

Основы теории магматического рудообразования в трудах М. Н. Годлевского и их современное развитие

Foundations of the theory of magmatic ore formation in works by M. N. Godlevsky and their modern development

Криволицкая Н. А.

Krivolutskaya N. A.

К 120-летию со дня рождения выдающегося геолога, исследователя магматических сульфидных месторождений Михаила Николаевича Годлевского в Центральном научно-исследовательском геолого-разведочном институте цветных и благородных металлов, где он трудился в 1961–1984 гг., готовится книга о жизни этого замечательного человека «Из глубины норильских руд. Михаил Годлевский». Публикуемый ниже материал базируется на статье «Теория магматического рудообразования в трудах М. Н. Годлевского и её современные аспекты» из юбилейного издания и содержит небольшие редакционные изменения.

Рассматриваются основные положения магматического генезиса Норильских платино-медно-никелевых месторождений, разработанные М. Н. Годлевским в его трудах. Особое внимание уделено его оставшейся неопубликованной докторской диссертации, охватывающей все аспекты генезиса уникальных норильских руд: от условий образования рудоносных магм на северо-западе Сибирской платформы и их кристаллизации в верхних зонах земной коры до формирования вкрапленных и жильных руд месторождений Норильск 1 и Зуб-Маркшейдерское. Представлены современные взгляды на происхождение месторождений Норильского района, которые были охарактеризованы в работах М. Н. Годлевского.

Ключевые слова: Сибирские траппы, медно-никелевые руды, Норильский район, магматические месторождения, дифференциация, ассимиляция.

On the occasion of the 120th anniversary of the birth of Mikhail Nikolayevich Godlevsky, an outstanding geologist and researcher of magmatic sulfide deposits, a book about the life of this remarkable man “From the depths of the Norilsk ores. Mikhail Godlevsky” is being prepared at the Central Research Geological Prospecting Institute for Base and Precious Metals, where he worked in 1961-1984. The material published below is based on the article “The theory of magmatic ore formation in works by M. N. Godlevsky and its modern aspects” from the anniversary edition and contains minor editorial changes. The article considers the principal theoretical provisions of the magmatic genesis of the Norilsk platinum-copper-nickel deposits, that were developed by M. N. Godlevsky in his works. Particular attention is paid to his still unpublished doctoral dissertation that covers all aspects of the genesis of the unique Norilsk ores: from the formation conditions of the ore-bearing magmas in the northwest Siberian Platform and their crystallization in the upper zones of the earth's crust, to the formation of disseminated and veined ores of the Norilsk 1 and Zub-Marksheiderskoe deposits. Modern views are presented on the origin of ore deposits of the Norilsk region, which were characterized in the works by M. N. Godlevsky.

Key words: Siberian traps, copper-nickel ores, Norilsk region, magmatic ore deposits, differentiation, assimilation.

Для цитирования: Криволицкая Н. А. Основы теории магматического рудообразования в трудах М. Н. Годлевского и их современное развитие. Руды и металлы. 2022. № 4. С. 119–135. DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10025

For citation: Krivolutskaya N. A. Foundations of the theory of magmatic ore formation in works by M. N. Godlevsky and their modern development. Ores and metals, 2022, № 4, pp. 119–135. DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10025

Магматические месторождения, связанные с ультрабазит-базитовыми комплексами, являются главными поставщиками на мировой рынок чёрных (Fe, Ti, V) и цветных (Cu, Ni) металлов, а также металлов платиновой группы. Состав и генезис руд этих трёх групп различен и обсуждается на протяжении более чем вековой истории их изучения. Самым сложным представляется образование сульфидных медно-никелевых месторождений из-за низкой растворимости серы в расплавах основного и ультраосновного составов. Теоретические основы генезиса магматических сульфидных месторождений всех регионов мира практически полностью базируются на представлениях об образовании норильских руд [25, 33, 35], изучение которых имеет совершенно исключительное значение для развития теории рудообразования и петрологии.

Эти основы были заложены Михаилом Николаевичем Годлевским, одним из крупнейших геологов Советского Союза. Волею судеб он стал признанным лидером в области изучения магматического рудообразования в нашей стране. Первоначально М. Н. Годлевский рассмотрел различные аспекты генезиса сульфидных руд на примере Норильского рудного района [4, 6], позже он совершенствовал теорию, исследуя другие провинции – Карело-Кольскую, Воронежского щита, Северного Прибайкалья, которыми ему пришлось заниматься на протяжении многих лет. Разрабатываемая М. Н. Годлевским теория рудообразования базировалась также на его обширных знаниях о многочисленных уникальных мировых объектах, таких как месторождения Садбери (Канада), Бушвельд (ЮАР) и многих других, что наиболее ярко отражено в написанном им разделе «Магматические месторождения» в книге «Генезис эндогенных рудных месторождений», вышедшей в 1968 г. под редакцией академика В. И. Смирнова [5].

Анализ творчества Михаила Николаевича Годлевского представляет собой непростую задачу в силу особенностей его жизненного пути. Многие работы учёного были анонимными или даже числились под другими фамилиями из-за статуса заключённого, в кото-

ром он начал свои исследования в Норильске (это относится и к научным текстам, написанным другими геологами Норильлага, в частности, В. К. Котульским, чьи работы М. Н. Годлевский высоко ценил). В одном из писем к Н. Ю. Икорниковой упомянута эта ситуация «...у меня добрая половина отчётов подписана сторонними лицами»¹. Поэтому каждая его публикация – это отстаивание своего «я», своей позиции, ответ «им». 21 сентября 1958 г. он пишет: «...Я узнал радостную для меня новость: в “Горном журнале” появилась моя статья о Норильске [3]. Конечно, это пустяк, написано для горняков с целью ознакомить их с Норильском. Важна не сама заметка, а то, что после 15 лет втаптывания в грязь снова я появился в открытой печати»².

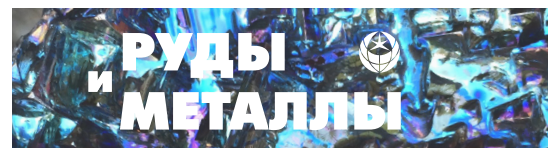
Секретность материалов по Норильску также сыграла свою негативную роль при оценке творчества Михаила Николаевича. В письме к Н. Ю. Икорниковой в феврале 1959 г. он отмечает: «Вчера я получил из Гостехиздата авторскую вёрстку своей работы “Траппы и рудоносные интрузии” и вожусь с ней вот уже второй день. Дело заключается не в самой корректуре, а в определении, что надо из работы ещё выкинуть, чтобы её “не завернули” в цензуре. Норильск числится в списках, и поэтому ко всему подходят с сугубой осторожностью»³. В одном из предыдущих писем звучит та же мысль: «Для Бетехтина я написал статью (для его нового журнала⁴) о генезисе сульфидных медно-никелевых месторождений. Там кроме общих рассуждений ничего нет, т. е. ничего конкретного, однако наш редакционный со-

¹ Письма М. Н. Годлевского жене Нине Юрьевне Икорниковой, подлинники, рукопись. РГАЭ Ф. 838, опись 1, дело № 155. (Здесь и далее упомянуты документы, хранящиеся в отделе личных фондов Российского государственного архива экономики и публикуемые впервые благодаря подготовке к печати книги «Из глубины норильских руд. Михаил Годлевский»).

² Там же.

³ Письма М. Н. Годлевского жене Н. Ю. Икорниковой, подлинники, рукопись. РГАЭ Ф. 838, опись 1, дело № 158.

⁴ Научный журнал «Геология рудных месторождений».



вет⁵, который даёт разрешение на печатание, работу забраковал, т. к., мол, есть “установка” (неписаная!) по Норильску ничего не публиковать. Не мог же я действие перенести на Луну! Всё это очень меня волнует и раздражает...»⁶. Особые обстоятельства, в которых велась работа М. Н. Годлевского, не позволяли оценить его истинный вклад в те или иные проблемы норильской геологии. Однако изучение не только опубликованных, но и фондовых материалов помогает воссоздать картину деятельности учёного.

Публикационная активность Михаила Николаевича всегда была очень высокой. Это характерно как для довоенного периода его творчества, так и для последующей деятельности, несмотря на отмеченные трудности. Ещё в 1937 г. Анатолий Капитонович Болдырев написал: «За истекшие 2 ½ года список Годлевского возрос до 26 названий, что составляет в среднем 10 работ в год. Это подтверждает ярко один из моих прежних выводов о большой производительности научной работы автора...». Сразу после амнистии появляются статьи Михаила Николаевича, посвящённые геологии Норильского района и его полезным ископаемым – угольным и никелевым месторождениям. Его продуктивность удивляет и вызывает восхищение, особенно учитывая тот факт, что, как написано в одном из писем, он «тринадцать с половиной лет не держал геологических книг в руках!» При появившейся возможности он быстро начинает навёрстывать упущенное время, читая иностранную литературу. Стоит ознакомиться со списками зарубежных источников в статьях и книгах М. Н. Годлевского, где он анализирует новейшие данные о геологии месторождений, минералогии, материалы экспериментальных исследований.

Список работ Михаила Николаевича довольно хорошо известен специалистам. Однако самая крупная его работа – докторская

диссертация «Траппы и сульфидные медно-никелевые месторождения Норильского района» (1959) – так и осталась неопубликованной, к огромному сожалению. Изданная в то же самое время книга «Траппы и рудоносные интрузии Норильского района» [6] представляет собой лишь её краткий реферат, не позволяющий полностью оценить вклад М. Н. Годлевского в проблему генезиса месторождений, так как многие важнейшие детали, которые обсуждаются в диссертации, остались за её пределами. Глубокий анализ геологических фактов, логика многочисленных выводов и общее построение теории рудообразования остались за рамками книги и, таким образом, не стали достоянием читателей. Докторская диссертация Михаила Николаевича Годлевского явилась той фундаментальной базой, на которой в дальнейшем происходило развитие главных направлений исследования магматизма и формирования руд как Норильского района, так и других территорий в нашей стране. Анализ этой работы необходим для понимания роли её автора в развитии теории магматического рудообразования, фактически отсутствовавшей в целостном виде в конце 1950-х годов.

Главной особенностью работы «Траппы и сульфидные медно-никелевые месторождения Норильского района», характерной для творчества Михаила Николаевича в целом, является чрезвычайно широкий охват проблемы формирования месторождений. Поражает объём диссертации – четыре книги общим объёмом текста в 1300 страниц и с более чем 300 рисунками, объединённые в два тома, каждый из которых состоит из двух частей. Первый том посвящён траппам, второй – месторождениям. Сам Годлевский характеризовал её так: «Так как вся работа (первая часть) представляет собой совершенно законченное целое (петрография севера Сибирской платформы, включая дифференцированные интрузии), то её собственно можно было бы защищать одну как докторскую. Но такая перемена фронта меня не устраивает. Я всё же в основном рудник и центр тяжести у меня в руде... Руду я не хочу оставлять за бортом, тем более что основ-

⁵ В письме речь идёт об учёном совете ВСЕГЕИ.

⁶ Письма М. Н. Годлевского жене Н. Ю. Икорниковой, подлинники, рукопись. РГАЭ Ф. 838, опись 1, дело № 157.

ные теоретические построения как раз относятся к рудам. Но теорию нельзя давать без описания месторождения, без минералогии и геохимии...». Этот чрезвычайно важный подход следует отметить особо, поскольку в современном мировом геологическом сообществе доминируют генетические построения, базирующиеся, как правило, на локальных данных, оторванных от геологического строения самих месторождений. Во многом это обусловлено бурным развитием аналитических методов в последние три десятилетия и их применением к разным объектам.

Диссертационная работа Михаила Николаевича читается как современное описание геологии норильских месторождений в силу вошедших в наше сознание введённых им представлений об образовании интрузивов и руд. Хотя она написана до открытия крупнейших месторождений Норильского района – Талнахского и Октябрьского, – принципиальные вопросы генезиса были решены М. Н. Годлевским уже на основании изучения месторождения Норильск I, хотя, как будет показано ниже, они оспариваются во многих современных публикациях.

Остановимся на главных достижениях Михаила Николаевича, нашедших обоснование в докторской диссертации.

1. Впервые отмечается *особая позиция Норильского района в структуре трапповой провинции*, которая подкрепляется ссылкой на новые геофизические данные того времени. Норильский район выделяется М. Н. Годлевским как особая петрографическая провинция в пределах Сибирской платформы, поскольку характеризуется гораздо большим разнообразием пород по сравнению с другими её частями. Именно здесь распространены высокомагнезиальные породы как эффузивного генезиса – пикриты и пикритовые базальты, так и интрузивы, в том числе дифференцированные, содержащие в своём составе пикритовые габбродолериты. Своеобразие района определяется и присутствием здесь субщелочных и щелочных пород обоих типов. На основании современных аналитических данных можно добавить, что сейчас этот район

рассматривается как особая геохимическая провинция, поскольку выделенные ранее высокомагнезиальные породы имеют совершенно разные геохимические характеристики и генезис.

2. Разработан *фациальный подход* при исследовании магматических пород района и проведении региональных работ. Это касается в первую очередь выделенных М. Н. Годлевским фаций – эффузивных и интрузивных пород. Своим большим достижением Михаил Николаевич считал составление геологической карты района масштаба 1 : 100 000, которую из-за секретности не удалось не только опубликовать, но и поместить в диссертацию. Он предполагал сделать секретной только эту карту, чтобы диссертация была доступна коллегам, в итоге пришлось ограничиться схемой геологического строения района (рис. 1), которая ничем не отличается от современных. Он очень огорчился по этому поводу: «Я уже убрал все горизонталы, объекты, но карта остаётся секретной...». Любой геолог знает, что геологическая карта – основа всех последующих работ. Это чрезвычайно важная часть работы М. Н. Годлевского в Норильске. Отрадно, что фациальный подход развивается в работах современных исследователей, в частности В. А. Радько в книге «Фации интрузивного и эффузивного магматизма Норильского района» [21].

3. Огромна роль М. Н. Годлевского в изучении магматических образований Норильского района. Он *впервые установил циклический характер проявленного в районе магматизма*, в котором принимали участие туфы, лавы и интрузивы. Были выделены четыре главных цикла – один пермский и три триасовых, во время которых образовывались либо только лавы, а потом интрузивы, либо они появлялись совместно. Анализ развития магматизма в таком ключе позволяет реконструировать его эволюцию как в пространстве, так и во времени. В настоящее время специалисты связывают цикличность магматизма с вариациями магнитного поля Земли и с определёнными импульсами, но при этом не указывают, что впервые данному вопросу были

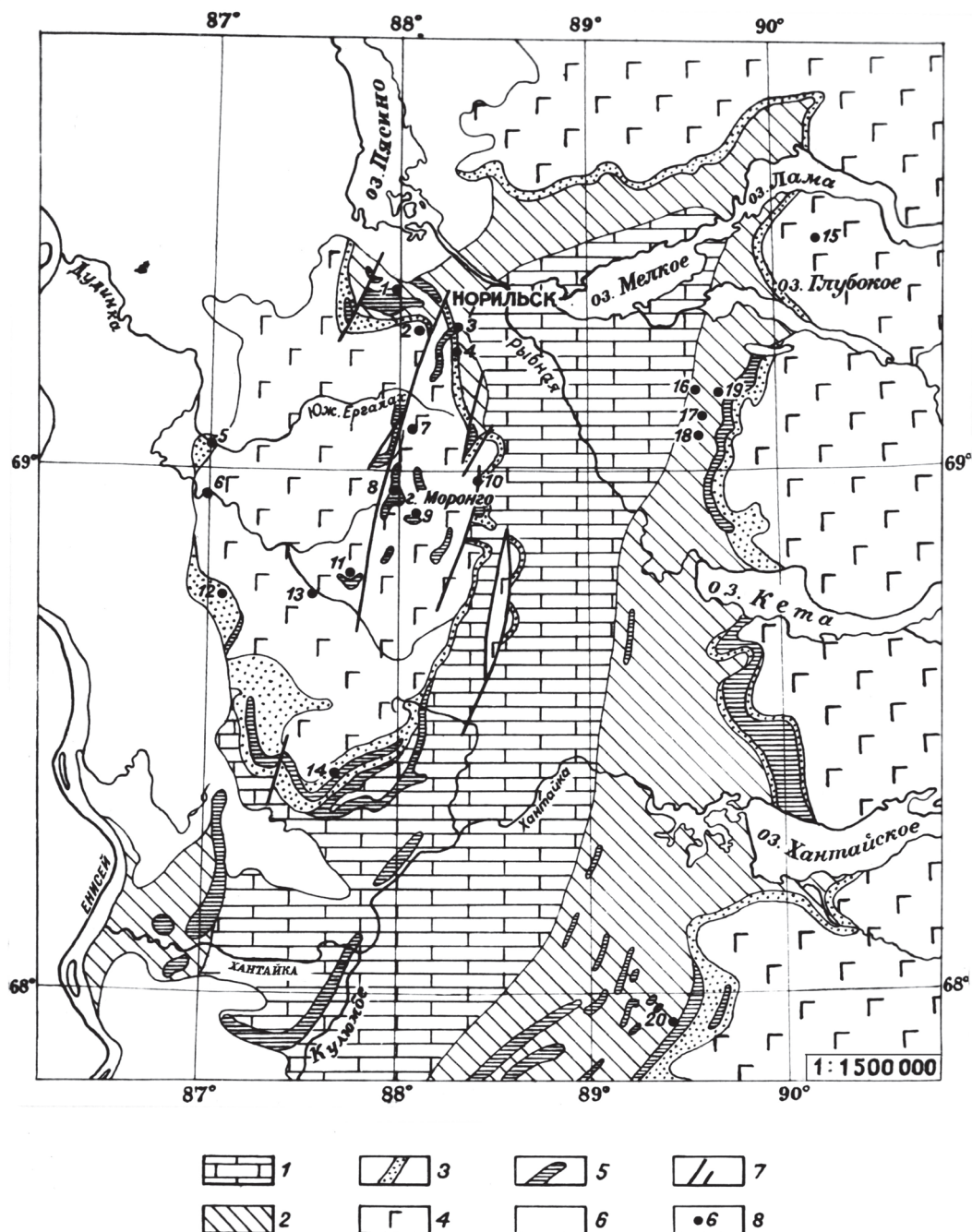


Рис. 1. Схематическая геологическая карта, составленная М. Н. Годлевским в 1957 г.:

1 – нижний палеозой морской; 2 – средний палеозой морской; 3 – верхний палеозой континентальный; 4 – лавовая толща; 5 – интрузии траппов; 6 – четвертичные отложения; 7 – опорные разрезы; 8 – рудопроявления

Fig. 1. Schematic geological map, compiled by M. N. Godlevsky in 1957:

1 – Lower Paleozoic, marine; 2 – Middle Paleozoic, marine; 3 – Upper Paleozoic, continental; 4 – lava sequence; 5 – trap intrusions; 6 – Quaternary deposits; 7 – reference sections; 8 – ore occurrences

посвящены специальные работы Михаила Николаевича Годлевского. В зарубежных же публикациях вообще не принимаются во внимание работы по строению геологии туфолоавовой толщи, начатые М. Н. Годлевским и продолженные по его инициативе геологами Норильской комплексной геологоразведочной экспедиции и другими организациями. Например, в статье С. Д. Бюргесса и Боуринга [26] только на основании изучения U-Pb системы в цирконах предложена схема туфы – базальты – интрузивы, которая не соответствует геологическим данным. Михаил Николаевич пытался отстоять свой приоритет в этом направлении геологического изучения района, когда писал Нине Юрьевне 19 декабря 1959 г.: «Заочно хочу получить из Норильска справку о том, когда мною был сдан в фонды отчёт по эффузивам и когда я делал первый доклад на эту тему. Во ВСЕГЕИ на годичной сессии я докладывал 4/IV 1956 года. На картах Урванцева этого времени ещё совершенно не расчленены эффузивы, что делает мой приоритет бесспорным». Он был доволен, что новая карта НИИГА «охватывает очень большую часть платформы и на всей этой колоссальной территории они приняли схему деления эффузивов, которая оказалась пригодна не только для Норильского района, но и далеко за его пределами. Словом, я, сидя в Норильске, предугадал строение лав на всей платформе. Мне кажется, что всё это надо опубликовать в печати»⁷.

4. Большое достижение М. Н. Годлевского – *установление факта начала магматизма в конце пермского периода* на основании изучения осадочных пород тунгусской серии, в которых появляются пепловые отложения, а затем лавы. На геологических картах района это нашло отражение ещё в конце 1950-х годов и в более поздних изданиях [10]; позже начало магматизма было подтверждено палеомагнитными данными, согласно которым породы самой ранней, ивакинской, свиты характери-

зуются обратной полярностью, типичной для конца пермской системы [29]. В настоящее время этот факт широко используется геологами всего мира при интерпретации массового вымирания жизни на Земле на границе перми и триаса, которое связывают с образованием в этот период Сибирских траппов [27, 39]. Несмотря на популярность названной версии исчезновения видов, она не может считаться доказанной, в первую очередь из-за недостаточной корректировки возраста самих траппов (как отмечал ещё Михаил Николаевич, основная их часть образовалась в триасе, т. е. после вымирания), но главное – из-за недостаточного объяснения причин этого вымирания, особенно на континентах.

5. М. Н. Годлевским было выполнено первое *определение позиции интрузивных образований в общей схеме развития магматизма на Сибирской платформе*. Он выделил несколько разных типов интрузивов – прообразы современных интрузивных комплексов [6]. В частности, субщелочные силлы представлены как аналоги ивакинской свиты (1-й цикл), самостоятельным внедрением магмы обусловлено появление дифференцированных рудоносных интрузивов (конец 3-го цикла), силлы габбродолеритов (катангский комплекс тогда уже существовал) близки к главному циклу вулканизма (4-й цикл), и завершают эволюцию более поздние секущие дайки, соответствующие интрузивам далдыканского комплекса.

Наиболее значимым в числе этих построений является, конечно, рассмотрение позиции рудоносных интрузивов и их связи с лавами. Михаил Николаевич отмечал своеобразие состава рудоносных интрузивов – их повышенную магнезиальность, пониженные содержания в породах титана и повышенные – хрома. Всё это существенно отличает их от типичных траппов и сближает с производными гипербазитовых магм, характеризующихся более глубинными условиями формирования, чем обычные базальты. Данные отличия неоднократно подчёркивались им в ряде работ.

Взаимоотношения рудоносных массивов с базальтами – чрезвычайно важный аспект ра-

⁷ Письма М. Н. Годлевского жене Н. Ю. Икорниковой, подлинники, рукопись. РГАЭ Ф. 838, опись 1, дело № 164.

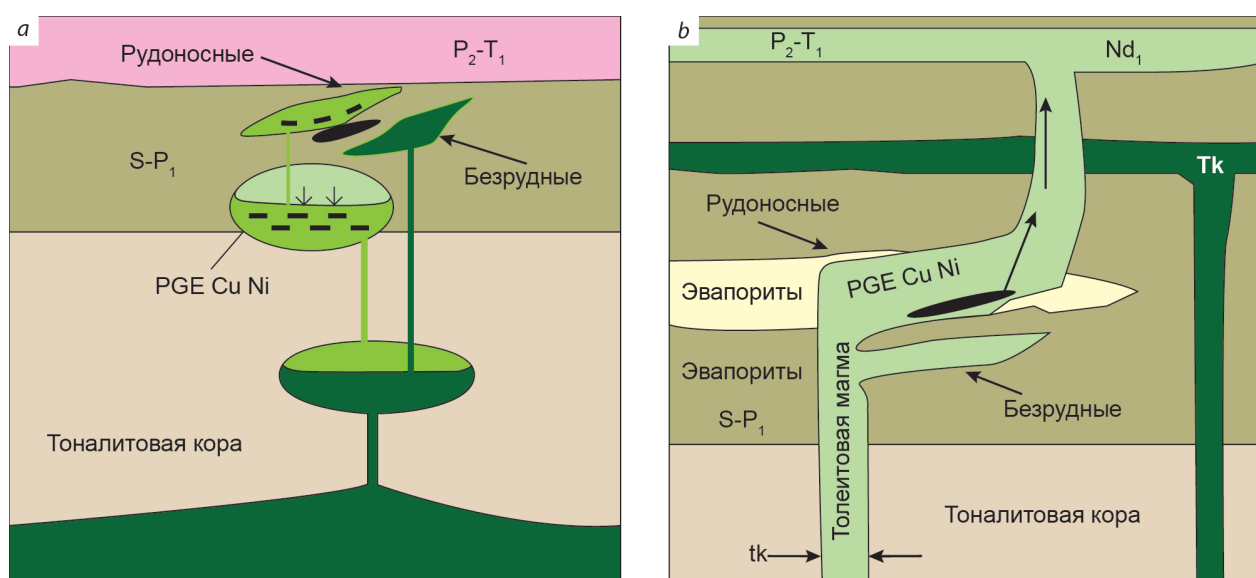


Рис. 2. Основные модели образования норильских месторождений:

a – в условиях закрытой магматической системы из специфической ультрабазитовой магмы, обогащённой металлами и летучими компонентами (М. Н. Годлевский, 1959; О. А. Дюжиков, 1988; А. П. Лихачёв, 1983, 2006, 2019); *b* – в условиях открытой магматической системы из обычной толеитовой магмы с рядовыми концентрациями металлов (В. А. Радько, 1991; А. J. Naldrett, 1992; P. C. Lightfoot et al., 1994; C. Li et al., 2009)

Fig. 2. The principal models of formation of the Norilsk ore deposits:

a – in closed magmatic system from specific ultrabasic magma, enriched in metals and volatile components (M.N. Godlevsky, 1959; O. A. Dyuzhikov, 1988; A.P. Likhachev, 1983, 2006, 2019); *b* – in open magmatic system from ordinary tholeiitic magma with ordinary concentrations of metals (V. A. Radko, 1991; A. J. Naldrett, 1992; P. C. Lightfoot et al., 1994; C. Li et al., 2009)

боты, приобретающий особое значение в свете обсуждения генезиса норильских руд, особенно активного в последние 30 лет. Это связано с публикацией В. А. Радько [20], в которой представлена модель образования сульфидов в единой магматической системе, связывающей интрузивы и базальты мокулаевской свиты (рис. 2). Согласно этой схеме, рудоносные интрузивы представляют собой горизонтальные части каналов, по которым магма поступала на поверхность. За счёт снижения скорости её течения при переходе от вертикальных к горизонтальным участкам существовавшие сульфиды (или частично образующиеся на месте) оседали на дно. Огромные массы протекавшей магмы, сформировавшей

значительную часть Сибирских траппов, позволили накопить большой объём сульфидов, образующих мощные залежи массивных руд норильских месторождений. Модель весьма привлекательна именно с точки зрения объяснения высокого содержания сульфидного вещества относительно силикатных пород (до 15 % объёма на Октябрьском месторождении). Идея была подхвачена западными геологами. Для доказательства связи интрузивов с лавами они привлекли данные по содержанию редких элементов в обоих типах пород, оказавшихся очень близкими, а также дополнили модель процессом ассимиляции магмой сульфатов (ангидритов) *in situ*. Последние рассматриваются как реальный источник се-

ры на месторождениях, поскольку обычный базальтовый расплав не даёт её необходимого количества для образования месторождения [33, 35]. Описанная модель стала господствующей в мире и применяется ко многим медно-никелевым месторождениям. При этом основные выводы Михаила Николаевича полностью игнорируются, а именно не принимается во внимание несоответствие составов лав и интрузивов. Но главным остаётся, конечно, отсутствие геологических доказательств связи рудоносных интрузивов с базальтами, хотя таковые имеются [31]. М. Н. Годлевский неоднократно подчёркивал, что руды образуются в закрытой камере [4, 6]. Таким образом, его выводы приобретают особое значение в наше время.

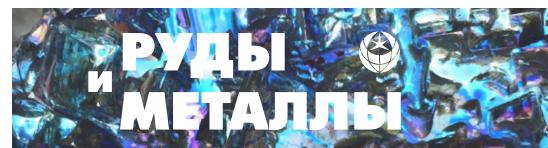
6. В связи со сказанным выше очень важное значение имели *детальное описание морфологии* интрузива Норильск 1 и построенный М. Н. Годлевским продольный разрез, который до сих пор приводят в публикациях, часто без ссылки на первоисточник. Впервые интрузив был описан Михаилом Николаевичем как хонолит с прогибами подошвы и более ровной кровлей; он охарактеризовал «выпахивание» магмой подстилающих пород при внедрении (в случае особых структурных условий). Сейчас данная тема также стала модной, поскольку этому процессу придаётся решающее значение в образовании приконтактовых сульфидных руд (в частности, в коматиитах). Следует отметить, что для других интрузивов Норильского района более характерна ленточная форма.

7. Было *детально рассмотрено внутреннее строение рудоносных интрузивов*, особенно месторождения Норильск 1, и *охарактеризованы условия их формирования*. В настоящий момент эти данные представляют большой интерес, так как структура интрузива Норильск 1 в целом уже не доступна прямым наблюдениям в связи с тем, что наиболее мощная центральная его часть отработана карьерами. Михаил Николаевич использовал наименования пород и буквенные обозначения горизонтов, предложенные В. К. Котульским (согласно записи в диссертации со ссыл-

кой на неопубликованные материалы), хотя и немного модифицировал их: в частности, он объединил нижний такситовый горизонт с контактовыми габбродолеритами (в то время породы назывались габбродиабазы, как палеотипные их аналоги). Следует отметить, что эти наименования пород и горизонтов сохраняются и в современных публикациях.

Наибольший интерес в работе представляют описания пикритовых габбродолеритов и пойкилоофитовых оливиновых габбродолеритов, названных «ядром» интрузива, остальные разновидности отнесены им к контактовым образованиям. В самых мощных разрезах пикритового горизонта М. Н. Годлевский отмечает слоистость, выражающуюся в накоплении оливина у подошвы прослоя, и насчитывает до 10 таких слоёв в 120-метровом горизонте! В настоящее время доступны только краевые части интрузива, где пикриты имеют мощность всего несколько метров и где подобная слоистость отсутствует. Михаил Николаевич обратил особое внимание на своеобразные крупнокристаллические породы, сложенные плагиоклазом, они часто встречаются внутри интрузива. Позже их изучение легло в основу кандидатской диссертации А. П. Лихачёва и его основополагающей статьи «Роль лейкократового габбро в формировании норильских дифференцированных интрузий» [17], несомненно, стимулированных наблюдениями М. Н. Годлевского. Эти работы отражают идею Михаила Николаевича о докамерной кристаллизации части магмы (абиссальная кристаллизация), успешно развитую в дальнейших работах А. П. Лихачёва, объяснившего во многом строение Талнахского и Хараелахского интрузивов и их руд за счёт оседания кристаллов оливина и сульфидов при изменении течения магмы от ламинарного к турбулентному [18].

8. М. Н. Годлевским *получены первые данные о составе породообразующих минералов*. Им прекрасно произведено петрографическое описание пород с изучением состава минералов, выполненное в то время с использованием столика Фёдорова. Несмотря на «домикрондзовую эпоху» проведения исследований,



были получены очень точные сведения о составе оливинов, пироксенов и плагиоклазов, подтверждённые современными аналитическими данными [22]. Следует отметить, что Михаил Николаевич не просто описал породы, а исходя из взаимоотношений и состава представил анализ условий их образования (оценку температур, давлений кристаллизации) с учётом экспериментальных данных (в частности, по пироксенам). Аналогичные описания редко встречаются в современных работах.

9. Впервые проведено *детальное геохимическое исследование* пород. Породообразующие оксиды были определены с помощью силикатного анализа, а примесные элементы (54 эл.) – с помощью спектрального. Конечно, Михаил Николаевич не выполнял аналитические работы, но отбор образцов, а главное обработку результатов анализов осуществлял сам тщательнейшим образом. С помощью метода Заварицкого он сумел подразделить интрузивы на разные типы, отличить рудоносные от безрудных. Он писал, что «приём Заварицкого самый совершенный, т. к. он без натяжек даёт естественную группировку окислов. Система Заварицкого помогла во многом при практических работах (например, у нас на Севере я установил промышленные интрузии по диаграммам Заварицкого. И все вновь открываемые интрузии дают те же диаграммы.) Особенно важны диаграммы Заварицкого при анализе дифференцированных серий, когда приходится сравнивать десятки и даже сотни анализов. Ну-ка, попробуй, без диаграммы разберись во всём этом! А диаграмма позволяет “проигрывать” анализ по двум векторам (или проекциям)».

Это был первый опыт обработки такого большого объёма проб. Полученные средневзвешенные составы для ряда интрузивов (Норильск 1, г. Зуб, Норильск 2) до сих пор применяются для сравнения с составами вновь обнаруженных массивов. Позже были получены многочисленные данные по составу пород Сибирской трапповой провинции [14]. Теперь аналогичные исследования проводятся с использованием современных аналитических ме-

тодов [19, 30], позволяющих очень точно определять концентрации элементов (в идеале – до 10-12), но фундаментальные геохимические характеристики основных интрузивов были получены уже в начале 1950-х годов.

10. *Впервые детально описаны жильные поля* месторождения Норильск 1. Приведённые М. Н. Годлевским данные совершенно бесценны. Он детально описывает рудные тела разных жильных полей, которые уже не известны нам вследствие их отработанности. Наибольший интерес представляет характеристика сульфидных шлиров, расположенных внутри интрузива и окружённых сульфидной вкрапленностью, которая формирует как бы «хвост» типа кометы и указывает направления движения – передняя часть отличается очень маломощным ореолом вкрапленности, а задняя – длинным шлейфом. Михаил Николаевич делает справедливый вывод о формировании шлира в докамерных условиях и внедрении его вместе с магмой в интрузивную камеру. Иногда такие шлиры имеют расслоенное строение, аналогичное вкрапленным рудам – сверху они халькопиритового состава, а внизу – пирротинового (что сейчас обсуждается во многих современных работах, особенно зарубежных геологов). Годлевским также описана крупная сульфидная жила в приконтактной части интрузива (рис. 3), имеющая зональное строение. Размеры жил были достаточно большие, мощность одной из них достигала 20 м в раздуве! Михаилом Николаевичем детально описаны вертикальные жилы, которые существовали в самой прогнутой части интрузива. Он изучил трещинную тектонику массива Норильск 1, на основании чего сделал выводы о формировании сульфидных жильных тел в тангенциальных по отношению к удлинению массива трещинах. Несмотря на открытие уникальных месторождений Талнахского рудного узла и их значение для мировой экономики, подобных описаний для них не было сделано за 60 лет разведки и эксплуатации! А ведь главная залежь Октябрьского месторождения уже также выработана, кроме схемы её зональности в литературе почти не осталось сведений о ней.

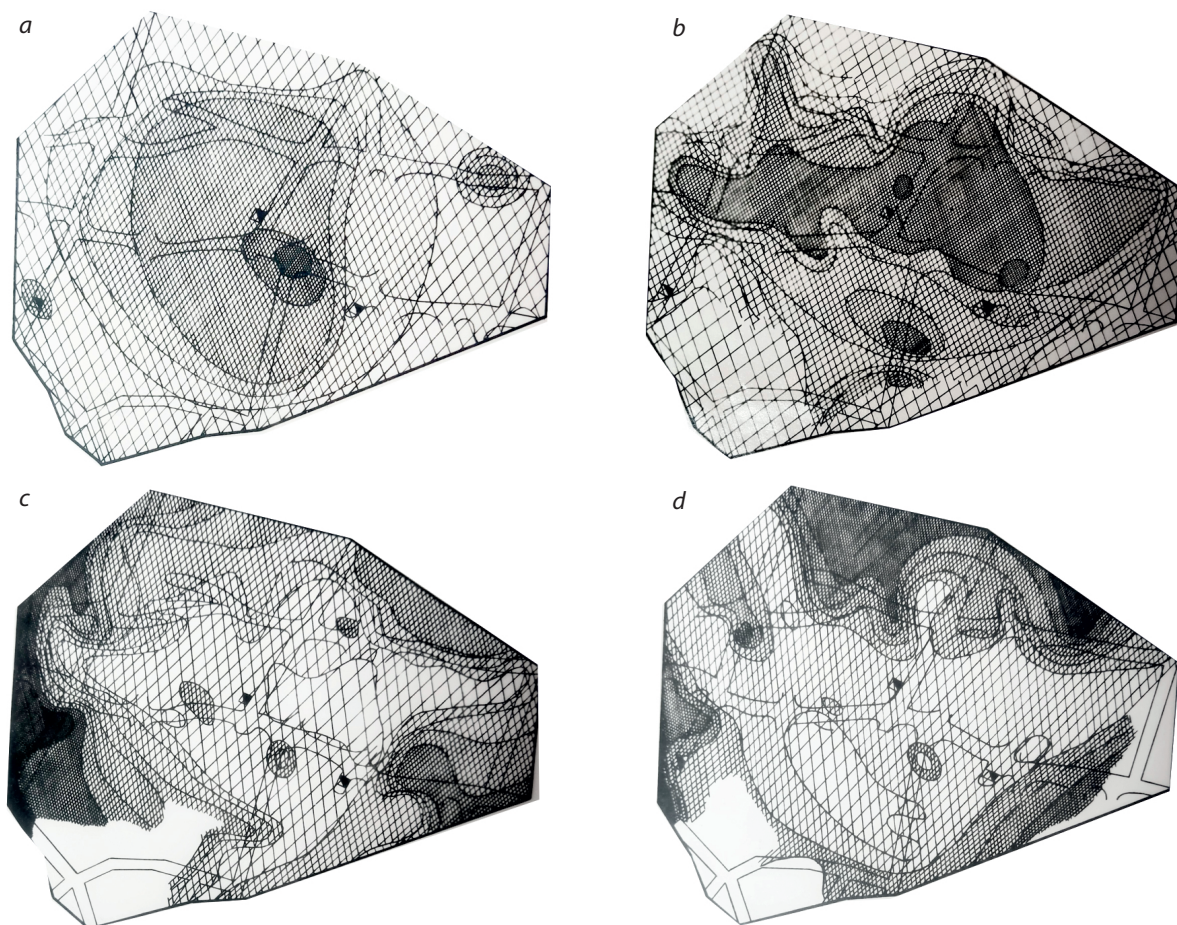


Рис. 3. Структура сульфидной жилы района скважины 415:

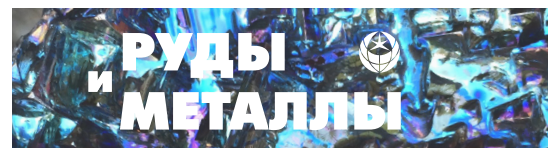
a – план изолиний мощности (градации по интенсивности штриховки от центра к периферии, в м: полностью закрашенное поле > 5 м, далее – 4–5, 3–4, 2–3, 1–2, 0,08–1); *b* – распределение пирротина, *c* – пентландита, *d* – халькопирита (градации по уменьшению количества в жиле от плотной штриховки к редкой)

Fig. 3. Structure of a sulfide vein in the vicinity of Borehole 415:

a – plan of thickness isolines (gradations by the intensity of shading, from the center to the periphery, in m: the completely shaded field, > 5 m; then – 4–5, 3–4, 2–3, 1–2, 0.08–1 m); *b* – distribution of pyrrhotite, *c* – pentlandite, *d* – chalcopyrite (gradations from dense to rare shading, according to decreasing in the mineral abundance in the vein)

11. Выполнено *первое систематическое описание руд*: текстур и структур рудных минералов, их ассоциаций, последовательности выделения, химического состава. Михаил Николаевич отмечает, что каждый минерал имеет несколько генераций (халькопирит, пирротин, пентландит), причём указывает, что пентландит встречается не только в струк-

турах распада, но и кристаллизуется из расплава. Охарактеризованы весьма разные разновидности руд – от обычных халькопирит-пирротиновых до халькопирит-кубанитовых и халькопирит-борнитовых! Последние мы теперь не видим. Аналогичные руды найдены в юго-западной ветви Талнахского месторождения [40]. М. Н. Годлевский впервые от-



метил отличие норильских месторождений от других месторождений мира, заключающееся в высоком отношении содержания меди к никелю в составе руд.

Пожалуй, именно работы по изучению минерального состава руд получили наибольшее развитие в последующие годы. Это обусловлено двумя причинами: появлением локального микрорентгеноспектрального анализа и открытием уникальных по составу месторождений Талнахского рудного узла. Уже в конце 1950-х годов М. Н. Годлевский использовал первые появившиеся данные А. Д. Генкина по платиновым минералам [1], хотя некоторые фазы (самородное золото, сперрилит) были обнаружены им самим в аншлифах. За прошедшие десятилетия (с января 1960 г. – то есть даты защиты докторской диссертации М. Н. Годлевского) открыто огромное количество новых минералов в рудах, преимущественно элементов платиновой группы [13, 41 и др.], а также названный в честь Михаила Николаевича сульфид никеля – годлевскит [15]. Данные об этих открытиях обобщены А. Д. Генкиным ещё в 1981 г. [2]. С тех пор обобщающие работы по минералогии руд не появлялись, и генетическая интерпретация новых парагенезисов, к сожалению, отстаёт от фактических данных. Важным событием явилось обнаружение нового типа руд – малосульфидного, которому в настоящее время уделяется много внимания [23].

12. С характеристикой руд в экзоконтактах интрузивов тесно связано *первое описание метаморфических и метасоматических ореолов*, развитых вокруг массивов. Это направление, заложенное М. Н. Годлевским, также получило интенсивное развитие в работах его учеников – В. В. Юдиной, Д. М. Туровцева и др. Квинтэссенцией исследований можно считать книгу последнего [24], в которой обобщены многочисленные данные, накопленные за многие годы работы в Норильском районе (1960–2002 гг.).

13. Для обоснования генезиса норильских месторождений М. Н. Годлевский анализирует строение и условия образования главных никелевых месторождений мира по литера-

турным данным, сгруппировав их с учётом тектоническим обстановок. Удивительно строение и особенности месторождений Канады (Садбери и более мелких), Южной Африки (Бушвельда, Инсизвы), Балтийского щита (Мончегорского района, Печенги, месторождений Норвегии, Швеции), – настолько логично обобщён Михаилом Николаевичем огромный опубликованный материал, выделено главное и отброшено второстепенное!

В период, когда М. Н. Годлевский писал диссертацию, противоборствовали две главные гипотезы образования медно-никелевых месторождений – магматическая и гидротермальная. Последнюю отстаивал Н. А. Елисеев на примере месторождений Кольского полуострова. Михаил Николаевич внимательно и вдумчиво оценивает факты «за» и «против» обеих гипотез для конкретных месторождений. В большинстве случаев он делает выводы о магматическом происхождении руд, хотя для ряда объектов конец процесса мог быть связан с действием флюидов и приводит в небольшом объёме к гидротермальным образованиям. Сам он писал: «Я завидую тем лицам, которые ни в чём никогда не сомневаются, которые твёрдо верят либо в Боуэна, либо в Коржинского, либо в Рейнольдса. Для меня же подчас мучительно трудно остановиться на чём-либо, ибо часто имеется столько же аргументов в пользу одной точки зрения, сколько и для диаметрально противоположной... Конечно, опыт на многое открывает глаза, но хотя лаборатория – это часть природы и всё в лаборатории происходит по её законам, но системы, с которыми вы работаете, до смешного упрощены и, вероятно, достаточно внести какое-либо одно добавочное условие, чтобы всё пошло прахом».

Большое внимание Михаил Николаевич уделил вопросу о возможных источниках серы в месторождениях Норильского района. Он был инициатором изучения её изотопного состава в сульфидах [7], которым потом многих лет занималась Л. Н. Гриненко [11, 28]. Первоначальное предположение об ассимиляции расплавом серы из вмещающих пород,

казалось, подтвердилось тяжёлым изотопным составом сульфидов в рудах (до $\delta^{34}\text{S}$ до 18 ‰), но затем Л. Н. Гриненко на основании масс-балансовых расчётов (отсутствие предполагаемого обогащения кальцием пород) пришла к выводу о комплексном характере серы: возможном поступлении из расплава и газовых залежей Сибири [28]. Михаил Николаевич, выделяя в верхних зонах интрузивов гибридные породы, образованные за счёт дифференциации исходного расплава и ассимиляции им вмещающих пород, признавал их незначительный объём относительно основного объёма интрузивных тел (что имело важное значение при подсчёте средневзвешенного состава отдельных массивов). В настоящее время идея ассимиляции магмами вмещающих пород вновь продолжает развиваться в работах многих российских и зарубежных учёных [32, 38]. Но, несмотря на огромный массив полученных данных [37], принципиально новых выводов не сделано и явные доказательства ассимиляции не приводятся.

Таким образом, М. Н. Годлевским детальнейшим образом рассмотрен процесс образования месторождений: от внедрения специфических магм на северо-западе Сибирской платформы в конце второго триасового цикла магматизма через начало их абиссальной кристаллизации и ликвации до гипабиссальной кристаллизации и образования сингенетической вкрапленности во внутрикамерных условиях и формирования эпигенетической (отжаты) сульфидной минерализации в окружающих породах. При этом Михаилом Николаевичем были определены термодинамические условия кристаллизации пород и руд (температура, давление) с привлечением физико-химических диаграмм (фугитивность серы, кислорода) [8, 9].

Столь многогранных работ по генезису норильских месторождений не появилось до сих пор. Отдельные направления, рассмотренные М. Н. Годлевским, нашли развитие в исследованиях многих геологов: региональное изучение магматических пород – в работах В. В. Золотухина и его коллег из Новосибирска (ИГиГ СО АН СССР), образование магм и интрузи-

вов – в работах А. П. Лихачёва (ЦНИГРИ), исследование контактовых ореолов интрузивов – в работах В. В. Юдиной, Д. М. Туровцева и др. (ЦНИГРИ), изучение минералогии руд – в работах сотрудников ИГЕМ под руководством А. Д. Генкина, а также О. Е. Юшко-Захаровой в ИМГРЭ, изотопии серы – в работах Л. Н. Гриненко (МГУ), К. Н. Малича и О. В. Петрова (ВСЕГЕИ) и зарубежных коллег (Э. Рипли, Ч. Ли в Университете Индианы, США), а также многих других.

Однако создание достаточно стройной теории образования месторождений в 1960 г. не означает окончательного решения проблемы генезиса уникальных норильских руд. Во-первых, потому, что в то время ещё не была экспериментально показана низкая растворимость серы в базитовых расплавах (0,2 мас. %, а Михаил Николаевич ссылается на опыты с 6–8 % серы в расплавах, что достаточно для образования руд), а во-вторых, не были известны низкие содержания летучих компонентов в магмах, в частности воды, особенно в магмах платформенного типа [36]. Последнее практически снимает вопрос о гидротермальном происхождении руд. За исключением некоторых предложенных экзотических теорий [34] магматический генезис руд в настоящее время получил практически всеобщее признание. Он однозначно доказан благодаря обнаружению С. Ф. Служеникиным в жилах рудника Морозова закалённых твёрдых растворов сульфидов [12], которые ранее были получены в экспериментах с сульфидными расплавами при высоких температурах.

Однако вопросы об источниках серы и механизмах концентрирования сульфидов остаются открытыми. Большой вклад в магмогенную теорию рудообразования внёс А. П. Лихачёв, который последовательно старался решить проблемы происхождения исходных магм, их кристаллизации, переноса сульфидов и изотопного фракционирования серы [16]. Наряду с этим продолжает развиваться идея единой системы интрузивов с лавами, причём отвергается описанная Михаилом Николаевичем гравитационная сепарация сульфидов, а предполагается их всплы-



вание в магме за счёт летучих компонентов («пузырей») [25]. Названные противоречия тормозят создание адекватной теории образования норильских месторождений.

Разработка генетической модели норильских месторождений чрезвычайно важна для дальнейших успешных поисков новых интрузивов с богатыми сульфидными рудами не только в Сибири, но и в других трапповых

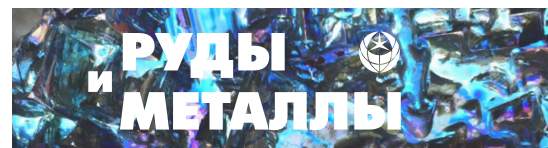
провинциях Земли, чему придавал огромное значение М. Н. Годлевский. Хочется верить, что непротиворечивая теория образования руд, соответствующая геологическим данным, будет создана новыми исследователями на базе разработанных Михаилом Николаевичем теоретических положений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект 22-27-00378).

Список литературы

1. Генкин А. Д. О закономерностях срастания магнетита и пирротина // Записки Всесоюзного минералогического общества. – 1950. – Ч. XXIX, № 3. – С. 229–230.
2. Генкин А. Д., Дистлер В. В., Гладышев Г. Д. [и др.]. Сульфидные медно-никелевые руды норильских месторождений. – М.: Наука, 1981. – 295 с.
3. Годлевский М. Н. Геология и рудные месторождения Норильского района // Горный журнал. – 1958. – № 6. – С. 9–14.
4. Годлевский М. Н. К вопросу о генезисе сульфидных медно-никелевых месторождений на Сибирской платформе // Геология рудных месторождений. – 1959. – № 2. – С. 17–30.
5. Годлевский М. Н. Магматические месторождения // Генезис эндогенных рудных месторождений. – М.: Недра, 1968. – С. 7–83.
6. Годлевский М. Н. Траппы и рудоносные интрузии Норильского района. – М.: Госгеолтехиздат, 1959. – 68 с.
7. Годлевский М. Н., Гриненко Л. Н. Некоторые данные об изотопном составе серы сульфидов норильских месторождений // Советская геология. – 1963. – № 1. – С. 27–39.
8. Годлевский М. Н., Лихачев А. П. Медно-никелевое оруденение в Норильском районе // Генетические модели эндогенных рудных формаций. – Новосибирск: Наука, 1983. – Т. 1. – С. 47–54.
9. Годлевский М. Н., Лихачев А. П. Условия зарождения и кристаллизации рудоносных магм, формирующих медно-никелевые месторождения // Основные параметры природных процессов эндогенного рудообразования. – Новосибирск: Наука. – 1987. – С. 109–118.
10. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (новая версия). Лист R(45)-47. Норильск. Объяснительная записка. – СПб.: Издательство ВСЕГЕИ, 2000. – 479 с.
11. Гриненко Л. Н. Сероводородсодержащие газовые залежи как источник серы при сульфуризации магм промышленно-рудноносных интрузий Норильского района // Доклады Академии наук СССР. – 1984. – Т. 278, № 3. – С. 730–732.
12. Дистлер В. В., Кулагов Э. А., Служеникин С. Ф., Лапутина И. П. Закалённые сульфидные твёрдые растворы в рудах Норильского месторождения // Геология рудных месторождений. – 1996. – Т. 38, № 1. – С. 41–53.
13. Евстигнеева Т. Л., Генкин А. Д., Коваленкер В. А. Новый висмутид палладия – соболевскит – и номенклатура минералов системы PdBi-PdTe-PdSb // Записки Всесоюзного минералогического общества. – 1975. – Ч. 104, Вып. 5. – С. 568.
14. Золотухин В. В., Лагута О. Н. О фракционировании магнезиальных базитовых расплавов и многообразии траппов на Сибирской платформе // Доклады Академии наук СССР. – 1985. – Т. 280, № 4. – С. 967–972.
15. Кулагов Э. А., Евстигнеева Т. Л., Юшко-Захарова О. Е. Новый сульфид никеля – годлевскит // Геология рудных месторождений. – 1969. – № 3. – С. 115–121.
16. Лихачёв А. П. Возможность самообогащения рудным веществом и тяжёлым изотопом серы (³⁴S) мантийных магм, формирующих Cu-Ni месторождения и перспективное место для локализации руд в Норильском районе // Отечественная геология. – 2019. – № 3. – С. 1–18.
17. Лихачёв А. П. Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения. – М.: Эслан, 2006. – 496 с.
18. Лихачёв А. П. Роль лейкократового габбро в формировании норильских дифференцированных интрузий // Известия Академии наук СССР. Серия геологическая. – 1965. – № 12. – С. 50–66.

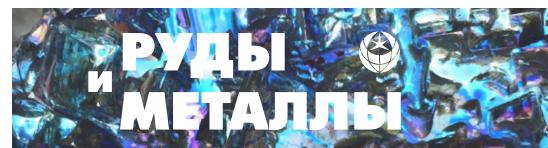
19. *Нестеренко Г. В., Авилова Н. С., Смирнова Н. П.* Редкие элементы в траппах Сибирской платформы // *Геохимия*. – 1964. – № 10. – С. 1015–1021.
20. *Радько В. А.* Модель динамической дифференциации интрузивных траппов северо-запада Сибирской платформы // *Геология и геофизика*. – 1991. – № 11. – С. 19–27.
21. *Радько В. А.* Фации интрузивного и эффузивного магматизма Норильского района. – СПб. : ВСЕГЕИ, 2016. – 226 с.
22. *Рябов В. В., Шевко А. Я., Гора М. П.* Магматические породы Норильского района. – Новосибирск : Нонпарель, 2000. – Т. 1, 2.
23. *Служеникин С. Ф., Дистлер В. В., Дюжиков О. А. [и др.]* Малосульфидное платиновое оруденение в норильских дифференцированных интрузивах // *Геология рудных месторождений*. – 1994. – Т. 36, № 3. – С. 195–217.
24. *Туровцев Д. М.* Контактный метаморфизм норильских интрузий. – М. : Научный мир, 2002. – 318 с.
25. *Barnes S. J. [et al.]* Droplets and bubbles: solidification of sulphide-rich vapour-saturated orthocumulates in the Norilsk-Talnakh Ni–Cu–PGE ore-bearing intrusions // *Journal of Petrology*. – 2019. – V. 60, № 2. – P. 269–300.
26. *Burgess S. D., Bowring S. A.* High-precision geochronology confirms voluminous magmatism before, during, and after Earth's most severe extinction. *Science Advances*. – 2015. – № 1. – e1500470.
27. *Campbell I. H., Czamanske G. K., Fedorenko V. A., Hill R. I., Stepanov V. K.* Synchronism of the Siberian Traps and the Permian-Triassic boundary // *Science*. – 1992. – V. 258. – P. 1760–1763.
28. *Grinenko L. N.* Sources of sulfur of the nickeliferous and barren gabbrodolerite intrusions of the northwest Siberian platform // *International Geology Review*. – 1985. – V. 27. – P. 695–708.
29. *Gurevich E., Heuneman C., Rad'ko V., Westphal M., Bachtadse V., Pozzi J. P., Feinberg H.* Paleomagnetism and magnetostratigraphy of the Permian-Triassic northwest central Siberian Trap Basalts // *Tectonophysics*. – 2000. – V. 379. – P. 211–226.
30. *Hawkesworth C. J., Lightfoot P. C., Fedorenko V. A. [et al.]* Magma differentiation and mineralization in the Siberian continental flood basalts // *Lithos*. – 1995. – V. 34. – P. 61–81.
31. *Krivolutskaya N., Gongalsky B., Kedrovskaya T., Kubrakova I., Tyutyunnik O., Chikatueva V., Bychkova Y., Kovalchuk E., Yakushev A., Kononkova N.* Geology of the Western Flanks of the Oktyabr'skoe Deposit, Noril'sk District, Russia : Evidence of a Closed Magmatic System // *Mineralium Deposita*. – 2019. – V. 54. – P. 611–630.
32. *Li C., Naldrett A. J., Shmitt A. K. [et al.]* Magmatic anhydrite-sulfide assemblages in plumbing system of the Siberian Traps // *Geology*. – 2009. – V. 37. – P. 259–262.
33. *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*. – 2009. – № 104. – P. 291–301.
34. *Lightfoot P. C., Zotov I. A.* Geological Relationships between intrusions, country rocks and Ni-Cu-PGE sulfides in the Kharaelakh intrusion, Noril'sk region: implication to the role of sulfide differentiation and metasomatic in their genesis // *Northeastern Geology*. – 2014. – V. 47, № 1. – P. 1–35.
35. *Naldrett A. J.* A model for the Ni-Cu-PGE ores of the Noril'sk region and its application to other areas of flood basalts // *Economic Geology*. – 1992. – V. 87. – P. 1945–1962.
36. *Naumov V. B., Dorofeeva V. A., Girnis A. V., Yarmolyuk V. V.* Mean Contents of Volatile Components, Major and Trace Elements in Magmatic Melts in Major Geodynamic Environments on Earth. I. Mafic Melts // *Geochemistry International*. – 2017. – V. 55 – P. 629–653.
37. *Petrov O. V.* Isotope Geology of the Norilsk Deposits. – Springer : Berlin/Heidelberg, Germany, 2019. – 306 p.
38. *Ripley E. M., Li C., Craig H. [et al.]* Micro-scale S isotope studies of the Kharaelakh intrusion, Noril'sk region, Siberia: Constraints on the genesis of coexisting anhydrite and sulfide minerals // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2010. – V. 74. – P. 634–644.
39. *Sobolev S. V., Sobolev A. V., Kuzmin D. V., Krivolutsкая N. A., Petrunin A. G., Arndt N. T., Rad'ko V. A., Vasil'ev Yu. R.* Linking mantle plumes, large igneous provinces and environmental catastrophes // *Nature*. – 2011. – V. 477. – P. 312–316.
40. *Tolstykh N. [et al.]* Unique Cu-rich sulphide ores of the Southern-2 orebody in the Talnakh Intrusion, Noril'sk area (Russia): Geochemistry, mineralogy and conditions of crystallization // *Ore Geology Reviews*. – 2020. – V. 122. – P. 103525.
41. *Vymazalová A. [et al.]* Sluzhenikinite, Pd₁₅(Sb_{7-x}Sn_x)₃ ≤ x ≤ 4, a new platinum group mineral (PGM) from the Oktyabr'sk deposit, the Norilsk deposits, Russia // *Mineralogical Magazine*. – 2022. – V. 86, № 4. – P. 577–585.



References

1. Genkin A. D. O zakonmernostyakh srastaniya magnetita i pirrotina [On the patterns of intergrowth of magnetite and pyrrhotite], *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva* [Notes of the All-Union mineralogical society], 1950, V. XXIX, No 3, pp. 229–230. (In Russ.).
2. Genkin A. D., Distler V. V., Gladyshev G. D. [et al.]. Sul'fidnye medno-nikelevye rudy noril'skikh mestorozhdenii [Sulfide copper-nickel ores of the Norilsk deposits], Moscow, Nauka Publ., 1981, 295 p.
3. Godlevskii M. N. Geologiya i rudnye mestorozhdeniya Noril'skogo raiona [Geology and ore deposits of the Norilsk region], *Gornyi zhurnal* [Mining journal], 1958, No 6, pp. 9–14. (In Russ.).
4. Godlevskii M. N. K voprosu o genezise sul'fidnykh medno-nikelevykh mestorozhdenii na Sibirskoi platforme [On the issue of the genesis of sulfide copper-nickel deposits on the Siberian platform], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of ore deposits], 1959, No 2, pp. 17–30. (In Russ.).
5. Godlevskii M. N. Magmatische mestorozhdeniya [Magmatic deposits], *Genezis endogennykh rudnykh mestorozhdenii* [Genesis of endogenous ore deposits], Moscow, Nedra Publ., 1968, pp. 7–83.
6. Godlevskii M. N. Trappy i rudonosnye intruzii Noril'skogo raiona [Traps and ore-bearing intrusions of the Norilsk region], Moscow, Gosgeoltekhizdat Publ., 1959, 68 p.
7. Godlevskii M. N., Grinenko L. N. Nekotorye dannye ob izotopnom sostave sery sul'fidov noril'skikh mestorozhdenii [Some data on the isotopic composition of sulfur in sulfides of Norilsk deposits], *Sovetskaya geologiya* [Soviet Geology], 1963, No 1, pp. 27–39. (In Russ.).
8. Godlevskii M. N., Likhachev A. P. Medno-nikelevoe orudnenie v Noril'skom raione [Copper-nickel mineralization in the Norilsk region], *Geneticheskie modeli endogennykh rudnykh formatsii* [Genetic models of endogenous ore formations], Novosibirsk, Nauka Publ., 1983., V. 1, pp. 47–54.
9. Godlevskii M. N., Likhachev A. P. Usloviya zarozhdeniya i kristallizatsii rudonosnykh magm, formiruyushchikh medno-nikelevye mestorozhdeniya [Conditions for the origin and crystallization of ore-bearing magmas that form copper-nickel deposits], *Osnovnye parametry prirodnykh protsessov endogenogo rudoobrazovaniya* [Basic parameters of natural processes of endogenous ore formation], Novosibirsk, Nauka, 1987, pp. 109–118.
10. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoi Federatsii. Masshtab 1 : 1 000 000 (novaya sersiya). List R(45)-47. Noril'sk. Ob"yasnitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1 000 000 (new version). Sheet R(45)-47. Norilsk. Explanatory note], Saint-Petersburg, VSEGEI Publ., 2000, 479 p.
11. Grinenko L. N. Serovodorodsoderzhashchie gazovye zalezhi kak istochnik sery pri sul'furizatsii magm promyshlenno-rudonosnykh intruzii Noril'skogo raiona [Hydrogen sulfide-bearing gas deposits as a source of sulfur during the sulfurization of magmas of commercial ore-bearing intrusions in the Norilsk region], *Doklady Akademii nauk SSSR* [Reports of the Academy of Sciences of the USSR], 1984, V. 278, No 3, pp. 730–732. (In Russ.).
12. Distler V. V., Kulagov E. A., Sluzhenikin S. F., Laputina I. P. Zakalennye sul'fidnye tverдые rastvory v rudakh Noril'skogo mestorozhdeniya [Hardened sulfide solid solutions in the ores of the Norilsk deposit], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of ore deposits], 1996, V. 38, No 1, pp. 41–53. (In Russ.).
13. Evstigneeva T. L., Genkin A. D., Kovalenker V. A. Novyi vismutid palladiya – sobolevskit – i nomenklatura mineralov sistemy PdBi-PdTe-PdSb [New palladium bismuthide – sobolevskite – and the nomenclature of minerals of the PdBi-PdTe-PdSb system], *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva* [Notes of the All-Union mineralogical society], 1975, V. 104, I. 5, p. 568.
14. Zolotukhin V. V., Laguta O. N. O fraktsionirovanii magnezial'nykh bazitovykh rasplavov i mnogoobrazii trappov na Sibirskoi platforme [On Fractionation of Magnesian Mafic Melts and Diversity of Traps on the Siberian Platform], *Doklady Akademii nauk SSSR* [Reports of the Academy of Sciences of the USSR], 1985, V. 280, No. 4, pp. 967–972. (In Russ.).
15. Kulagov E. A., Evstigneeva T. L., Yushko-Zakharova O. E. Novyi sul'fid nikelya – godlevskit [New nickel sulfide – godlevskite], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of ore deposits], 1969, No 3, pp. 115–121. (In Russ.).
16. Likhachev A. P. Vozmozhnost' samoobogashcheniya rudnym veshchestvom i tyazhelym izotopom sery (³⁴S) mantiynykh magm, formiruyushchikh Cu-Ni mestorozhdeniya i perspektivnoe mesto dlya lokalizatsii rud v Noril'skom raione [Possibility of self-enrichment in ore matter and heavy sulfur isotope (³⁴S) of mantle magmas forming Cu-Ni

- deposits and a promising place for ore localization in the Norilsk region], *Otechestvennaya geologiya* [*National geology*], 2019, No 3, pp. 1–18. (In Russ.).
17. Likhachev A. P. Platino-medno-nikelevye i platino-vye mestorozhdeniya [Platinum-copper-nickel and platinum deposits], Moscow, Eslan Publ., 2006, 496 p.
 18. Likhachev A. P. Rol' leikokratovogo gabbro v formirovaniy noril'skikh differentsirovannykh intruzii [The role of leucocratic gabbro in the formation of differentiated Norilsk intrusions], *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya geologicheskaya* [*Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Geological series*], 1965, No 12, pp. 50–66. (In Russ.).
 19. Nesterenko G. V., Avilova N. S., Smirnova N. P. Redkie elementy v trappakh Sibirskoi platformy [Rare elements in the traps of the Siberian platform], *Geokhimiya* [*Geochemistry International*], 1964, No 10, pp. 1015–1021. (In Russ.).
 20. Rad'ko V. A. Model' dinamicheskoi differentsiatsii intruzivnykh trappov severo-zapada Sibirskoi platformy [Model of dynamic differentiation of intrusive traps in the northwest of the Siberian Platform], *Geologiya i geofizika* [*Russian Geology and Geophysics*], 1991, No 11, pp. 19–27. (In Russ.).
 21. Rad'ko V. A. Fatsii intruzivnogo i effuzivnogo magmatizma Noril'skogo raiona [Facies of intrusive and effusive magmatism in the Norilsk region], Saint-Petersburg, VSEGEI Publ., 2016, 226 p.
 22. Ryabov V. V., Shevko A. Ya., Gora M. P. Magmaticheskie porody Noril'skogo raiona [Igneous rocks of the Norilsk region], Novosibirsk, Nonparel' publ., 2000, V. 1, 2.
 23. Sluzhenikin S. F., Distler V. V., Dyuzhikov O. A. [et al.]. Malosul'fidnoe platinovoe orudnenie v noril'skikh differentsirovannykh intruzivakh [Low-sulfide platinum mineralization in the Norilsk differentiated intrusions], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [*Geology of ore deposits*], 1994, V. 36, No 3, pp. 195–217. (In Russ.).
 24. Turovtsev D. M. Kontaktovyi metamorfizm noril'skikh intruzii [Contact metamorphism of the Norilsk intrusions], Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2002, 318 p.
 25. Barnes S. J. [et al.]. Droplets and bubbles: solidification of sulphide-rich vapour-saturated orthocumulates in the Norilsk-Talnakh Ni–Cu–PGE ore-bearing intrusions, *Journal of Petrology*, 2019, V. 60, No 2, pp. 269–300.
 26. Burgess S. D., Bowring S. A. High-precision geochronology confirms voluminous magmatism before, during, and after Earth's most severe extinction, *Science Advances*, 2015, 1, e1500470.
 27. Campbell I. H., Czamanske G. K., Fedorenko V. A., Hill R. I., Stepanov V. K. Synchronism of the Siberian Traps and the Permian-Triassic boundary, *Science*, 1992, V. 258, pp. 1760–1763.
 28. Grinenko L. N. Sources of sulfur of the nickeliferous and barren gabbrodolerite intrusions of the northwest Siberian platform, *International Geology Review*, 1985, V. 27, pp. 695–708.
 29. Gurevich E., Heuneman C., Rad'ko V., Westphal M., Bachtadse V., Pozzi J. P., Feinberg H. Paleomagnetism and magnetostratigraphy of the Permian–Triassic northwest central Siberian Trap Basalts, *Tectonophysics*, 2000, V. 379, pp. 211–226.
 30. Hawkesworth C. J., Lightfoot P. C., Fedorenko V. A. [et al.]. Magma differentiation and mineralization in the Siberian continental flood basalts, *Lithos*, 1995, V. 34, pp. 61–81.
 31. Krivolutskaya N., Gongalsky B., Kedrovskaya T., Kubrakova I., Tyutyunnik O., Chikatueva V., Bychkova Y., Kovalchuk E., Yakushev A., Kononkova N. Geology of the Western Flanks of the Oktyabr'skoe Deposit, Noril'sk District, Russia : Evidence of a Closed Magmatic System, *Mineralium Deposita*, 2019, V. 54, pp. 611–630.
 32. Li S., Naldrett A. J., Shmitt A. K. [et al.]. Magmatic anhydrite-sulfide assemblages in plumbing system of the Siberian Traps, *Geology*, 2009, V. 37, pp. 259–262.
 33. 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*, 2009, No 104, pp. 291–301.
 34. Lightfoot P. C., Zotov I. A. Geological Relationships between intrusions, country rocks and Ni–Cu–PGE sulfides in the Kharaelakh intrusion, Noril'sk region: implication to the role of sulfide differentiation and metasomatic in their genesis, *Northeastern Geology*, 2014, V. 47, No 1, pp. 1–35.
 35. Naldrett A. J. A model for the Ni–Cu–PGE ores of the Noril'sk region and its application to other areas of flood basalts, *Economic Geology*, 1992, V. 87, pp. 1945–1962.
 36. Naumov V. B., Dorofeeva V. A., Giris A. V., Yarmolyuk V. V. Mean Contents of Volatile Components, Major and Trace Elements in Magmatic Melts



- in Major Geodynamic Environments on Earth. I. Mafic Melts, *Geochemistry International*, 2017, V. 55, pp. 629–653.
37. Petrov O. V. Isotope Geology of the Norilsk Deposits, *Springer*, Berlin/Heidelberg, Germany, 2019, 306 p.
38. Ripley E. M., Li C., Craig H. [et al.]. Micro-scale S isotope studies of the Kharaelakh intrusion, Noril'sk region, Siberia: Constraints on the genesis of coexisting anhydrite and sulfide minerals, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, V. 74, pp. 634–644.
39. Sobolev S. V., Sobolev A. V., Kuzmin D. V., Krivolutskaya N. A., Petrunin A. G., Arndt N. T., Rad'ko V. A., Vasil'ev Yu. R. Linking mantle plumes, large igneous provinces and environmental catastrophes, *Nature*, 2011, V. 477, pp. 312–316.
40. Tolstykh N. [et al.] Unique Cu-rich sulphide ores of the Southern-2 orebody in the Talnakh Intrusion, Noril'sk area (Russia): Geochemistry, mineralogy and conditions of crystallization, *Ore Geology Reviews*, 2020, V. 122, pp. 103525.
41. Vymazalová A. [et al.] Sluzhenikinite, $\text{Pd}_{15}(\text{Sb}_{7-x}\text{S}_{nx})_{3 \leq x \leq 4}$, a new platinum group mineral (PGM) from the Oktyabrsk deposit, the Norilsk deposits, Russia, *Mineralogical Magazine*, 2022, V. 86, No. 4, pp. 577–585.

Автор

Криволицкая Надежда Александровна

доктор геолого-минералогических наук
ведущий научный сотрудник
nakriv@mail.ru

ФГБУН Институт геохимии и аналитической химии
имени В. И. Вернадского РАН,
г. Москва, Россия

Author

Nadezhda A. Krivolutskaya

D. Sc. in Geology and Mineralogy
Leading Researcher
nakriv@mail.ru

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry
of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia