порождена суперплюмом – мощным потоком вещества и энергии – примерно от границы жидкого ядра Земли к её поверхности. Возраст сибирской трапповой формации точно отвечает границе пермского и триасового периодов – 251 ± 1 Ма. Именно в это время произошла одна из самых крупных экологических катастроф на Земле – вымерло более 70% всей биоты того времени. Считалось, что причиной этой экологической катастрофы были грандиозные извержения сибирских платобазальтов с колоссальным выбросом серы, хлора, фтора.

В чём возможная причина возникновения плюма гигантского масштаба, породившего платобазальтовую формацию? Возможные ответы появились из Антарктиды и Китая. В районе Земли Уикса на востоке Антарктиды обнаружен самый крупный из известных на нашей планете астероидный кратер. Диаметр его воронки правильной округлой формы составляет 482 км, то есть крупное космическое тело ударило почти перпендикулярно к поверхности континента. Учёные убеждены, что возраст кратера 251 Ма, так как в Китае в регионе Мейшань на границе фаунистически охарактеризованных слоёв верхней перми и нижнего триаса обнаружен горизонт с металлическими частицами космического происхождения. Представляется, что причиной крупнейшей экологической катастрофы на границе пермского и триасового периодов было именно мощнейшее импактное событие, а крупномасштабные извержения сибирских траппов – его возможное следствие.

Физики полагают жизнеспособным следующее предположение [44]. Мощная гидравлическая ударная волна от падения крупного космического тела 251 Ма тому назад дошла до жидкого ядра Земли, прошла через него и вызвала на противоположной стороне жидкого ядра выброс вещества и энергии, спровоцировав возникновение суперплюма – «пра-родителя» сибирской трапповой формации и генетически связанных норильских месторождений сульфидных Ni-Cu-Pd руд. Палинспастическая реконструкция на время 250 Ма тому назад этому не противоречит.

С этим предположением согласуется и необычайное богатство норильских руд Pd и Pt. Сравним два крупнейших месторождения платиновых металлов – Бушвелд в Южной Африке и Норильск в Сибири. Объём магматической системы Бушвелда ~500 000 км³, магматической системы Норильска ~25 км³. При разнице в объёме в 2000 раз ресурсы палладия Норильска больше Бушвелда в 4 раза, платины – только в 5 раз меньше. Таким образом, производительность магматической системы Норильска превышает таковую для Бушвелда по Pd примерно в 10 000 раз, по Pt в 500 раз. Известно, что в планетах Земной группы максимальная концентрация платиновых металлов сосредоточена в их металлических ядрах и в низах мантии [17, 66].

Миллерит, годлевскит и иные низкотемпературные сульфиды в норильских рудах

Миллерит и иные низкотемпературные сульфиды Ni и Cu довольно широко распространены среди магматогенных сульфидных руд месторождения Норильск-I [11, 16, 32]. Широкое распространение подобных минералов и минеральных ассоциаций, на-

ложенных на магматогенные норильские сульфидные руды, установлены в работах [4, 8, 19, 24, 25, 30, 31, 43, 47–50, 54, 71 и др.]. М.Н. Годлевский рассматривал их как поздние низкотемпературные послемагматические гидротермальные производные трапповой формации. Из-за широкого распространения таких минеральных ассоциаций в рудах месторождения Норильск-I ряд геологов рассматривал норильские сульфидные руды как гидротермальные [39 и др.].

В дальнейшем было установлено, что низкотемпературные сульфиды Ni (миллерит, годлевскит, хизлевудит, никелистые пирит и макинавит и др.) и низкотемпературные сульфиды Cu (халькозин, борнит, валлериит и др.) норильских руд являются производными эпигенетичного послетраппового низкоградного метаморфизма в условиях цеолитовой, затем более высокотемпературной пренит-пумпеллитовой, далее вновь цеолитовой фации [43, 50, 71]. Rb/Sr возраст процессов метаморфизма по апофиллиту и по метабазальтам – первая дата 232 Ма (начало процессов метаморфизма), последняя 122 Ма (завершение процессов метаморфизма) [71].

Каждый образец норильских магматических пород и магматогенных сульфидных руд содержит микропрожилки метаморфогенно-гидротермальных магнетита, макинавита, валлериита, гизингерита, возникшие при участии вадозных вод. Поэтому понятно, почему изотопный состав кислорода норильских пород отличен от стандартного, изотопия кислорода норильских магматогенных сульфидных руд – «гидротермальная» [36], изотопный состав аргона богатых сульфидных руд – воздушный [1], при том, что изотопный состав гелия в тех же образцах – мантийный [1]. Последовательность метаморфогенно-гидротермальных рудных образований: 1) миллерит-пирит-халькопирит; 2) халькопирит-пирротин-ангидрит; 3) борнит-пирит, борнит-магнетит; 4) хизлевудит-халькозин; 5) макинавит-магнетит-валлериит; 6) валлериит-карбонат-корренсит-хлорит-магнетит; 7) кварц-гизингерит-игольчатый кубанит. Нередко разновозрастные метаморфогенно-гидротермальные образования фиксируются в одном обнажении (рис. 17). При интенсивном преобразовании первичных руд под действием метаморфогенных флюидов с высоким f_{O_2} сульфиды были полностью замещены ангидритом и гематитом.

Среди низкоградно метаморфизованных норильских сульфидных руд развита рассеянная вкрапленная регенеративная метаморфогенно-гидротермальная минерализация Ag – не содержащее Au самородное серебро, Hg серебро, богатый Ag борнит, аргентопентландит, ленаит, акантит, пираргирит, штрмейерит [30, 44, 47, 48]; Pt самородная – продукт



Рис. 17. Метаморфизованные сплошные сульфидные руды у кровли Главной Хараелахской сульфидной залежи. Рудник Октябрьский, гор. -800 м. Фото автора:

моихукитовые руды с крупным пентландитом (под перчаткой) последовательно замещены преобладающими борнитом (сиреневый), валлериитом (тёмно-серый), гизингеритом (серый)

деарсенизации сперрилита [20], куперит, брэггит [8, 49], хараелахит [19]; Pd – палладоарсенид, винсентит и самородный палладий – продукты деарсенизации маякита [44, 71], высокоцит [8, 49, 71], беспримесный звягинцевит [48].

Арсениды Fe-Ni-Co в норильских сульфидных рудах

Арсениды – характерные гидротермальные образования в магматических норильских сульфидных рудах [13]. М. Н. Годлевский рассматривал арсениды как поздние низкотемпературные послемагматические гидротермальные производные трапповой формации. В дальнейшем было установлено, что вкрапленность арсенидов и карбонатные и ангидрит-карбонатные жилы с арсенидами и антимонидами Fe, Ni и Co-Co-Ni-Sb-As минерализация моложе на 80–100 млн лет, чем трапповая формация, и развита только среди метаморфизованных Co-Ni-Cu руд с миллеритом, валлериитом, годлевскитом и др. Модельный Pb-Pb возраст галенита арсенидно-карбонатных жил – 144 Ма, галенита карбонатных жил с минералами серебра и уранинитом – 110 Ма [46, 71]. Параметры образования рудных и жильных минералов: T – 270–120 °C и P – 1–0,6 кбар, они возникли при повышенной $f O_2$ и низкой активности сульфидной серы [47]. Основной источник рудных элементов для Co-Ni-Sb-As минерализации – метаморфизируемые

Ag-Au-Pt-Pd Co-Ni-Cu сульфидные руды. При процессах низкоградного метаморфизма произошла заметная мобилизация As, Pb, Zn, Co, Ni, Sb, Ag, Se, Mn, Cd, незначительное перераспределение Pd и Pt, признаки мобилизации Au не обнаружены. Масштаб миграции Pb и As – не менее десятков м; Zn, Co, Ni, Sb, Hg, Se – более скромный; Cd, Mn, Pd, Pt – не более первых см. Изотопный состав Pb галенита арсенидно-карбонатных жил близок составу Pb континентальной коры, изотопный состав свинца галенита карбонатных жил с арсенидами, минералами серебра и уранинитом отвечает свинцу пород континентальной земной коры [46], тогда как изотопный состав Pb первичных сульфидных руд близок к мантийному [76]. Это свидетельствует о различных источниках вещества первичных сульфидных руд и арсенидно-карбонатных жил. Норильская метаморфогенно-гидротермальная Co-Ni-Sb-As минерализация с карбонатами, гематитом, сульфидами Zn, Pb, Cu, Ni, Mn, Ag, Bi, Cd, Sb, селенидами Pb и Ag, самородными мышьяком, серебром и висмутом, уранинитом – это пятиметалльная U-Ag-Bi-Ni-Co формация малого масштаба.

Процессы эпигенетичного низкоградного метаморфизма обусловили крайнее разнообразие (>450) минеральных видов Норильского рудного поля, резко усложнили минеральный состав его руд и, следовательно, схемы их переработки.

Некоторые замечания о методике изучения норильских сульфидных руд

Во многих типах норильских руд размер слагающих их кристаллов высокотемпературных сульфидных твёрдых растворов превышает 7–10 см. Поэтому исследование норильских руд прямым изучением аншлифов небольшого размера, выполненное А. Д. Генкиным для главного минерала норильских руд – пирротина [7], скорее затормозило изучение норильских руд. Исследование норильских руд необходимо начинать с анализа их текстур и только после этого переходить к рассмотрению микродеталей их строения.

Заключение

Месторождения Норильского рудного поля – плутоногенные. Источник расплавов рудоносных интрузивов и основной массы сульфидных руд – глубинный или сверхглубинный мантийный. Мантийные промежуточные магматические очаги Норильского и Талнахского рудных узлов – различные. Рудоносные интрузивы, одни из наиболее поздних производных трапповой формации P_2-T_1 , внедрились синхронно с процессом смятия вулканитов трапповой формации. Не менее трети сульфидной массы залежей

сплошных руд возникли при процессах сульфуризации на уровне становления интрузивов. Источник серы – сернистые газы, возникшие при сульфатредукции осадочных ангидритов под действием восстановленных газов, порождённых контактовым метаморфизмом углей и нефтидов около рудоносных интрузивов. Из-за неравномерной нагрузки на кровлю рудоносных интрузивов большая часть сульфидных расплавов была выжата в их головную часть. Этим в первую очередь и объясняется «ненормальное» соотношение мощности рудоносных интрузивов и сульфидных залежей. Тренд кристаллизационной дифференциации сульфидных расплавов обычный, с истощением Fe и накоплением Cu: Mss_1 ($T_{крис.} \sim 1190\text{--}1150\text{ }^\circ\text{C}$, состав близкий к пирротину или троилиту с отклонением к пентландиту), Mss_2 ($T_{крис.} \sim 1100\text{ }^\circ\text{C}$, состав заметно более медистый, с отклонением к кубаниту или халькопириту), Iss_1 ($T_{крис.} \sim 1000\text{--}950\text{ }^\circ\text{C}$, состав промежуточный между троилитом, кубанитом и пентландитом), Iss_2 (состав промежуточный между кубанитом, халькопиритом и пентландитом), Iss_3 (состав промежуточный между халькопиритом, кубанитом и пентландитом), Iss_4 , Iss_5 ($T_{крис.} \sim 760\text{ }^\circ\text{C}$, состав промежуточный между халькопиритом и пентландитом). Этим обусловлено зональное строение сульфидных тел от малых капель до гигантских залежей. В крупных сульфидных залежах и в мощных сульфидных жилах, от-

ходящих от этих залежей, то есть при кристаллизации в условиях повышенных температур, состав кристаллов Mss более сернистый, приближающийся к Fe_7S_8 . Массовая кристаллизация Mss такого состава привела к тому, что поздние дифференциаты обеднены серой и из них кристаллизовались сульфидные твёрдые растворы Iss_{1-5} , недосыщенные серой; среди продуктов их твёрдофазных превращений – талнахит, моихукит, путоранит. На любой стадии кристаллизации сульфидных расплавов происходила сепарация кристаллов и остаточного расплава. Уникальная особенность Норильских месторождений – наличие руд, сложенных графическими сростаниями сульфидных твёрдых растворов $PbSss$ и Iss_{3-5} , продуктами кристаллизации поздних легкоплавких ($T_{крис.} \sim 550\text{ }^\circ\text{C}$) сульфидных $Pb\text{-}Fe\text{-}Cu\text{-}Ni$ расплавов. Эти руды крайне богаты Pd, Pt, Au, Ag и их минералами.

Реальная длительность формирования норильских рудно-магматических систем не превышает 1,5 Ма.

Минеральный состав горных пород и руд Норильского рудного поля в заметной степени был преобразован при процессах эпигенетического послетраппового низкоградного метаморфизма в условиях цеолитовой и пренит-пумпеллиитовой фаций. Часть руд была превращена в агрегаты валлериита, гизингерита, гематита и др., что резко усложнило технологию их переработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адамская Е. В., Петров О. В., Прасолов Э. М. [и др.] Изотопная геология норильских месторождений. – СПб. : ВСЕГЕИ, 2017. – 348 с.
2. Бегизов В. Д. Минералы благородных металлов в рудах Талнахского месторождения: специальность 04.00.08 «Петрография, вулканология»: дис. на соискание учён. степ. канд. геол.-минерал. наук / Бегизов Виктор Дмитриевич. – М. : МГРИ, 1977. – 197 с.
3. Белозерский Н. А. Карбонилы металлов. – М. : Металлургия, 1958. – 272 с.
4. Бутько И. А., Изюмко В. М., Кулагов Э. А., Митенков Г. А. Макинавит и валлериит в рудах Норильска и Талнаха // Ученые записки НИИГА. Региональная серия. – 1966. – Вып. 5. – С. 203–209.
5. Бутько И. А., Кулагов Э. А. Новый сульфид меди и железа – талнахит // Записки ВМО. – 1968. – Ч. 97, Вып. 1. – С. 63–70.
6. Васильев Ю. Р. Петрология и черты строения сложно дифференцированной трапповой интрузии Норильск II // Геология и петрология интрузивных траппов Сибирской платформы. – Новосибирск : Наука, 1966. – С. 5–112.
7. Генкин А. Д., Логинов В. П., Органова Н. И. О взаимоотношениях и особенностях размещения гексагональных и моноклинных пирротинов в рудах // Геология рудных месторождений. – 1965. – Т. 7, № 1. – С. 3–24.
8. Генкин А. Д., Филимонова А. А., Евстигнеева Т. Л. [и др.] Сульфидные медно-никелевые руды норильских месторождений. – М. : Наука, 1981. – 234 с.
9. Геологическая карта Норильского рудного района масштаба 1:200 000. – Норильск, 1994.
10. Глубинное строение территории СССР / В. В. Белоусов (отв. ред.), Н. И. Павленкова, А. В. Егоркин [и др.]. – М. : Наука, 1991. – 238 с.
11. Годлевский М. Н. Кристаллизационная дифференциация сульфидного расплава на примере Норильских медно-никелевых месторождений // Материалы по геологии и полезным ископаемым Сибирской платформы. – Л. [СПб.] : ВСЕГЕИ, 1960. – С. 95–101.
12. Годлевский М. Н. Поведение арсенидов и сульфидов никеля и кобальта при послемагматических процессах // Проблемы кристаллохимии минералов и эндогенного минералообразования. – М. : АН СССР, 1967. – С. 211–221.
13. Годлевский М. Н. Траппы и рудоносные интрузии Норильского района. – М. : Госгеолтехиздат, 1959. – 68 с.

14. *Годлевский М. Н., Гриненко Л. Н.* Некоторые данные об изотопном составе серы сульфидов Норильского месторождения // Геология и геофизика. – 1963. – № 1. – С. 35–39.
15. *Годлевский М. Н., Кравцов Г. С., Сливко В. М.* Вопросы теплообмена интрузива и вмещающих пород и контактовый термометаморфизм углей вблизи трапповых интрузивов // Геология и геофизика. – 1962. – № 2. – С. 6–24.
16. *Годлевский М. Н., Шумская Н. И.* Халькопирит-миллеритовые руды месторождения Норильск I // Геология рудных месторождений. – 1960. – № 6. – С. 61–72.
17. *Гольдимиidt В. М.* Сборник статей по геохимии редких элементов. – М.–Л. [СПб.] : ГОНТИ, 1938. – 244 с.
18. *Дюу Б. Р., Зартман Р. Е.* Плюмботектоника фанерозоя // Геохимия гидротермальных рудных месторождений. – М. : Мир, 1982. – С. 28–70.
19. *Евстигнеева Т. Л., Генкин А. Д.* Платинометаллическая минерализация норильских медно-никелевых руд: природные и экспериментальные данные // Геология медно-никелевых месторождений СССР. – Л. [СПб.] : Наука, 1990. – С. 98–106.
20. *Евстигнеева Т. Л., Ким А. А., Некрасов И. Я.* О деарсенизации сперрилита в природе // Минералогический журнал. – 1990. – Т. 12, № 3. – С. 90–96.
21. *Золотухин В. В.* Базитовые пегматоиды норильских рудоносных интрузивов и проблема генезиса платиноидно-медно-никелевого оруденения норильского типа. – Новосибирск: СО РАН, 1997. – 88 с.
22. *Золотухин В. В.* О находке фаялитсодержащих метасоматитов в рудах Норильска // Доклады АН СССР. – 1971. – Т. 198. – С. 692–695.
23. *Золотухин В. В.* Обобщенная модель сульфидного Cu-Ni рудообразования как процесса сульфуризации // Рудообразование и генетические модели эндогенных рудных формаций. – Новосибирск : Наука. – 1988. – С. 172–182.
24. *Золотухин В. В., Рябов В. В., Васильев Ю. Р., Шатков В. А.* Петрология Талнахской рудоносной дифференцированной трапповой интрузии. – Новосибирск : Наука. – 1975. – 434 с.
25. *Изоитко В. М.* Технологическая минералогия и оценка руд. – СПб. : Наука. – 1997. – 582 с.
26. *Коваленкер В. А., Лапутина И. П., Павлов Е. Г.* О распаде природного твёрдого раствора в системе PbS – PbTe // Упорядочение и распад твёрдых растворов в минералах. – М. : Наука, 1979. – С. 185–190.
27. *Котульский В. К.* К вопросу о происхождении магматических медно-никелевых месторождений // Доклады АН СССР. – 1946. – Т. 51. – С. 381–384.
28. *Криволицкая Н. А.* Формирование Pt-Cu-Ni месторождений в процессе эволюции траппового магматизма в Норильском регионе // Геология рудных месторождений. – 2011. – Т. 53, № 4. – С. 309–339.
29. *Криволицкая Н. А., Рудакова А. В.* Строение и геохимические особенности пород трапповой формации Норильской мульды (СЗ Сибирской платформы) // Геохимия. – 2009. – № 7. – С. 675–698.
30. *Кулагов Э. А.* Особенности минерального состава руд месторождения Норильск-I: специальность 127: дис. на соискание учён. степ. канд. геол.-минерал. наук / Дисс. канд. геол.-мин. наук / Кулагов Эдуард Авксентьевич. – М. : МГУ, 1968. – 239 с.
31. *Кулагов Э. А., Евстигнеева Т. Л., Юшко-Захарова О. Е.* Новый сульфид никеля – годлевскит // Геология рудных месторождений. – 1969. – Т. 11, № 3. – С. 115–121.
32. *Лихачёв А. П.* Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения. – М. : Эслан. – 2006. – 496 с.
33. *Масайтис В. Л.* Пермский и триасовый вулканизм Сибири: проблемы динамических реконструкций // Записки ВМО. – 1983. – Ч. 112, Вып. 4. – С. 412–425.
34. *Митенков Г. А., Кнауф В. В., Ерцева Л. Н.* [и др.] Минералы элементов группы платины в сплошных пирротиновых рудах Талнаха // Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях. – М. : Наука, 1997. – С. 284–285.
35. *Муравьёва И. В., Евстигнеева Т. Л., Филимонова А. А., Малов В. С.* Первая находка моихукита в медно-никелевых рудах Октябрьского месторождения (Норильский район) // Геология рудных месторождений. – 1972. – Т. 14, № 3. – С. 94–97.
36. *Покровский Б. Г., Служеникин С. Ф., Криволицкая Н. А.* Изотопный состав кислорода и водорода в трапповых интрузивах Норильского района // Доклады РАН. – 2002. – Т. 383. – С. 675–679.
37. *Радько В. А.* Модель динамической дифференциации интрузивных траппов северо-запада Сибирской платформы // Геология и геофизика. – 1991. – № 11. – С. 19–27.
38. *Радько В. А.* Фации интрузивного и эффузивного магматизма Норильского района. – СПб. : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016. – 226 с.
39. *Роговер Г. Б.* Месторождение Норильск-1, некоторые его особенности, могущие иметь поисковое значение, и рациональная методика его разведки. – М. : Госгеолтехиздат, 1959. – 168 с.
40. *Служеникин С. Ф., Дистлер В. В., Кравцов В. Ф.* [и др.] Малосульфидное платиновое оруденение в Норильских дифференцированных интрузивах // Геология рудных месторождений. – 1994. – Т. 36, № 3. – С. 195–217.
41. *Спиридонов Э. М.* Анортозитовая тенденция магматической дифференциации // Проблемы магматизма Балтийского щита. – Л. : Наука, 1971. – С. 162–166.
42. *Спиридонов Э. М.* Арфведсонит-флогопитовые минералы лампроитовой серии Горного Крыма и Восточно-Сибирской платформы // Петрология и геодинамика геологических процессов. – Иркутск, 2021. – Т. 3. – С. 100–104.
43. *Спиридонов Э. М.* Генетическая модель месторождений Норильского рудного поля // Смирновский сборник-2019. – М. : Макс Пресс, 2019. – С. 41–113.
44. *Спиридонов Э. М.* О взаимодействии Ni-Cu-Fe сульфидного расплава (с Pd, Pt, Ag, Au) с титанавгитовыми базальтами (месторождение Медвежий Ручей, Норильск) // Ежегодный семинар по эксперимент. минералогии, петрологии и геохимии. – М. : Изд. РАН. – 2004. – С. 65–66.
45. *Спиридонов Э. М.* Рудно-магматические системы Норильского рудного поля // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51. – С. 1356–1378.

46. Спиридонов Э. М., Голубев В. Н., Гриценко Ю. Д. Изотопный состав свинца галенита, алтаита и интерметаллидов палладия сульфидных руд Норильского рудного поля // Геохимия. – 2010. – № 8. – С. 1–10.
47. Спиридонов Э. М., Гриценко Ю. Д. Эпигенетический низкоградный метаморфизм и Co-Ni-Sb-As минерализация в Норильском рудном поле. – М. : Научный мир, 2009. – 218 с.
48. Спиридонов Э. М., Иванова Ю. А., Наумов Д. И. [и др.] Норильское рудное поле: новая метаморфогенно-гидротермальная минеральная ассоциация – беспримесные звягинцевит и серебро, хиббингит, Мп хиббингит, сидерит, фосгенит, сфалерит в магматогенных поторанитовых рудах // Вестник МГУ. Геология. – 2022. – № 3. – С. 70–82.
49. Спиридонов Э. М., Кулагов Э. А., Куликова И. М. [и др.] Генетическая минералогия Pd, Pt, Au, Ag, Rh в норильских сульфидных рудах // Геология рудных месторождений. – 2015. – Т. 57, № 5. – С. 447–476.
50. Спиридонов Э. М., Ладыгин В. М., Степанов В. К. [и др.] Метавулканисты пренит-пумпеллиитовой и цеолитовой фаций трапповой формации Норильского района Сибирской платформы. – М. : МГУ, 2000. – 212 с.
51. Степанов В. К. Динамическая модель внедрения, кристаллизации и рудоотложения рудоносных интрузий Норильска // Труды ЦНИГРИ. – 1981. – Вып. 162. – С. 13–19.
52. Степанов В. К., Туровцев Д. М. Многофакторные модели медно-никелевых месторождений норильского типа // Труды ЦНИГРИ. – 1988. – Вып. 223. – С. 86–94.
53. Суханова Е. Н. Случай образования кокса под влиянием сульфидной жилы // Геология рудных месторождений. – 1959. – № 6. – С. 85–89.
54. Туровцев Д. М. Контактный метаморфизм Норильских интрузивов. – М. : Научный Мир, 2002. – 319 с.
55. Филимонова А. А., Муравьева И. И., Евстигнеева Т. Л. Минералы группы халькопирита медно-никелевых руд Норильских месторождений // Геология рудных месторождений. – 1974. – Т. 16, № 5. – С. 36–45.
56. Arndt N. T., Czamanske G. K., Walker R. J. Geochemistry and origin of the intrusive host of the Noril'sk – Talnakh Cu-Ni-PGE sulphide deposits // Economic Geology. – 2003. – V. 98. – P. 495–515.
57. Bowring S. A., Ervin D. M., Jin Y. G. [et al.] The age of the Permian – Triassic boundary at Meishan, Southern China // Science. – 1998. – V. 280. – P. 1039–1045.
58. Dalrymple G. B., Cramanske G. K., Stepanov V. K. [et al.] ⁴⁰Ar/³⁹Ar ages of samples from the Noril'sk – Talnakh ore-bearing intrusions and the Siberian flood basalts // Eos. – 1991. – V. 72. – P. 570.
59. Kamo S. L., Czamanske G. K., Amelin Yu. V. [et al.] U-Pb zircon and baddeleyite and U-Th-Pb perovskite ages for Siberian flood volcanism Maymecha-Kotuy area Siberia // J. Conference Abstr. – 2000. – V. 5, № 2. – P. 569.
60. Kamo S. L., Czamanske G. K., Krogh T. E. [et al.] A minimum U-Pb age for Siberian flood-basalt volcanism // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1996. – V. 60. – P. 3505–3511.
61. Kozyrev S. M., Komarova M. Z., Emelina L. N. [et al.] The mineralogy and behavior of PGM during processing of the Noril'sk – Talnakh PGE-Cu-Ni ores // Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. – 2002. – V. 54. – P. 757–792.
62. Li C., Naldrett A. J., Shmitt A. K. [et al.] Magmatic anhydrite-sulfide assemblages in plumbing system of the Siberian Traps // Geology. – 2009a. – V. 37. – P. 259–262.
63. Li C., Ripley E. M., Naldrett A. J. Compositional variations of olivine and sulfure isotopes in the Noril'sk and Talnakh intrusion, Siberia: Implications for ore-forming processes in dynamic magma conduits // Economic Geology. – 2003. – V. 98. – P. 69–86.
64. Li C., Ripley E. M., Naldrett A. J. A new genetic model for the giant Ni-Cu-PGE sulfide deposits associated with the Siberian flood basalts // Economic Geology. – 2009b. – V. 104. – P. 291–301.
65. Lightfoot P. C., Naldrett A. J., Gorbachev N. S. [et al.] Chemostratigraphy of Siberian trap lavas Noril'sk district, Russia: Implications and source // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 1993. – V. 114. – P. 171–188.
66. Naldrett A. J. Magmatic sulfide deposits. Geology, geochemistry and exploration. Berlin [etc.]: Springer, 2004. – 727 p.
67. Okamoto H., Chakrabarti D. J., Laughlin D. E., Massalski T. B. The Au-Cu (gold-copper) system // Bulletin of Alloy Phase Diagrams. – 1987. – V. 8. – P. 453–474.
68. Ryabov V. V., Ponomarchuk V. A. The role of hydrocarbons in the formation of the PGE deposits in the Siberian traps // 12th International Platinum Symposium (Ekaterinburg). – 2014. – P. 115–116.
69. Simonov O. N., Lul'ko V. A., Amosov Yu. N., Salov V. N. Geological structure of the Noril'sk region // Sudbury – Noril'sk Symposium, Ontario Geological Survey. – 1994. – Spec. V. 5. – P. 161–170.
70. Sluzhenikin S. F., Mokhov A. V. Gold and silver in PGE–Cu–Ni and PGE ores of the Noril'sk deposits, Russia // Mineralium Deposita. – 2015. – V. 50. – P. 465–492.
71. Spiridonov E. M., Serova A. A., Kulikova I. M. [et al.] Metamorphic-hydrothermal Ag-Pd-Pt mineralization in the Noril'sk sulfide ore deposit, Siberia // Canadian Mineralogist. – 2016. – V. 54. – P. 429–452.
72. Spiridonov E. M., Stepanov V. K., Kulagov E. A., Belyakov S. N. Real relationships of volcanic and ore-bearing intrusive traps in the Noril'sk ore field, Northern Siberia, Russia // 13th International Platinum Symposium (Polokwane, South Africa). – 2018. – P. 176–177.
73. Stepanov V. K. Formation mechanism of ore-bearing intrusives of Noril'sk type // 12th International Platinum Symposium (Ekaterinburg). – 2014. – P. 121–122.
74. Vogt J. H. L. Geology of the platinum metals // Economic Geology. – 1927. – V. 22. – P. 322–355.
75. Walker R. J., Morgan J. W., Horan M. F. [et al.] Re-Os isotope evidence for an enriched-mantle source for the Noril'sk-type ore-bearing intrusion // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1994. – V. 58. – P. 4179–4197.
76. Wooden J. L., Czamanske G. K., Fedorenko V. A. [et al.] Pb isotope data indicate a complex, mantle origin for the Noril'sk – Talnakh ores, Siberia // Economic Geology. – 1992. – V. 87. – P. 1153–1165.

REFERENCES

1. *Adamskaya Ye. V., Petrov O. V., Prasolov E. M.* [et al.] *Izotopnaya geologiya noril'skikh mestorozhdeniy* [Isotope geology of the Norilsk deposits], St. Petersburg, VSEGEI publ., 2017, 348 p. (In Russ.)
2. *Begizov V. D.* *Mineraly blagorodnykh metallov v rudakh Talnakhskogo mestorozhdeniya* [Minerals of noble metals in the ores of the Talnakh deposit]. Moscow, MGRI publ., 1977, 197 p. (In Russ.)
3. *Belozerskiy N. A.* *Karbonily metallov* [Carbonyls of metals], Moscow, Metallurgiya, 1958, 272 p. (In Russ.)
4. *Bud'ko I. A., Izoitko V. M., Kulagov E. A., Mitenkov G. A.* *Makinavit i vallerit v rudakh Noril'ska i Talnakh* [Makinavit and vallerite in the ores of Norilsk and Talnakh]. *Uchenyye zapiski NIIGA. Regional'naya seriya*, 1966, Is. 5, pp. 203–209. (In Russ.)
5. *Bud'ko I. A., Kulagov E. A.* *Novyy sul'fid medi i zheleza – talnakhit* [New copper and iron sulfide – talnakhite]. *Zapiski VMO*, 1968, Ch. 97, Is. 1, pp. 63–70. (In Russ.)
6. *Vasil'yev Yu. R.* *Petrologiya i cherty stroyeniya slozhno differentsirovannoy trappovoy intruzii Noril'sk II* [Petrology and structural features of the complexly differentiated trap intrusion Norilsk II]. *Geologiya i petrologiya intruzivnykh trappov Sibirskoy platformy*, Novosibirsk, Nauka publ., 1966, pp. 5–112. (In Russ.)
7. *Genkin A. D., Loginov V. P., Organova N. I.* *O vzaimootnosheniyakh i osobennostyakh razmeshcheniya geksagonal'nykh i monoklinnykh pirrotinov v rudakh* [On the relationship and features of the placement of hexagonal and monoclinic pyrrhotites in ores]. *GRM*, 1965, V. 7, No. 1, pp. 3–24. (In Russ.)
8. *Genkin A. D., Filimonova A. A., Yevstigneyeva T. L.* [et al.] *Sul'fidnyye medno-nikelevyye rudy noril'skikh mestorozhdeniy* [Sulfide copper-nickel ores of Norilsk deposits], Moscow, Nauka publ., 1981, 234 p. (In Russ.)
9. *Geologicheskaya karta Noril'skogo rudnogo rayona mashtaba 1:200 000* [Geological map of the Norilsk ore region, scale 1:200,000]. Noril'sk, 1994. (In Russ.)
10. *Glubinnoye stroyeniye territorii SSSR* [Deep structure of the territory of the USSR]. Ed. V. V. Belousov, Moscow, Nauka publ., 1991, 238 p. (In Russ.)
11. *Godlevskiy M. N.* *Krystallizatsionnaya differentsiatsiya sul'fidnogo rasplava na primere Noril'skikh medno-nikelevykh mestorozhdeniy* [Crystallization differentiation of sulfide melt on the example of Norilsk copper-nickel deposits]. *Materialy po geologii i poleznym iskopayemym Sibirskoy platformy*, Leningrad, VSEGEI publ., 1960, pp. 95–101. (In Russ.)
12. *Godlevskiy M. N.* *Povedeniye arsenidov i sul'fidov nikelya i kobal'ta pri poslemagmaticheskikh protsessakh* [Behavior of arsenides and sulfides of nickel and cobalt during post-magmatic processes]. *Problemy kristallogimii mineralov i endogennogo mineraloobrazovaniya*, Moscow, AN SSSR publ., 1967, pp. 211–221. (In Russ.)
13. *Godlevskiy M. N.* *Trappy i rudonosnyye intruzii Noril'skogo rayona* [Traps and ore-bearing intrusions of the Norilsk region]. Moscow, Gosgeoltekhizdat publ., 1959, 68 p. (In Russ.)
14. *Godlevskiy M. N., Grinenko L. N.* *Nekotoryye dannyye ob izotopnom sostave sery sul'fidov Noril'skogo mestorozhdeniya* [Some data on the isotope composition of sulfur in sulfides of the Norilsk deposit]. *Geologiya i geofizika*, 1963, No. 1, pp. 35–39. (In Russ.)
15. *Godlevskiy M. N., Kravtsov G. S., Slivko V. M.* *Voprosy teploobmena intruziva i vmeshchayushchikh porod i kontaktovyy termometamorfizm ugley vblizi trappovykh intruzivov* [Issues of heat transfer between intrusion and host rocks and contact thermometamorphism of coals near trap intrusions]. *Geologiya i geofizika*, 1962, No. 2, pp. 6–24. (In Russ.)
16. *Godlevskiy M. N., Shumskaya N. I.* *Khal'kopirit-milleritovyye rudy mestorozhdeniya Noril'sk I* [Chalcopyrite-millerite ores of the Norilsk I deposit]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 1960, No. 6, pp. 61–72. (In Russ.)
17. *Gol'dshmidt V. M.* *Sbornik statey po geokhimii redkikh elementov* [Collection of articles on the geochemistry of rare elements]. Moscow, Leningrad, GONTI publ., 1938, 244 p. (In Russ.)
18. *Dou B. R., Zartman R. Ye.* *Plyumbotektonika fanerozoia* [Plumbotectonics of the Phanerozoic]. *Geokhimiya gidrotermal'nykh rudnykh mestorozhdeniy*, Moscow, Mir publ., 1982, pp. 28–70. (In Russ.)
19. *Yevstigneyeva T. L., Genkin A. D.* *Platinometal'naya mineralizatsiya noril'skikh medno-nikelevykh rud: prirodnyye i eksperimental'nyye dannyye* [Platinum-metal mineralization of Norilsk copper-nickel ores: natural and experimental data]. *Geologiya medno-nikelevykh mestorozhdeniy SSSR*, Leningrad, Nauka publ., 1990, pp. 98–106. (In Russ.)
20. *Yevstigneyeva T. L., Kim A. A., Nekrasov I. Ya.* *O dearsenizatsii sperrilita v prirode* [On dearsenization of sperrylite in nature]. *Mineralogicheskii zhurnal*, 1990, V. 12, No. 3, pp. 90–96. (In Russ.)
21. *Zolotukhin V. V.* *Bazitovyye pegmatoidy noril'skikh rudonosnykh intruzivov i problema genezisa platinoidno-medno-nikelevogo orudneniya noril'skogo tipa* [Basic pegmatoids of the Norilsk ore-bearing intrusives and the problem of the genesis of Norilsk-type platinoid-copper-nickel mineralization]. Novosibirsk, SO RAN publ., 1997, 88 p. (In Russ.)
22. *Zolotukhin V. V.* *O nakhodke fayalitsoderzhashchikh metasomatitov v rudakh Noril'ska* [On the discovery of fayalite-bearing metasomatites in the ores of Norilsk]. *Doklady AN SSSR*, 1971, V. 198, pp. 692–695. (In Russ.)
23. *Zolotukhin V. V.* *Obobshchennaya model' sul'fidnogo Cu-Ni rudoobrazovaniya kak protsessa sul'furizatsii* [Generalized model of sulfide Cu-Ni ore formation as a process of sulfurization]. *Rudoobrazovaniye i geneticheskiye modeli endogennykh rudnykh formatsiy*, Novosibirsk, Nauka, 1988, pp. 172–182. (In Russ.)

24. *Zolotukhin V. V., Ryabov V. V., Vasil'yev Yu. R., Shatkov V. A.* Petrologiya Talnakhskoy rudonosnoy differentsirovannoy trappovoy intruzii [Petrology of the Talnakh ore-bearing differentiated trap intrusion]. Novosibirsk, Nauka publ., 1975, 434 p. (In Russ.)
25. *Izoitko V. M.* Tekhnologicheskaya mineralogiya i otsenka rud [Technological mineralogy and evaluation of ores]. St. Petersburg, Nauka publ., 1997, 582 p. (In Russ.)
26. *Kovalenker V. A., Laputina I. P., Pavlov Ye. G.* O raspade prirodnogo tvordogo rastvora v sisteme PbS – PbTe [On the decomposition of a natural solid solution in the PbS – PbTe system]. Uporyadocheniye i raspad tvordyykh rastvorov v mineralakh, Moscow, Nauka publ., 1979, pp. 185–190. (In Russ.)
27. *Kotul'skiy V. K.* K voprosu o proiskhozhdenii magmaticheskikh medno-nikelevykh mestorozhdeniy [On the origin of igneous copper-nickel deposits]. Doklady AN SSSR, 1946, V. 51, pp. 381–384. (In Russ.)
28. *Krivolutskaya N. A.* Formirovaniye Pt-Cu-Ni mestorozhdeniy v protseze evolyutsii trappovogo magmatizma v Noril'skom regione [Formation of Pt-Cu-Ni deposits during the evolution of trap magmatism in the Norilsk region]. GRM, 2011, V. 53, No. 4, pp. 309–339. (In Russ.)
29. *Krivolutskaya N. A., Rudakova A. V.* Stroyeniye i geokhimicheskiye osobennosti porod trappovoy formatsii Noril'skoy mul'dy (SZ Sibirskoy platformy) [Structure and geochemical features of the rocks of the trap formation of the Norilsk trough (NW of the Siberian platform)]. Geokhimiya, 2009, No. 7, pp. 675–698. (In Russ.)
30. *Kulagov E. A.* Osobennosti mineral'nogo sostava rud mestorozhdeniya Noril'sk-I [Features of the mineral composition of the ores of the Norilsk-I deposit]. Moscow, MGU publ., 1968, 239 p. (In Russ.)
31. *Kulagov E. A., Yevstigneyeva T. L., Yushko-Zakharova O. Ye.* Novyy sul'fid nikelya – godlevskit [New nickel sulfide – godlevskite]. Geologiya rudnykh mestorozhdeniy, 1969, No. 3, pp. 115–121. (In Russ.)
32. *Likhachov A. P.* Platino-medno-nikelevyye i platinovyye mestorozhdeniya [Platinum-copper-nickel and platinum deposits]. Moscow, Eslan publ., 2006, 496 p. (In Russ.)
33. *Masaytis V. L.* Permskiy i triasovyy vulkanizm Sibiri: problemy dinamicheskikh rekonstruktsiy [Permian and Triassic volcanism of Siberia: problems of dynamical reconstructions]. Zapiski VMO, 1983, Ch. 112, Is. 4, pp. 412–425. (In Russ.)
34. *Mitenkov G. A., Knauf V. V., Yertseva L. N.* [et al.] Mineraly elementov gruppy platiny v sploshnykh pirrotinovykh rudakh Talnakha [Minerals of elements of the platinum group in solid pyrrhotite ores of Talnakh]. Osnovnyye problemy v uchenii o magmatogennykh rudnykh mestorozhdeniyakh, Moscow, Nauka publ., 1997, pp. 284–285. (In Russ.)
35. *Murav'yova I. V., Yevstigneyeva T. L., Filimonova A. A., Malov V. S.* Pervaya nakhodka moikhukita v medno-nikelevykh rudakh Oktyabr'skogo mestorozhdeniya (Noril'skiy rayon) [The first find of moikhukit in copper-nickel ores of the Oktyabrskoye deposit (Norilsk region)]. Geologiya rudnykh mestorozhdeniy, 1972, V. 14, No. 3, pp. 94–97. (In Russ.)
36. *Pokrovskiy B. G., Sluzhenikin S. F., Krivolutskaya N. A.* Izotopnyy sostav kisloroda i vodoroda v trappovykh intruzivakh Noril'skogo rayona [Isotopic composition of oxygen and hydrogen in the trap intrusions of the Norilsk region]. Doklady RAN, 2002, V. 383, pp. 675–679. (In Russ.)
37. *Rad'ko V. A.* Model' dinamicheskoy differentsiatsii intruzivnykh trappov severo-zapada Sibirskoy platformy [Model of dynamic differentiation of intrusive traps in the northwest of the Siberian Platform]. Geologiya i geofizika, 1991, No. 11, pp. 19–27. (In Russ.)
38. *Rad'ko V. A.* Fatsii intruzivnogo i effuzivnogo magmatizma Noril'skogo rayona [Facies of intrusive and effusive magmatism in the Norilsk region]. St. Petersburg, Kartograficheskaya fabrika VSEGEI publ., 2016, 226 p. (In Russ.)
39. *Rogover G. B.* Mestorozhdeniye Noril'sk-I, nekotoryye yego osobennosti, mogushchiye imet' poiskovoye znacheniyе, i ratsional'naya metodika yego razvedki [The Norilsk-I field, some of its features that may be of exploratory significance, and a rational methodology for its exploration]. Moscow, Gosgeoltekhizdat publ., 1959, 168 p. (In Russ.)
40. *Sluzhenikin S. F., Distler V. V., Kravtsov V. F., Kuni-lov V. Ye., Laputina L. P., Turovtsev D. M.* Malosul'fidnoye platinovoye orudneniye v Noril'skikh differentsirovannykh intruzivakh [Low-sulfide platinum mineralization in the Norilsk differentiated intrusions]. Geologiya rudnykh mestorozhdeniy, 1994, V. 36, No. 3, pp. 195–217. (In Russ.)
41. *Spiridonov E. M.* Anortozitovaya tendentsiya magmaticheskoy differentsiatsii [Anorthositic tendency of magmatic differentiation]. Problemy magmatizma Baltiyskogo shchita, Leningrad, Nauka publ., 1971, pp. 162–166. (In Russ.)
42. *Spiridonov E. M.* Arfvedsonit-flogopitovyye minetty lamproitovoy serii Gornogo Kryma i Vostochno-Sibirskoy platformy [Arfvedsonite-phlogopite minettes of the lamproite series of the Crimean Mountains and the East Siberian Platform]. Petrologiya i geodinamika geologicheskikh protsessov, Irkutsk, 2021, V. 3, pp. 100–104. (In Russ.)
43. *Spiridonov E. M.* Geneticheskaya model' mestorozhdeniy Noril'skogo rudnogo polya [Genetic model of deposits of the Norilsk ore field]. Smirnovskiy sbornik-2019, Moscow, Maks Press publ., 2019, pp. 41–113. (In Russ.)
44. *Spiridonov E. M.* O vzaimodeystvii Ni-Cu-Fe sul'fidnogo raspava (с Pd, Pt, Ag, Au) s titanavgitovymi bazal'tami (mestorozhdeniye Medvezhiy Ruchey, Noril'sk) [On the interaction of Ni-Cu-Fe sulfide melt (with Pd, Pt, Ag, Au) with titanium augite basalts (Medvezhiy Ruchey deposit, Norilsk)]. Yezhegodnyy seminar po eksperiment. mineralogii, petrologii i geokhimii, Moscow, RAN publ., 2004, pp. 65–66. (In Russ.)
45. *Spiridonov E. M.* Rudno-magmaticheskkiye sistemy Noril'skogo rudnogo polya [Ore-magmatic systems of the

- Norilsk ore field]. *Geologiya i geofizika*, 2010, V. 51, pp. 1356–1378. (In Russ.)
46. *Spiridonov E. M., Golubev V. N., Gritsenko Yu. D.* Izo-topnyy sostav svintsya galenita, altaita i intermetallidov palladiya sul'fidnykh rud Noril'skogo rudnogo polya [Pb isotope composition of galena, altaite and palladium intermetallides from sulfide ores of the Norilsk ore field]. *Geokhimiya*, 2010, No. 8, pp. 1–10. (In Russ.)
 47. *Spiridonov E. M., Gritsenko Yu. D.* Epigeneticheskiy nizkogradnyy metamorfizm i Co-Ni-Sb-As mineralizatsiya v Noril'skom rudnom pole [Epigenetic low-grade metamorphism and Co-Ni-Sb-As mineralization in the Norilsk ore field]. Moscow, Nauchnyy mir publ., 2009, 218 p. (In Russ.)
 48. *Spiridonov E. M., Ivanova Yu. A., Naumov D. I.* [et al.] Noril'skoye rudnoye pole: novaya metamorfogenno-gidrotermal'naya mineral'naya assotsiatsiya – besprimesnyye zvyagintsevit i srebro, khibbingit, Mn khibbingit, siderit, fosgenit, sfalerit v magmatogennykh putoranitovykh rudakh [Norilsk ore field: a new metamorphogenic-hydrothermal mineral association – pure zvyagintsevit and silver, hibbingite, Mn hibbingite, siderite, phosgenite, sphalerite in magmatogenic putoranite ores]. *Vestnik MGU. Geologiya*, 2022, No. 3, pp. 70–82. (In Russ.)
 49. *Spiridonov E. M., Kulagov E. A., Kulikova I. M.* [et al.] Geneticheskaya mineralogiya Pd, Pt, Au, Ag, Rh v noril'skikh sul'fidnykh rudakh [Genetic mineralogy of Pd, Pt, Au, Ag, Rh in Norilsk sulfide ores]. *GRM*, 2015, V. 57, No. 5, pp. 447–476. (In Russ.)
 50. *Spiridonov E. M., Ladygin V. M., Stepanov V. K.* [et al.] Metavulkanity prenit-pumpelliitovoy i tselitovoy fatsiy trappovoy formatsii Noril'skogo rayona Sibirskoy platformy [Metavolcanics of the prehnite-pumpelliite and zeolite facies of the trap formation of the Norilsk region of the Siberian platform], Moscow, MGU publ., 2000, 212 p. (In Russ.)
 51. *Stepanov V. K.* Dinamicheskaya model' vnedreniya, kristallizatsii i rudootlozheniya rudosnosnykh intruziy Noril'ska [Dynamic model of intrusion, crystallization and ore deposition of ore-bearing intrusions of Norilsk]. *Trudy TSNIGRI*, 1981, Is. 162, pp. 13–19.
 52. *Stepanov V. K., Turovtsev D. M.* Mnogofaktornyye modeli medno-nikelevykh mestorozhdeniy noril'skogo tipa [Multifactorial models of copper-nickel deposits of the Norilsk type]. *Trudy TSNIGRI*, 1988, Is. 223, pp. 86–94. (In Russ.)
 53. *Sukhanova Ye. N.* Sluchay obrazovaniya koksa pod vliyaniem sul'fidnoy zhily [A case of coke formation under the influence of a sulfide vein]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 1959, V. 2, No. 6, pp. 85–89. (In Russ.)
 54. *Turovtsev D. M.* Kontaktovyi metamorfizm Noril'skikh intruzivov [Contact metamorphism of the Norilsk intrusions, Moscow]. Moscow, Nauchnyy Mir publ., 2002, 319 p. (In Russ.)
 55. *Filimonova A. A., Murav'yeva I. I., Yevstigneyeva T. L.* Mineraly gruppy khal'kopirita medno-nikelevykh rud Noril'skikh mestorozhdeniy [Minerals of the chalcopirite group of copper-nickel ores of Norilsk deposits] *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 1974, V. 6, No. 5, pp. 36–45. (In Russ.)
 56. *Arndt N. T., Czamanske G., Walker R. J.* Geochemistry and origin of the intrusive host of the Noril'sk – Talnakh Cu-Ni-PGE sulphide deposits. *Economic Geology*, 2003, V. 98, pp. 495–515.
 57. *Bowring S. A., Ervin D. M., Jin Y. G.* [et al.] The age of the Permian – Triassic boundary at Meishan, Southern China. *Science*, 1998, V. 280, pp. 1039–1045.
 58. *Dalrymple G. B., Cramanske G. K., Stepanov V. K.* [et al.] $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of samples from the Noril'sk – Talnakh ore-bearing intrusions and the Siberian flood basalts. *Eos*, 1991, V. 72, pp. 570.
 59. *Kamo S. L., Czamanske G. K., Amelin Yu. V.* [et al.] U-Pb zircon and baddeleyite and U-Th-Pb perovskite ages for Siberian flood volcanism Maymecha-Kotuy area Siberia. *J. Conference Abstr*, 2000, V. 5, № 2, pp. 569.
 60. *Kamo S. L., Czamanske G. K., Krogh T. E.* A minimum U-Pb age for Siberian flood-basalt volcanism. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, V. 60, pp. 3505–3511.
 61. *Kozyrev S. M., Komarova M. Z., Emelina L. N.* [et al.] The mineralogy and behavior of PGM during processing of the Noril'sk – Talnakh PGE-Cu-Ni ores. *Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum*, 2002, V. 54, pp. 757–792.
 62. *Li C., Naldrett A. J., Shmitt A. K.* [et al.] Magmatic anhydrite-sulfide assemblages in plumbing system of the Siberian Traps. *Geology*, 2009a, V. 37, pp. 259–262.
 63. *Li C., Ripley E. M., Naldrett A. J.* Compositional variations of olivine and sulfure isotopes in the Noril'sk and Talnakh intrusion, Siberia: Implications for ore-forming processes in dynamic magma conduits. *Economic Geology*, 2003, V. 98, pp. 69–86.
 64. *Li C., Ripley E. M., Naldrett A. J.* A new genetic model for the giant Ni-Cu-PGE sulfide deposits associated with the Siberian flood basalts. *Economic Geology*, 2009b, V. 104, pp. 291–301.
 65. *Lightfoot P. C., Hawkesworth C. S., Hergt J.* [et al.] Remobilization of the continental lithosphere by mantle plumes: major-, trace-element, and Sr-, Nd-, and Pb-isotope evidence from picritic and tholeiitic lavas of the Noril'sk district, Siberian Trap, Russia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1993a, V. 114, pp. 171–188.
 66. *Naldrett A. J.* Magmatic sulfide deposits. *Geology, geochemistry and exploration*. Berlin [etc.], Springer, 2004, 727 p.
 67. *Okamoto H., Chakrabarti D. J., Laughlin D. E., Massalski T. B.* The Au-Cu (gold-copper) system. *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, 1987, V. 8, pp. 453–474.
 68. *Ryabov V. V., Ponomarchuk V. A.* The role of hydrocarbons in the formation of the PGE deposits in the Siberian traps. 12th International Platinum Symposium (Ekaterinburg), 2014, pp. 115–116.
 69. *Simonov O. N., Lul'ko V. A., Amosov Yu. N., Salov V. N.* Geological structure of the Noril'sk region. *Sudbury-Noril'sk Symposium*, Ontario Geological Survey, 1994, Spec.V. 5, pp. 161–170.

70. *Sluzhenikin S. F., Mokhov A. V.* Gold and silver in PGE–Cu–Ni and PGE ores of the Noril'sk deposits, Russia. *Mineralium Deposita*, 2015, V. 50, pp. 465–492.
71. *Spiridonov E. M., Serova A. A., Kulikova I. M.* [et al.] Metamorphic-hydrothermal Ag–Pd–Pt mineralization in the Noril'sk sulfide ore deposit, Siberia. *Canadian Mineralogist*, 2016, V. 54, pp. 429–452.
72. *Spiridonov E.M., Stepanov V.K., Kulagov E. A., Belyakov S. N.* Real relationships of volcanic and ore-bearing intrusive traps in the Noril'sk ore field, Northern Siberia, Russia. Abstracts of 13th International Platinum Symposium (Polokwane, South Africa), 2018, pp. 176–177.
73. *Stepanov V. K.* Formation mechanism of ore-bearing intrusives of Noril'sk type. 12th International Platinum Symposium (Ekaterinburg), 2014, pp. 121–122.
74. *Vogt J. H. L.* Geology of the platinum metals. *Economic Geology*, 1927, V. 22, pp. 322–355.
75. *Walker R. J., Morgan J. W., Horan M. F.* [et al.] Re–Os isotope evidence for an enriched-mantle source for the Noril'sk-type ore-bearing intrusion. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, V. 58, pp. 4179–4197.
76. *Wooden J. L., Czamanske G. K., Fedorenko V. A.* [et al.] Pb isotope data indicate a complex, mantle origin for the Noril'sk – Talnakh ores, Siberia. *Economic Geology*, 1992, V. 87, pp. 1153–1165.

Статья поступила в редакцию 25.10.22; одобрена после рецензирования 07.11.22; принята к публикации 08.11.22.
The article was submitted 25.10.22; approved after reviewing 07.11.22; accepted for publication 08.11.22.

По всем вопросам, связанными со статьями, следует обращаться в редакцию
по тел. +7 (495)315-28-47,
E-mail: ogeo@tsnigri.ru

Адрес редакции: 117545, г. Москва, Варшавское шоссе, д. 129, корп. 1