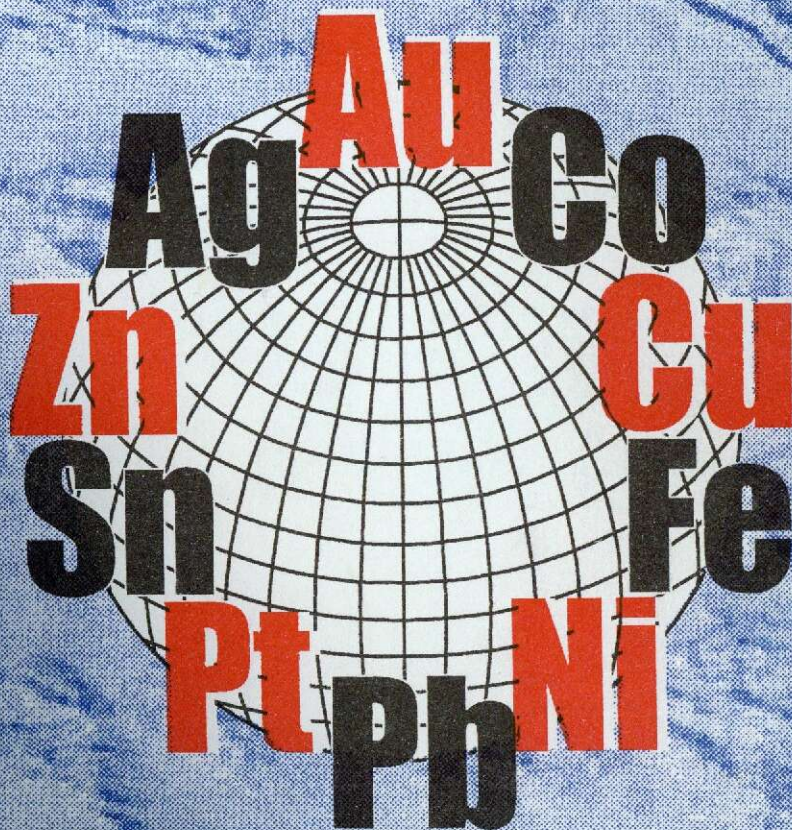
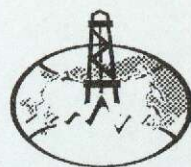


2-й 343.

РУДЫ И МЕТАЛЛЫ



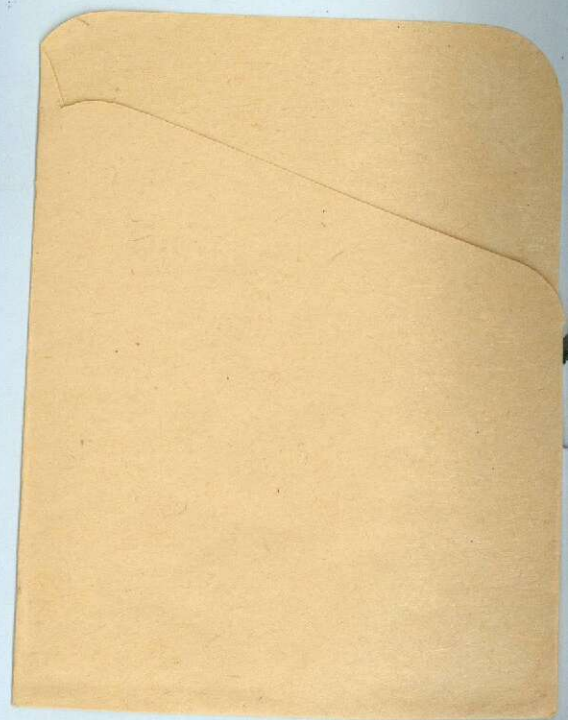
ЦНИГРИ МПР России

Главный редактор
И.Ф. Мигачёв

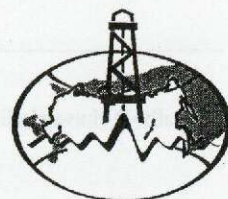


5/2002

ISSN 0869-5997



РУДЫ И МЕТАЛЛЫ



5/2002

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ВЫХОДИТ 6 РАЗ В ГОД

ОСНОВАН В 1992 ГОДУ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор И.Ф. МИГАЧЕВ

Б.И. БЕНЕВОЛЬСКИЙ
Э.К. БУРЕНКОВ
В.И. ВАГАНОВ
С.С. ВАРТАНЯН
В.И. ВОРОБЬЕВ
П.А. ИГНАТОВ
М.М. КОНСТАНТИНОВ
А.И. КРИВЦОВ, зам. главного редактора
Н.К. КУРБАНОВ
Г.А. МАШКОВЦЕВ
В.М. МИНАКОВ
Н.И. НАЗАРОВА, зам. главного редактора
Г.В. ОСТРОУМОВ
В.М. ПИТЕРСКИЙ
В.И. ПЯТНИЦКИЙ
Г.В. РУЧКИН
Ю.Г. САФОНОВ
Г.В. СЕДЕЛЬНИКОВА
В.И. СТАРОСТИН
И.А. ЧИЖОВА



УЧРЕДИТЕЛЬ

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ ИНСТИТУТ
ЦВЕТНЫХ И БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ
(ЦНИГРИ)

Издается при участии

Международной академии минеральных ресурсов,

Фонда им. академика В.И.Смирнова

Москва ЦНИГРИ 2002





Редакция: Н.И.Назарова, Г.В.Вавилова
Компьютерный набор, верстка и оригинал-макет: Г.В.Земскова, Н.И.Назарова

Сдано в набор 15.09.2002 г.
Подписано в печать 20.10.2002 г.
Тираж 430 экз.

Формат 185×270 1/8
Бумага офсетная № 1
Печать офсетная

Адрес редакции: 113545 Москва, Варшавское шоссе, 129«Б», ЦНИГРИ
Телефон: 315-28-47
Типография ЦНИГРИ: Варшавское шоссе, 129«Б»

© «Руды и металлы», 2002

100 лет со дня рождения Михаила Николаевича
Годлевского (27.10.1902—04.06.1984)

5

100-th anniversary Michael Nikolaevich Godlevsky
(27.10.1902—04.06.1984)

Вопросы генезиса платино-медно-никелевых и платиновых месторождений

Лихачев А.П. Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения: механизмы накопления, новые источники и методы получения рудных веществ

9

Маракушев А.А., Панейх Н.А., Зотов И.А. Проблемы формирования медно-никелевых сульфидных месторождений

23

Налдретт А.Дж. Геологические обстановки, благоприятные для нахождения магматических сульфидных руд

33

Problems of genesis of platinum-copper-nickel and platinum deposits

Likhachev A.P. Platinum-copper-nickel and platinum deposits: mechanisms of accumulation, new sources and methods of producing ore matter

Marakushev A.A., Paneyakh N.A., Zotov I.A. Problems of copper-nickel sulfide deposits formation

Naldrett A.J. Geologic environment favourable to the presence of magmatic sulphide ore

Состав и строение сульфидоносных магматических комплексов

Заскинд Е.С., Конкина О.М., Кочнев-Первухов В.И. Рудно-петрологическая типизация плутонов Мончегорского рудного района, Кольский полуостров

48

Тузовцев Д.М., Служеникин С.Ф., Михалев С.К., Степанов В.К. Высокотемпературный контактовый метаморфизм карбонатных пород в ореолах норильских гипербазит-базитовых интрузий

57

Composition and structure of sulfide-bearing magmatic complexes

Zaskind E.S., Konkina O.M., Kochnev-Pervukhov V.I. Ore-petrological typification of plutons in the Monchegorsk ore district, Kola Peninsula

Turovtsev D.M., Sluzhenikin S.F., Mikhalev S.K., Stepanov V.K. High-temperature contact metamorphism of carbonate rocks in the haloes of the Noril'sk hyperbasite-basite intrusions

Прогнозная оценка территорий, состояние сырьевой базы и направление геологоразведочных работ

Люд'ко В.А., Амосов Ю.Н., Валетов А.В., Комарова М.З., Козырев С.М., Рябикин В.А., Симонов О.Н., Рад'ко В.А., Рочев Н.В. Состояние рудной базы цветных и благородных металлов в Норильском районе и направление первоочередных геологоразведочных работ

66

Чернышов Н.М., Молотков С.П., Буковшин В.В. Развитие минерально-сырьевой базы цветных и благородных металлов центральной зоны России в свете идей М.Н.Годлевского

82

Appraisal of the territories' potential, state of mineral base and geological exploration trends

Lyul'ko V.A., Amosov Yu.N., Valetov A.V., Komarova M.Z., Kozyrev S.M., Ryabikin V.A., Simonov O.N., Rad'ko V.A., Rochev N.V. State of mineral base of non-ferrous and precious metals in the Noril'sk region and first and foremost geological exploration

Chernyshov N.M., Molotkov S.P., Bukovshin V.V. Development of mineral base of non-ferrous and precious metals in Central Russia in the light of M.N.Godlevsky's ideas

Воспоминания о М.Н.Годлевском

Юдина В.В. Памяти М.Н.Годлевского

93

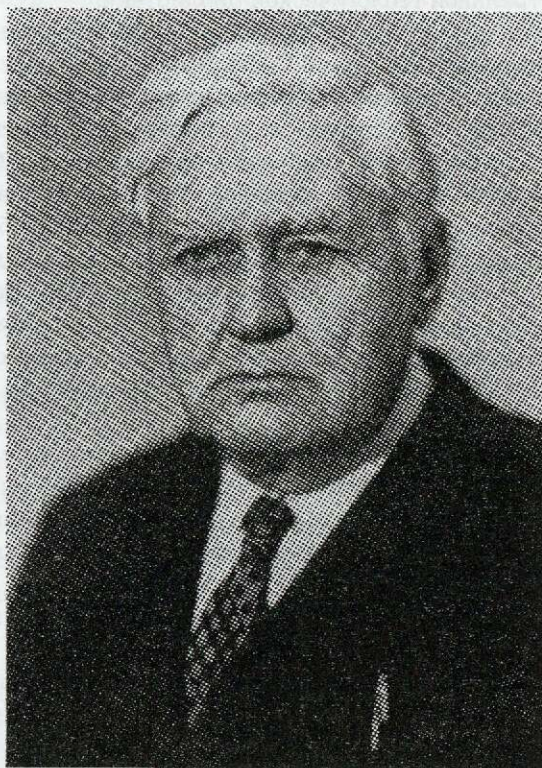
Yudina V.V. Memory of M.N. Godlevsky

Список трудов М.Н.Годлевского

97

List of publications by M.N. Godlevsky

К СТОЛЕТИЮ МИХАИЛА НИКОЛАЕВИЧА ГОДЛЕВСКОГО



27.10.1902–5.06.1984

27 октября 2002 г. исполняется сто лет со дня рождения Михаила Николаевича Годлевского — крупнейшего специалиста в области изучения рудных месторождений, чьи многочисленные труды по сей день остаются основополагающими в теории генезиса медно-никелевых, платиновых и других магматогенных месторождений.

Михаил Николаевич родился в Варшаве в дворянской семье, давшей России видных инженеров и ученых-естествоиспытателей. Его дед Виктор Игнаций Годлевский был сослан в Сибирь за участие в подготовке польского восстания, и в ссылке стал первым исследователем глубоководной фауны оз. Байкал. Работы В. Годлевского по естественно-историческому изучению Байкала и окружающих территорий стали классическими.

Трудовая деятельность Михаила Годлевского началась рано: в 1917 г. погиб отец — инженер одного из военных заводов Петербурга и 15-летнему подростку пришлось взять на себя заботу о матери и сестрах. Вплоть до 1922 г. работает рабочим и техником в геодезических партиях, проводящих съемку в бассейнах рек Алдан, Ангара, Лена. В 1922 г. поступает на астрономическое отделение физико-математического факультета Ленинградского университета, но через год его отчисляют «за происхождение». Еще пять лет М. Н. Годлевский работает техником-изыскателем, чертежником, воспитателем детского дома, преподавателем математики в школе второй ступени.

Лишь в 1925 г. он поступает на геологическое отделение Ленинградского горного института, которое заканчивает в 1930 г. Интерес к науке проявился у молодого исследователя еще в студенчестве; он успешно совмещал учебу с работой и преподаванием на кафедре минералогии и кристаллографии, руководимой А.К.Болдыревым. Одновременно участвовал в исследованиях уральских изумрудных копей, Березовского золоторудного и Криворожского железорудного месторождений. По окончании института талантливый ученый был оставлен при кафедре минералогии и петрографии, на которой работал в должности доцента с 1931 по 1938 г. Одновременно он возглавлял петрографо-минералогическую группу во ВСЕГЕИ, был научным консультантом Института галургии и Центральной геологической библиотеки.

Первые самостоятельные исследования М.Н.Годлевского посвящены геологии, минералогии и геохимии индерских месторождений бора в Казахстане, хоперских железорудных месторождений и месторождений силикатного никеля. В это же время он активно занимался исследованием декоративных камней Урала. По результатам изучения индерских месторождений в 1937 г. ему без защиты была присвоена ученая степень кандидата. Оппоненты — академики С.С.Смирнов и А.Н.Заварицкий — особо отметили глубину анализа минералогии боратов и закономерностей их образования. В этот же период деятельности было описано новое месторождение пирофиллита, открыты минералы метагидроборатит, айдырлит и курнаковит, детально описан ряд малоизученных в то время минералов бора. Работы М.Н.Годлевского по минералогии боратов высоко оценены В.И.Вернадским, А.Е.Ферсманом, А.Г.Бетехтиным. Его исследования солевых систем внесли много нового в познание закономерностей минералообразования. Им были высказаны принципиально новые соображения о происхождении и образовании силикатных руд никеля.

Теоретические исследования М.Н.Годлевский успешно сочетал с методическими разработками и педагогической деятельностью. В 1933 г. им написан «Краткий курс кристаллографии», признанный лучшим учебником для горных вузов, а для «Курса минералогии» под редакцией А.К.Болдырева составлены разделы «Окислы и гидроокислы» и «Силикаты». В течение десяти лет — с 1932 по 1941 гг. — он регулярно публиковал в Записках ВМО библиографические обзоры о новейших достижениях в минералогии. До сих пор эти публикации остаются образцом научной полноты и точности.

К концу 1940 г. написана докторская диссертация, защите которой помешала Великая Отечественная война, оборвавшая успешно начатую научную деятельность — 2 июля 1941 г. Михаил Николаевич ушел на фронт. Защищая Ленинград, он в тяжелейших боях под Лугой попал в окружение и в плен. Немцы предлагали ему научную работу в Германии, однако он предпочел остаться на общих работах для военнопленных. Освободила его Советская Армия. Он снова воевал и кончил войну в Праге. После демобилизации в ноябре 1945 г. М.Н.Годлевский вернулся во ВСЕГЕИ. Едва ли не в первый день он был арестован в приемной директора института и после короткого следствия сослан в Норильские исправительно-трудовые лагеря, из которых освободился лишь в 1956 г., когда Военная Коллегия Верховного Суда СССР отменила приговор и прекратила дело по обвинению М.Н.Годлевского в «государственной измене».

В первый год заключения работал забойщиком на Кайерканском угольном месторождении, каменщиком на строительстве завода. Затем занимался поисковыми работами, работал в петрографической лаборатории. Около четырех лет Михаил Николаевич выполнял обязанности рудничного геолога на руднике 3/6. Здесь он имел возможность проводить детальные наблюдения и картирование пород и руд в многочисленных подземных выработках с последующим их изучением под микроскопом и анализами в химической лаборатории. Сохранились тетради, сделанные из крафт-бумаги, с подробным микроскопическим описанием шлифов и аншлифов, зарисовками, количественно-минералогическими подсчетами. Возможно, именно в этот период Михаил Николаевич наиболее глубоко вник в сущность и познал вещество норильских месторождений. Им описаны все типы руд и пород, дана подробная характеристика рудо- и породообразующим минералам. Все это делалось в невероятно тяжелых условиях жизни: под конвоем приводили на работу и отводили в барак 4-го лаготделения, где действовали законы уголовников.

Солевые системы, бораты, остаточные и осадочные месторождения пришлось забыть навсегда: начиная с 1946 г. и до конца жизни все работы Михаила Николаевича были посвящены сульфидным медно-никелевым месторождениям. До 1958 г. он изучал геологию, минералогию и геохимию норильских сульфидных медно-никелевых месторождений. В этот период ему удается решить многие кардинальные вопросы их генезиса. Им была установлена тесная пространственная и генетическая связь норильских месторождений с интрузиями габбро-долеритов, выявлена их приуроченность к определенным тектоническим структурам, определены время и условия появления интрузий в ходе развития траппового магматизма на Сибирской платформе, изучен механизм возникновения и эволюции сульфидных расплавов, установлены условия появления массивных и вкрапленных сульфидных руд определенного состава, охарактеризован тип дифференциации по особой схеме, которая впоследствии получила название схемы Годлевского. В 1959 г. по результатам этих исследований Михаил Николаевич издал монографию «Траппы и рудоносные интрузии Норильского района», в которой впервые было изложено теоретическое обоснование связи медно-никелевых руд с трапповым магматизмом. Работа получила широкую известность и быстро стала библиографической редкостью. В 1960 г. он защитил монографию в качестве докторской диссертации.

После освобождения из лагеря М.Н. Годлевский некоторое время проработал во ВСЕГЕИ, а затем, после защиты докторской диссертации, возглавил отдел минералогии ЦНИГРИ и создал сектор геологии месторождений никеля, кобальта и платиновых металлов. Здесь в 60–70-е годы особенно широко развернулись его теоретические исследования, которые тесно сочетались с практической деятельностью.

Как главный куратор Мингео СССР по месторождениям никеля, кобальта и платины М.Н. Годлевский разработал в 1963 г. широкую программу исследований медно-никелевых месторождений и добился ее обсуждения на Всесоюзном совещании. Программа охватывала весь спектр проблем, имевших отношение к изучению и прогнозу месторождений никелевых руд — от региональных исследований до экспериментального изучения систем типа «силикаты-сульфиды-вода». В рамках программы в течение пяти лет проводились планомерные исследования месторождений Норильского района, Балтийского щита, Воронежского кристаллического массива, Северного Прибайкалья, Камчатки; было организовано экспериментальное исследование главных рудообразующих минералов и их ассоциаций, а также специальное изучение минералогии и геохимии платиновых металлов; поставлены исследования изотопного состава серы сульфидов норильских и печенгских месторождений. Тогда же Михаил Николаевич предложил первую классификацию медно-никелевых месторождений на геотектонической основе. Впоследствии с появлением новых материалов по месторождениям Австралии, Балтийского щита и Северного Прибайкалья классификация была существенно уточнена. В переработанном виде она не потеряла своего значения до сих пор.

Параллельно с разработками прикладного характера М.Н. Годлевский напряженно трудился над теорией рудообразования. В 1961 г. в процессе написания обобщающего труда «Медно-никелевые месторождения мира и проблемы их генезиса» он приходит к выводу о том, что наиболее острой является проблема совместного действия летучих компонентов и сульфидного расплава, и пишет теоретическую статью «Фазовые равновесия в некоторых бинарных системах и их значение в рудообразовании». В статье он разбирает фазовые равновесия в бинарных системах с расслоением в жидкой фазе и большим различием в летучести компонентов, которые наиболее близки к условиям, существующим в минералообразующих растворах. Позже им показано, что существует зависимость минерального состава руд на разных стадиях рудообразования не только от подвижности металлов, но и от режима серы, а в конечном счете от ее содержания в исходном расплаве.

В результате М.Н. Годлевский выделил в рудном процессе две крупные стадии — магматическую с инертным поведением никеля, железа и серы, с которой связано образование первичных вкрапленных и жильных пирротиновых и халькопиритовых руд, и постмагматическую с вполне подвижным поведением серы (ниже 350–300°C), к которой относятся экзоконтактовые руды с большим содержанием дисульфидов.

Считая методы физико-химической петрологии вообще и метод Д.С.Коржинского, в частности, полезным инструментом в руках геолога-исследователя, М.Н.Годлевский создал и прочитал в 1964 г. на геологическом факультете МГУ курс лекций по физико-химической петрологии, сопроводив его учебным пособием «Методика составления физико-химических диаграмм».

В дальнейшем, применив метод экстремальных состояний, М.Н.Годлевский рассмотрел пути дифференциации базальтоидных интрузий в зависимости от подвижности FeO и SiO₂ и показал ошибочность концепции Осборна о решающей роли режима кислорода в реализации боуэнзовского и феннеровского путей кристаллизации дифференцированных интрузий. Составленная им диаграмма направлений кристаллизации интрузий норильского и скаергаардского типов успешно использовалась для выяснения путей кристаллизации других никеленосных комплексов и их оценки.

В 1968 г. М.Н.Годлевский обобщил все известные к тому времени факты и представил свою концепцию генезиса сульфидных медно-никелевых и платинометалльных месторождений в разделе «Магматические месторождения» фундаментального труда «Генезис эндогенных рудных месторождений», изданного под редакцией академика В.И.Смирнова.

В 70-х годах М.Н.Годлевский выдвигает идею промежуточного положения никеленосных интрузий между базальтами и хондритами. Постоянство состава медно-никелевых месторождений во времени и пространстве, а также неизменность изотопного состава серы, отвечающего метеоритному, привели исследователя к выводу об однородности астеносферных очагов — источников никеленосных интрузий. В последующем эти идеи широко использовались его учениками.

О незаурядности М.Н.Годлевского говорит широкий круг вопросов, которыми он интересовался глубоко и профессионально. Кроме проблем, связанных с сульфидными медно-никелевыми месторождениями, его занимала золотеносность интрузий основного состава, закономерности поведения изотопов серы в геологических процессах, типоморфизм алмазов, роль углеродистого вещества в рудообразовании и многое-многое другое.

До последних дней, несмотря на тяжелую болезнь, Михаил Николаевич продолжал работать, как бы торопясь передать людям свои знания и опыт. 5 июня 1984 г. его не стало.

Кроме научных трудов (им написано 150 работ, большая часть которых опубликована), осталась научная школа, которая развивает идеи, намеченные, но не осуществленные Михаилом Николаевичем. Его ученики — кандидаты и доктора наук — работают на производстве, в научно-исследовательских институтах и вузах России.

Заслуги М.Н.Годлевского еще при жизни были оценены государством: он награжден орденами Ленина, Трудового Красного Знамени, медалями Советского Союза. И тем не менее след несправедливого обвинения тянулся за ним всю жизнь. ЦНИГРИ, в котором работал М.Н.Годлевский, не раз ходатайствовал о присвоении ему звания «Заслуженный деятель науки», и каждый раз вышестоящие инстанции отклоняли это ходатайство. Причины не комментировались.

Михаил Николаевич широко известен в научном мире как выдающийся ученый. Его именем назван открытый в норильских рудах Э.А.Кулаговым с сотрудниками новый минерал — сульфид никеля (Ni₇S₆), обнаруженный затем в других месторождениях мира.

Ученый широкого профиля, терпеливый и требовательный учитель, доброжелательный, преданный своему делу человек — таким Михаил Николаевич Годлевский сохранился в памяти всех, знавших его.

А.П.Лихачев, В.И.Кочнев-Первухов

ВОПРОСЫ ГЕНЕЗИСА ПЛАТИНО-МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ И ПЛАТИНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ



УДК 553.491'43'481

© А.П.Лихачев, 2002

ПЛАТИНО-МЕДНО-НИКЕЛЕВЫЕ И ПЛАТИНОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ: МЕХАНИЗМЫ НАКОПЛЕНИЯ, НОВЫЕ ИСТОЧНИКИ И МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ РУДНЫХ ВЕЩЕСТВ

А.П.Лихачев (ЦНИГРИ МПР России)

Продолжение организованных М.Н.Годлевским исследований платино-медно-никелевых и платиновых месторождений привело к выявлению ряда принципиальных закономерностей, касающихся состава, строения и условий образования рудоносных магматических комплексов. Были определены новые источники рудного вещества и механизмы его накопления. Открыты Маймеча-Котуйская платиноносная провинция и находящиеся в ней рудные объекты. Выделена в качестве перспективной на медно-никелевые руды Попигайская структура. Разработаны новые технологии и оборудование, позволяющие использовать тепловую энергию (авторазогрев) горных пород, что дает возможность резко расширить сырьевую базу цветных и благородных металлов за счет включения в промышленную переработку сравнительно бедных по содержанию рудных веществ ультрамафических тел, обладающих, по существу, неограниченными запасами ценных компонентов и тепловой энергии.

В прошедшие без Михаила Николаевича Годлевского годы продолжались организованные им в ЦНИГРИ и выполняемые под его руководством исследования проблем платино-медно-никелевых и платиновых месторождений. В частности, они касались обсуждаемых ниже вопросов — механизмов накопления рудных веществ, их источников и методов получения.

Результаты проведенных исследований подтвердили плодотворность развиваемых Михаилом Николаевичем идей (см. список трудов М.Н.), в том числе о первично-магматической природе рассматриваемых месторождений. Они показали, что руды большинства месторождений формируются за счет изначально самостоятельных сульфидных и металлических фракций исходного недеплетированного (хондритового, по М.Н.) мантийного и ядерно-мантийного вещества. Их накопление происходит в ходе строго закономерных последовательных и многоэтапных процессов, связанных с зарождением, внедрением и становлением мафит-ультрамафических магм.

На основе установленных связей рудных формаций и месторождений (рис. 1) были выявлены новая Маймеча-Котуйская платино-

носная провинция и находящиеся в ней рудные объекты [10, 19]. Разработаны новые технологии [4, 13] и определены возможности извлечения ценных компонентов путем использования тепловой энергии вмещающих их пород. Это позволяет расширить источники получения и увеличить запасы цветных и благородных металлов за счет включения в них магматических образований с относительно низким содержанием рудных веществ.

Возможные механизмы накопления рудных веществ. Большинство рассматриваемых месторождений ассоциирует с мафит-ультрамафическими магматическими образованиями — продуктами фракционного плавления и дифференциации вещества мантии (см. рис. 1–3), а в некоторых случаях земного ядра (см. рис. 2, б, в). Образование месторождений типа Садбери связывается с падением на Землю космических тел.

Возможны следующие механизмы накопления рудных веществ: фракционного плавления, транспортно-гравитационный, сейсмогравитационный, гидротермальный (флюидный) и магматического переотложения, ударный и ассимиляционный.

Механизм фракционного плавления при-
сущ мантийным очагам магмообразования, на-

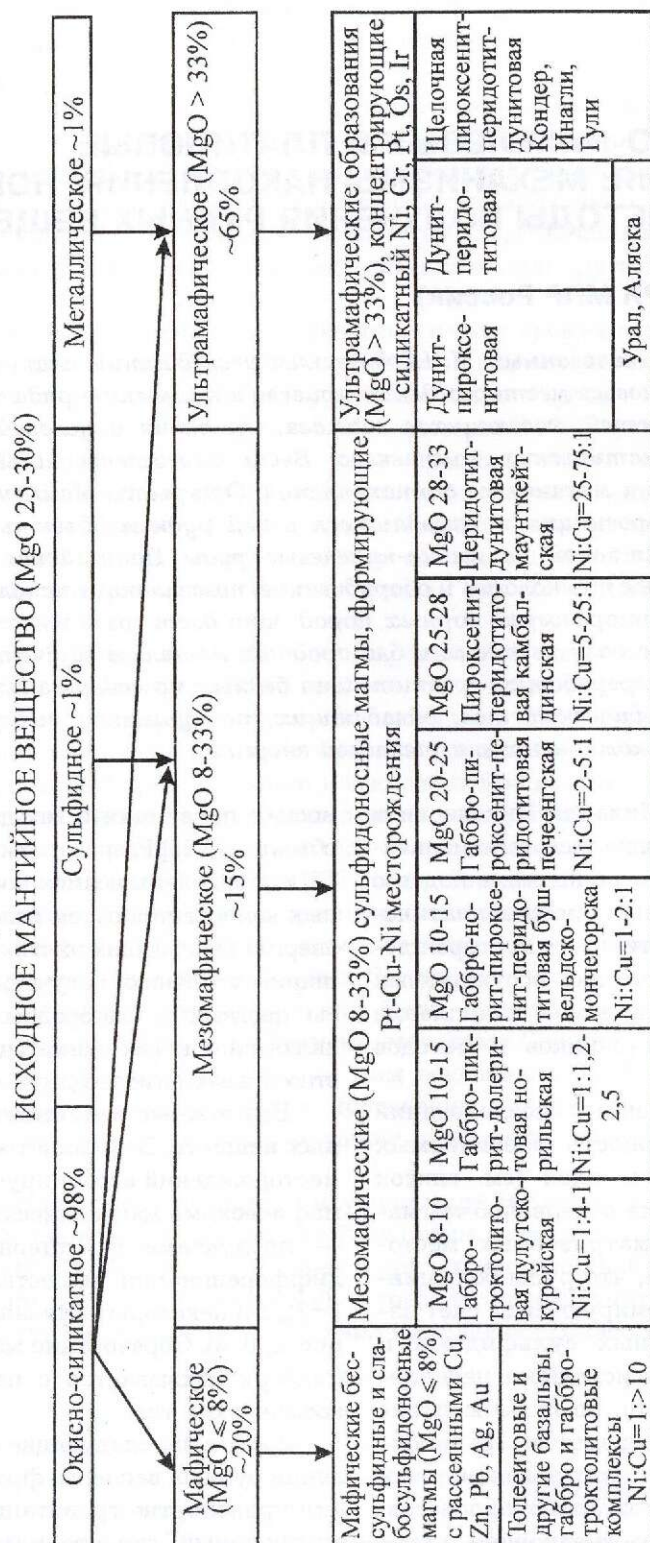


Рис. 1. Схема генетической связи магматических формаций и месторождений

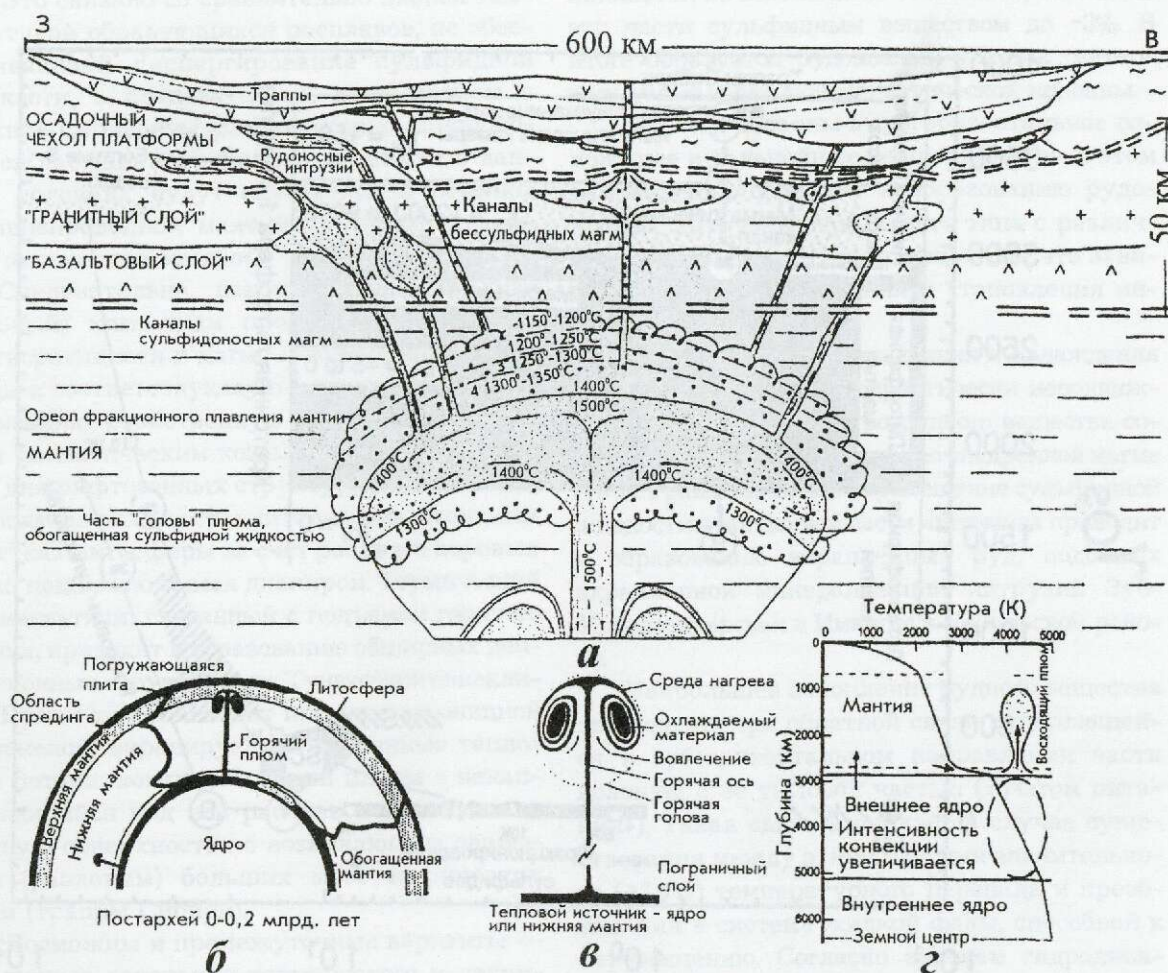


Рис. 2. Схема образования безрудных и рудоносных магм в процессе траппового магматизма Сибирской платформы (а), проявления термических плюмов (б, в) (Hill et al., 1992; Larson, Olson, 1991)

ходящимся в астеносферном слое, сложенном недеплетированным материалом, приближающимся по составу к хондритам. Плавление происходит в результате разогрева вещества мантии (термическое магнеобразование) под действием глубинных тепловых потоков, в том числе горячих плюмов, поднимающихся от границы ядро-мантия (см. рис. 2). Исходный материал имеет котектический состав и поэтому плавится постепенно с образованием сначала относительно легкоплавкой, а затем более тугоплавких фракций, формирующих соответствующие по составу магмы (см. рис. 1).

Выплавляющиеся вначале бессульфидные и слабосульфидоносные мафические магмы ($MgO \leq 8\%$), покидая горизонт магнеобразования, обогащают рудным веществом остающуюся в нерасплавленном состоянии часть исходного мате-

риала. Последующее повышение температуры приводит к образованию сульфидоносных мезомафических магм ($MgO 8-33\%$), удерживающих в себе нерастворимую в силикатном расплаве тяжелую сульфидную жидкость за счет проявления эффекта ее диспергирования [2] и формирующих различные типы (в зависимости от степени плавления) платино-медно-никелевых месторождений (см. рис. 1). Ресгитовый материал ($MgO > 33\%$) этих двух стадий плавления обогащается тугоплавкими компонентами — Mg, Cr, Ni, Pt, Re, Os, Ir при нахождении платиновых элементов преимущественно в металлическом виде. В пределы земной коры он поступает в кашеобразном и твердом состояниях, формируя бессульфидные и слабосульфидоносные ультрамафические тела различных формаций (см. рис. 1).

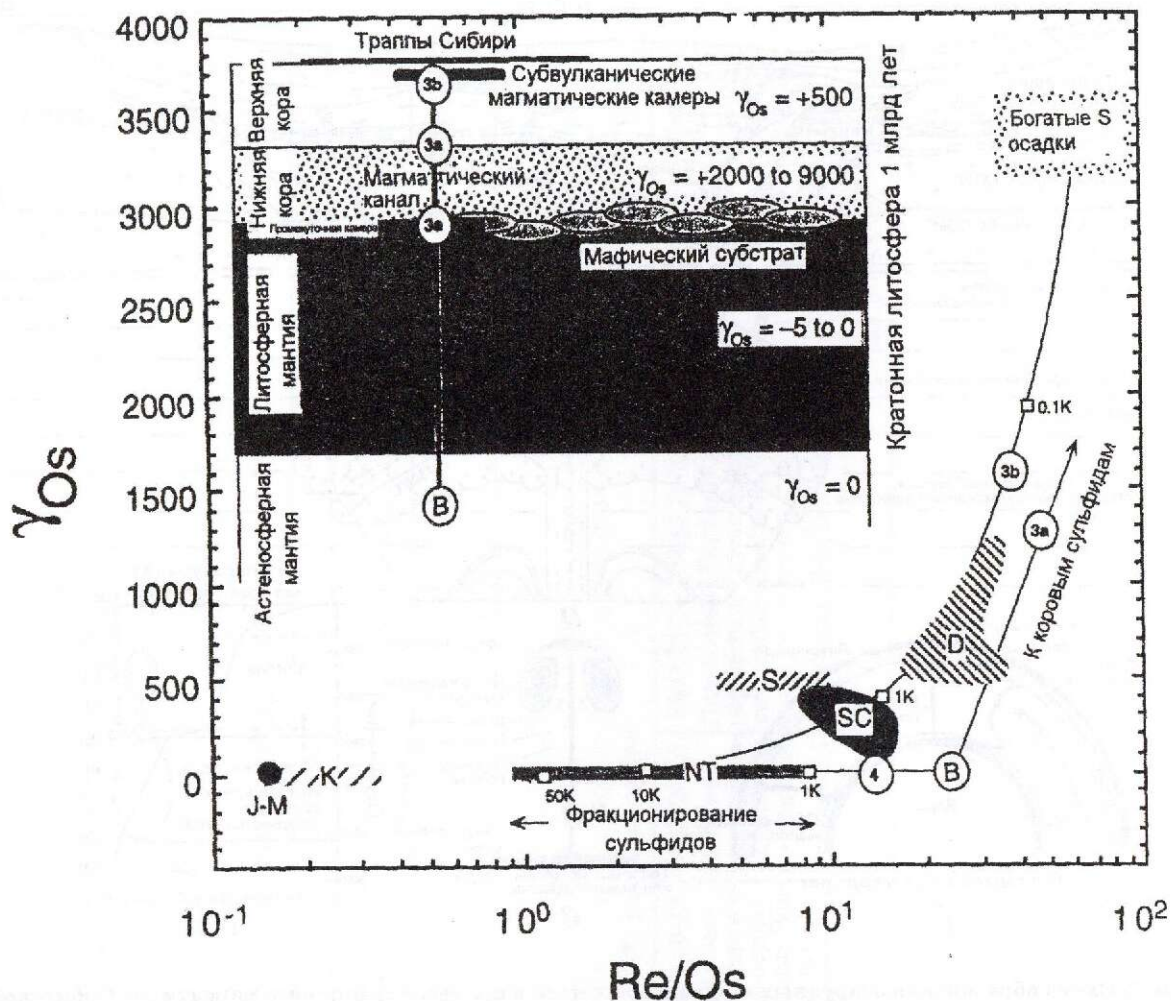


Рис. 3. Первичные отношения γ_{Os} — Re/Os для магматических сульфидных руд, богатых серой осадочных пород и базальтовых магм (B) с отражением динамики рудообразующих процессов (3a-b) для сибирских траппов [16]:

γ_{Os} — процентное отношение изотопного состава образца к среднему составу хондрита. Сульфиды: J-M — рифа Джей-М в комплексе Стиллиутер; NT — норильско-талнахских месторождений, SC — базальных пород комплекса Стиллиутер, S — Садбери; D — комплекса Дулут

Таким образом, механизм фракционного плавления приводит к образованию двух обогащенных рудным веществом продуктов — сульфидоносных мезомафических магм, формирующих платино-медно-никелевые месторождения, и ультрамафического реститового материала, за счет которого образуются платино- и хромитоносные ультрабазиты. В образовании сульфидоносных магм может участвовать рудное вещество, выносимое плюмом из верхней части внешнего ядра Земли (см. рис. 2) [14, 18].

Кроме рассмотренного термического, возможно декомпрессионное плавление и магмообразование, обусловленное диапировым подъемом твердых реститовых масс верхней мантии, потерявших в более ранние периоды значительную часть легкоплавкой, в том числе сульфидной, составляющей первичного мантийного вещества. Зарождающиеся при этом магмы несут только растворяющиеся в них сульфиды, т.е. они не насыщены серой. Дефицит последней сохранится и в случае наличия в исходном веществе нерастворимых сульфидов.

дов. Это связано со сравнительно низкой температурой образующихся расплавов, не обеспечивающей диспергирование сульфидной жидкости, а следовательно, и ее подъем в верхние горизонты земной коры. Появляющиеся частицы сульфидной жидкости в данных условиях будут опускаться в глубины активизированной мантийной массы (диапира), оставаясь в мантии.

Следовательно, декомпрессионный (диапировый) магматизм продуктивен лишь на растворяющиеся в магме ликвационные сульфиды и соответствующую вкрапленную минерализацию, свойственную крупным расслоенным магматическим комплексам. Он характерен для рифтогенных структур, возникающих на ослабленных и сравнительно маломощных участках литосферы за счет раздвига коровых толщ поднимающимся диапиром. Термический же магматизм, связанный с подъемом горячего плума, приводит к образованию обширных депрессионных структур типа Тунгусской синеклизы. При этом происходит погружение мощной и тяжелой, экранирующей глубинные тепловые потоки, континентальной плиты в накапливающийся под ней расплав и излияние на земную поверхность по возникающим разрывам (разломам) больших масс мафических магм (траппы Сибири).

Возможны и промежуточные варианты — различные сочетания термического и декомпрессионного магообразования.

Транспортно-гравитационный механизм проявляется в ходе подъема сульфидоносных мезомафических магм в пределы земной коры и образования за счет них рудоносных магматических тел. Зарождающиеся в мантии сульфидоносные магмы имеют температуру $\sim 1300\text{--}1350^\circ\text{C}$ и состоят из преобладающей окисно-силикатной части, содержащей растворенную серу ($<0,2\%$), и сульфидной ($\geq 1\%$), представляющей собой жидкость, тонко рассеянную в силикатном расплаве. Впоследствии за счет первой образуются редкие выделения ликвационных сульфидов, а за счет второй — основная масса сульфидных руд платино-медно-никелевых месторождений.

При подъеме сульфидоносной магматической колонны ее головная часть подвергается более быстрому охлаждению (T до $\sim 1250^\circ\text{C}$). В результате в последней происходит укрупнение обособлений сульфидной жидкости и опускание их в более высокотемпературную область, где они снова диспергируются и удер-

живаются во взвешенном состоянии, обогащая эти части сульфидным веществом до $\sim 3\%$. В итоге образуется рудоносный участок (интервал) сульфидоносной магматической колонны.

Переход колонны в субгоризонтальное положение и дальнейшее ее продвижение в этом направлении приводят к образованию рудоносных интрузий норильского типа с различным количеством рудного вещества, что зависит от условий внедрения и становления интрузива.

В случае быстрого внедрения и охлаждения магматической массы в практически неподвижном состоянии количество рудного вещества соответствует его содержанию во внедренной магме ($\sim 3\%$). Гравитационное перемещение сульфидной жидкости к придонной части интрузива приводит к образованию вкрапленных руд, подобных вкрапленной минерализации интрузий Зуб-Маркшейдерская и Имангда в Норильском районе.

Наибольшее накопление рудного вещества происходит при обратной связи внедряющейся в субгоризонтальном направлении части колонны с ее тыловой частью («очагом питания»). Такая связь возникает в случае существования между этими частями значительного ($>10^\circ\text{C}$) температурного перепада и преобладания в системе жидкой фазы, способной к перемещению. Согласно законам гидродинамики, термоградиентное течение жидкости в закрытом субгоризонтальном канале осуществляется в строго определенном порядке: горячий поток движется по верхней половине канала, а обратный, более холодный, — по нижней, как это наблюдалось в многочисленных экспериментах, проводившихся в прозрачных реакторах [4].

Продольная циркуляция магмы обеспечивает многократную смену магматического материала во фронтальной части колонны и накопление в ней рудного вещества до $10\text{--}40\%$, сбрасываемого прибывающим и возвращающимся потоками преимущественно в местах снижения скорости течения магмы, т.е. в участках перехода магматического канала от суженных к расширенным интервалам. В результате образуются богатые рудным веществом интрузии и связанные с ними платино-медно-никелевые месторождения типа Норильск-I, Талнахского и Октябрьского [6].

С транспортно-гравитационным механизмом (в различных его вариантах) связано об-

разование месторождений коматиитовых формаций.

Сейсмогравитационный механизм накопления рудного вещества наиболее полно проявляется в крупных магматических массивах (Бушвельд, Стиллуотер и др.), образующих расслоенные комплексы и связанные с ними рудные горизонты сульфидной платино-медно-никелевой, хромитовой и магнетитовой минерализаций. Исходные магмы, формирующие эти комплексы, сравнительно бедны рудным веществом. Сульфиды в них составляют <0,2% и полностью растворимы в силикатном расплаве, т.е. сульфидные ассоциации имеют ликвационную природу — выделяются по мере остывания и кристаллизации магмы. В спокойных условиях они не накапливаются под действием гравитации, а захораниваются в рассеянном виде внутри кристаллизующейся окисно-силикатной массы, распределяясь по всему ее объему. Их скопление и образование рудных горизонтов происходит под влиянием сейсмического фактора, обеспечивающего перемещение и концентрирование тяжелых рудных и силикатных фаз и формирование общей расслоенности магматических комплексов [7].

Механизм гидротермального и магматического переотложения проявляется в регенерации ранее сформированных рудных образований под воздействием проходящих и замкнуто циркулирующих флюидных потоков, а также магматических инъекций.

Проходящие потоки растворяют рудные вещества в наиболее высокотемпературной области (в «горячей зоне») и отлагают их в «холодной». В результате образуются различные по составу полиметаллические гидротермальные месторождения, обычно не имеющие прямого отношения к платино-медно-никелевым и платиновым месторождениям.

Циркуляционный процесс возникает около горячих (остывающих и разогревающихся) магматических тел и приводит к выносу из них и вмещающих их пород рудных веществ, которые затем отлагаются на некотором удалении в относительно холодной области замыкания циркуляционной ячейки. Циркуляция около остывающих магматических тел приводит к образованию полиметаллических и других рудных скоплений, в том числе отлагающихся на океаническом дне потоками черных курильщиков. Платино-медно-никелевая минерализация в верхних экзо- и эндоконтракто-

вых частях норильских рудоносных интрузий также связана с этим процессом.

Разогревающимися являются ультрамафические тела, подвергающиеся серпентинизации. Выделяемое при этом тепло обуславливает возникновение замкнутых водных потоков, обеспечивающих вынос и отложение, а также внутриинтрузивное перераспределение рудных веществ. В результате такого процесса образовались переотложенные эпигенетические руды месторождений Печенги на Кольском полуострове [1]. С ним же связано широко проявленное флюидное перераспределение и концентрирование металлов платиновой группы в ультрамафических массивах бессульфидных формаций (см. рис. 1). В последние годы на дне Атлантического океана установлены действующие процессы серпентинизации, обеспечивающие вынос из ультрамафических тел и отложение на океаническом дне рудных веществ потоками циркулирующей морской воды [3, 12].

Магматическое переотложение сводится к плавлению и переносу в более высокие горизонты ранее сформированных сульфидных залежей позднее внедряющимися магмами. Примером такого процесса являются медно-никелевые руды Еланьского интрузива Воронежского кристаллического массива и месторождение Вейсис-Бэй на полуострове Лабрадор.

Ударный механизм связывается с падением на Землю космических тел, приводящим к образованию рудных скоплений садберского типа. Обычно считается, что при этом рудное вещество мобилизуется из земных недр, или допускается его чисто космическое происхождение, обусловленное падением сульфидного тела. Нами показано, что в импактном рудообразовании может участвовать как земное, так и космическое вещество. Его концентрирование происходит в два последовательных этапа: при ударе космического тела о земную поверхность и при падении (возврате) выброшенного взрывом импактного расплава. В обоих случаях рудные частицы «выбиваются» из силикатного окружения и скапливаются на фронте падающих масс с последующим импульсным вытеснением их в краевые части возникающей импактной структуры.

Декомпрессия при выбросе резко снижает температуру импактного расплава и обуславливает его быструю кристаллизацию с образованием сравнительно кислых слабодиффе-

ренцированных мелкозернистых (в преобладающей массе $\leq 1,5$ мм), по существу, закаленных массивов типа Садбери. При этом малоэффективно гравитационное осаждение сульфидов. Их концентрирование в основном происходит за счет ударного ускорения.

Расчетные данные [17], показывающие длительное (сотни тысяч лет) остывание импактного расплава структуры Садбери, не учитывают его декомпрессионное охлаждение, а базируются на высоких температурах образования расплава при ударе. Допускаемое гравитационное осаждение сульфидной жидкости из импактного расплава Садбери мощностью ~ 2500 м (Lightfoot, 2002) маловероятно из-за высокой вязкости (сравнительно кислого субэвтектического состава) расплава и его быстрой массовой кристаллизации.

Ассимиляционный механизм заключается в образовании рудных масс путем усвоения ненасыщенными серой мафит-ультрамафическими магмами ксеногенных серосодержащих веществ. При этом происходит так называемая сульфуризация — образование сульфидного расплава за счет привнесенной (ассимилированной) серы и экстрагированных из магмы железа и других рудных компонентов. Процесс протекает в соответствии с законом межфазного распределения и в зависимости от фактора R (или N), отражающего количественное отношение прореагировавшей с сульфидами силикатной составляющей магматической системы к ее сульфидной части [15].

Реализация процесса сульфуризации, как и ассимиляционного механизма в целом, в промышленно значимых масштабах сомнительна. Геологические и геохимические (см. рис. 3) данные показывают, что проявление этого механизма весьма ограничено. Наблюдаемая ассимиляция основной магмой серосодержащих вмещающих пород приводит к образованию сульфидных выделений чрезвычайно бедных цветными и благородными металлами, например, в базальной зоне комплекса Дулут (интрузия Ватер Хен) и в интрузии Катахдин (США). В последней массивные сульфиды содержат 0,2% Ni, 0,1% Cu и 0,17% Co [20]. С другой стороны, имеются данные, указывающие на то, что рудные элементы силикатных магм практически не участвуют в сульфидном рудообразовании. Так, изучение изотопного состава железа породообразующих и рудных минералов [9] показало различные (самостоятельные) его источники для си-

ликатной (Ol) и рудной (Sulf) составляющих норильских интрузий (рис. 4).

Там, где сульфуризации отводится решающая роль в рудообразовании, обычно отсутствуют прямые доказательства ее проявления. Например, неизбежное в этом случае повышение содержаний магния и кальция в участвующих в данном процессе магмах и образуемых ими породах и минералах, изменение геохимических характеристик, в частности отношений Re/Os и значений γ_{Os} в рудах (см. рис. 3).

При допущении ассимиляционного механизма привлекается несколько вариантов его осуществления: контаминация магмы сероводородом (H_2S), либо эвапоритами (ангидритом — $CaSO_4$), либо пиритом (FeS_2); ликвация сульфидного расплава из исходно ненасыщенной серой магмы вследствие ее раскисления (силификации) и тем самым снижения растворимости S за счет ассимиляции коровых пород; обогащение сульфидного расплава цветными и благородными металлами с увеличением его контактов (взаимодействий) с силикатным расплавом (факторы R , N). Возможности каждого из этих вариантов сводятся к следующему (на примере норильских месторождений).

1. Средний по размеру и количеству сульфидного вещества рудоносный интрузив Норильского района содержит около 50 млн. т ($\sim 1\%$) серы. Для ее накопления путем ассимиляции сероводорода обычной толеитовой магмой, содержащей $<0,01\%$ серы (базальты туклонской свиты, принимаемые за исходное для норильских интрузий вещество [15]), требуется 53 млн. т H_2S , нормальный объем которого составляет около 3 км^3 при объеме интрузива около 2 км^3 . Количество освобождаемого при этом водорода равняется 2,9 млн. т. Однако признаки нахождения водорода в интрузиях в столь больших количествах, в том числе следы его воздействия на магматическую систему и вмещающую среду, отсутствуют.

Для образования 50 млн. т серы за счет ассимиляции эвапоритов (ангидрита) необходимо поступление в магматическую систему около 212 млн. т ксеногенного материала, в том числе 62,4 млн. т кальция и 99,6 млн. т кислорода нормальным объемом около $111,5 \text{ км}^3$, что в целом составляет 4,24% от массы всего интрузива.

В рассматриваемом магматическом объеме содержится около 390 млн. т Fe. В случае assi-

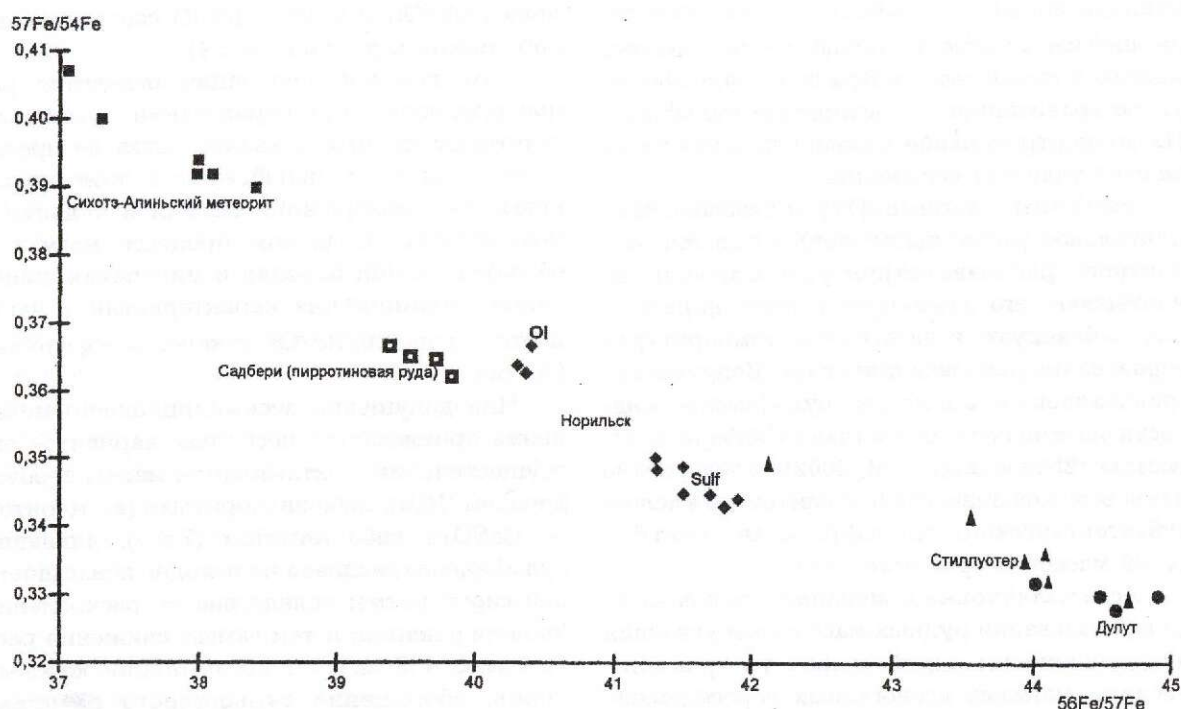


Рис. 4. Изотопный состав железа минералов метеорита и руд и пород платино-медно-никелевых месторождений:

Ol — оливин, Sulf — сульфидные минералы

миллиарды магмой указанного количества ксеногенного материала (212 млн. т) 87,5 млн. т (22,4%) железа уйдет на соединение с серой, для образования FeS . За счет этого в силикатном расплаве на соответствующую величину повысится содержание оставшихся компонентов. В дальнейшем это отразится на составе кристаллизующихся породообразующих минералов, в первую очередь, вызовет повышение содержания магния в оливине и пироксенах.

Соединится с железом и кислород, имеющий с ним более прочную связь, чем сера, судя по величине свободной энергии образования: $\Delta G^\circ \text{FeO} = -58,6$ ккал/моль, а $\Delta G^\circ \text{FeS} = -24,0$ ккал/моль. Поступившему его количеству (99,6 млн. т) для образования FeO требуется 350 млн. т Fe. Следовательно, сера и кислород, контаминирующие магматический расплав, свяжут не только все имеющееся в исходном объеме железо (390 млн. т), но и другие элементы.

Соответствующее изменение в состав системы внесет и контаминация кальцием (62,4 млн. т), количество которого в исходной магме состав-

ляет около 357,5 млн. т, т.е. его содержание в магме увеличится на 14,86%.

Усвоение магмой рассматриваемого количества вещества будет сопровождаться потерей ею тепла, превышающей $53 \cdot 10^{12}$ ккал (2,5 ккал/г CaSO_4), что приведет к снижению температуры магмы приблизительно на 115°C . Это, в свою очередь, вызовет лавинную кристаллизацию расплава на месте его контаминации, сделает магматическую массу практически неподвижной.

Поступившая в контаминируемую магму сульфатная сера должна восстановиться до двухвалентного (сульфидного) состояния. Обычно с этой целью привлекается углерод в виде угля тунгусской серии. Для усвоения магмой требуемого количества угля также нужны значительные потери его тепловой энергии.

Существует и проблема гомогенизации магматической системы (равномерного распределения ассимилированного вещества по всему магматическому объему). Для этого

также требуются значительное количество времени и большие энергетические затраты.

Обогащение магмы серой пирита из вмещающих пород в крупных масштабах также проблематично. Для этого необходим непосредственный контакт магматического расплава с осадочными, в основном вкрапленными, сульфидами, а следовательно, и усвоение больших масс содержащих их пород (как и железа, содержащегося в пирите), что приведет к рассмотренным выше проблемам изменения состава магматической системы и возможности ее дальнейшей эволюции. К тому же в большинстве крупных месторождений, в том числе в норильских рудах, отсутствуют признаки существенного участия в их образовании осадочных сульфидов (см. рис. 3).

О возможности контаминации магмы норильских рудоносных интрузий в некоторой мере можно судить по встречающимся в них ксенолитам коровых пород и по эндо- и экзо-контактовым зонам магматических тел. Ксенолиты, по существу, всех видов пород, как магматических, так и осадочных, сохраняют свою целостность, проявляя некоторые термические и метасоматические преобразования (рис. 5). Окружающий их магматический материал нередко имеет признаки закалки (быстрого охлаждения магмы) в ближайшей области к ксенолиту — мелкозернистое строение (см. рис. 5, б), аналогичное контактовому габбро-долериту эндоконтактовых зон интрузий.

Подобная реакция магматической системы на окружающую среду должна проявляться и на больших глубинах, в так называемых промежуточных очагах, так как рассматриваемым магмам не свойствен существенный перегрев и они имеют сравнительно небольшой температурный интервал кристаллизации породообразующих минералов. Попадая в относительно холодную среду, магматический расплав экранируется от нее продуктами быстрой кристаллизации его периферии, выполняющими роль футеровки.

Таким образом, значительная контаминация рудообразующих магм коровым материалом маловероятна. Ассимиляция, требуемая для накопления содержащейся в норильских интрузиях серы, превратит магматическую массу в гибрид, неспособный к дальнейшему перемещению и какой-либо последующей эволюции.

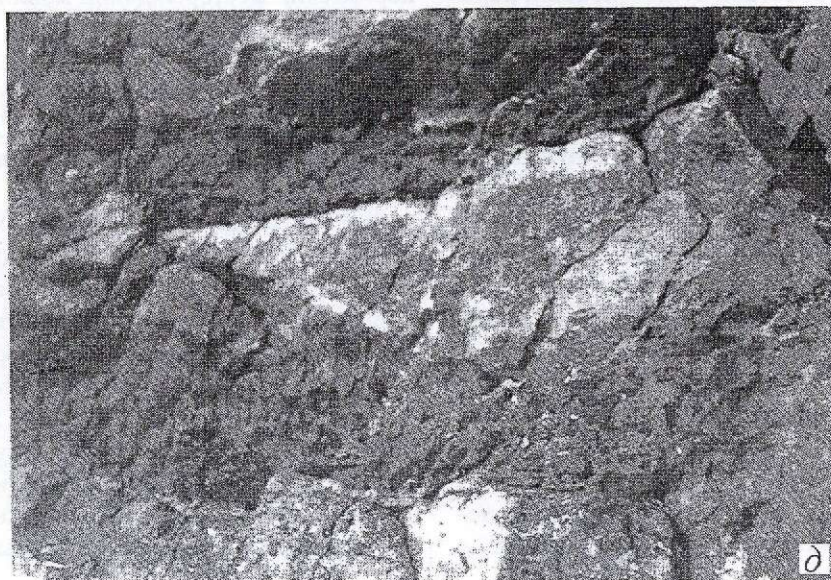
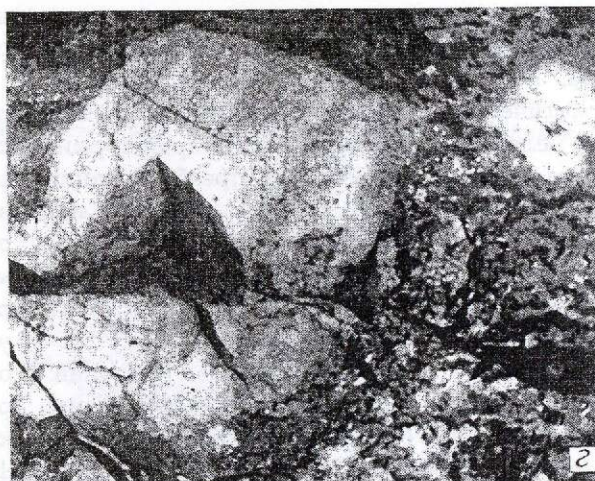
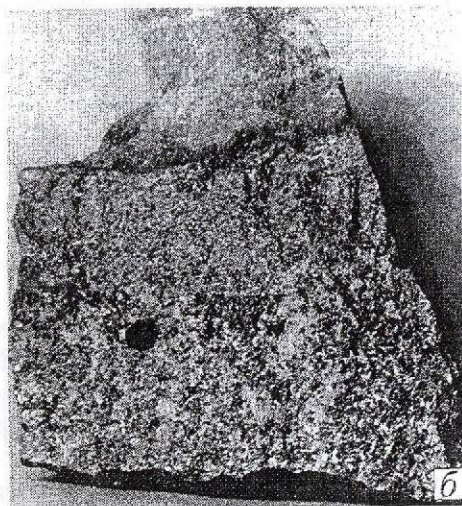
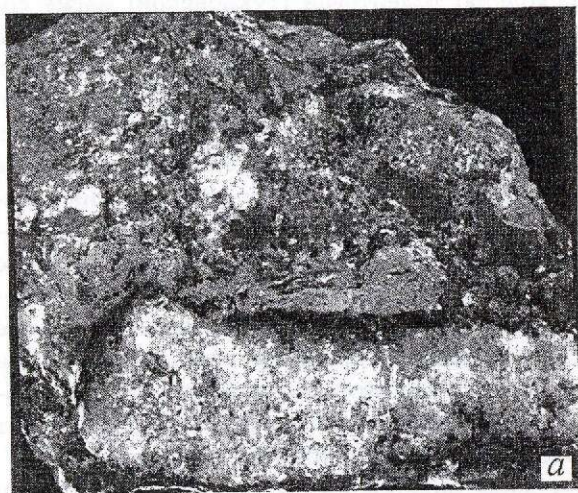
2. Ликвация сульфидного расплава из исходно ненасыщенной серой магмы вследствие

ее раскисления имеет свои сложности. Первичное количество серы в принимаемой за исходную толеитовой (туклонской) магме составляет не более 0,01% (~500 тыс. т в объеме норильской интрузии). При кристаллизации такой магмы выделение сульфидной жидкости не происходит. Для этого содержание серы в ней должно быть более 0,02% (рис. 6). Не произойдет оно и в случае раскисления (контаминации) этой магмы, так как усвоение корового материала приведет к увеличению объема магматической массы и снижению содержания в ней серы. Иначе говоря, снижение растворимости серы за счет раскисления магмы компенсируется уменьшением ее содержания в магматическом объеме, что делает процесс силификации неэффективным в отношении накопления рудных веществ. К тому же при увеличении содержания кремнезема в расплаве повышается его вязкость, препятствующая осаждению и концентрированию сульфидных выделений.

3. Обогащение частиц сульфидного расплава цветными и благородными металлами за счет увеличения их контактов с силикатным расплавом (фактор R) практически нереализуемо. При взаимодействии ассимиляционной сульфидной жидкости с ненасыщенной серой магмой будет происходить не обогащение, а растворение сульфидов вплоть до их полного уничтожения. Это относится как к случаю опускания сульфидных капель в силикатном расплаве, так и к случаю прохождения потоков магмы над скоплениями (отстоями) сульфидной жидкости.

Обогащенность тяжелым изотопом ^{34}S руд норильских месторождений может быть связана не с ассимиляцией коровой серы, а с поступлением ее вместе с другими рудными компонентами [14] из верхней части земного ядра (см. рис. 2), благоприятной для накопления ^{34}S [18]. Что же касается существования в Норильском районе разнообразных по составу лав, в том числе разностей, обедненных рудными компонентами и обогащенных кремнием (надеждинская свита), то их образование наилучшим образом объясняется не контаминацией, а разными глубинами зарождения магм, различным составом (в первую очередь, минеральным) и степенью плавления исходного вещества (см. рис. 2) [5]. Например, магмы надеждинской свиты по составу близки к пироксеновой составляющей мантии и вполне могут быть продуктами ее плавления.

Известные скопления рудных веществ в



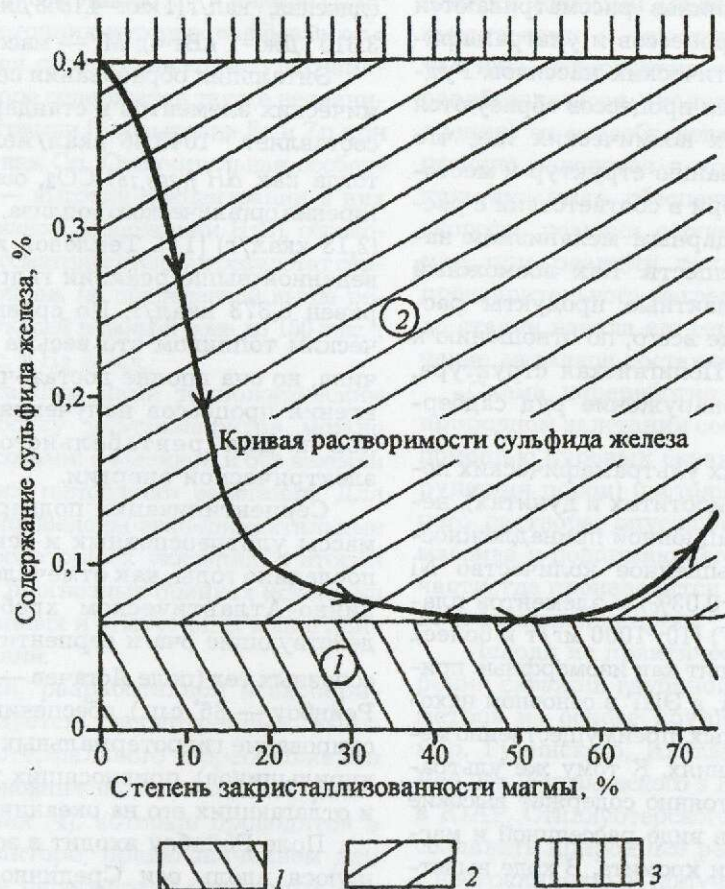


Рис. 6. Диаграмма насыщения серой (сульфидом железа) мафит-ультрамафических расплавов [21]:

поля магм: 1 — ненасыщенных, 2 — насыщенных, 3 — перенасыщенных

головных частях норильских интрузий иногда связываются с их привнесением флюидами (в том числе трансмагматическими) из тыловых частей и глубинных магматических очагов. При этом признаки проявления такого процесса не приводятся, а возможности его реализации не анализируются. Остается неясным, каким образом многомиллионная масса рудного материала переносится флюидами, фиксируемая масса которых меньше, чем масса рудного вещества, а растворимость рудных компонентов составляет тысячные и миллионные доли от растворителя?

Часто наблюдаемое сонахождение рудных выделений с флюидными соединениями (что обычно и служит основанием для допущения значительной их роли в рудообразовании) объясняется совместным длительным (постинтрузивным) пребыванием в подвижном состоянии этих двух фаз — сульфидной жидкости и флюидов. То есть их тесная ассоциация имеет не химическую, а физическую природу с проявлением признаков межфазного химического взаимодействия.

Новые источники и методы получения цветных и благородных металлов. В качестве

Рис. 5. Ксенолиты в породах интрузии Норильск I:

а — ксенолит ангидрита (внизу) в такситовом габбро-долерите, ум. в 1,5 раза; б — фрагмент ксенолита песчаника (вверху) в оливиновом габбро-долерите (в середине видна мелкозернистая закаленная зона), ум. в 1,5 раза; в — ксенолиты аргиллита и песчаника (белое) в контактовом габбро-долерите, ум. в 2 раза; г — ксенолиты песчаника (крупный в левой части и более мелкий в правой вверху) в пикритовом габбро-долерите, ум. в 2 раза; д — ксенолиты угля в лейкократовом габбро, обнажение одноименного силла, ум. в ~10 раз

новых рудных источников рассматриваются продукты ударных процессов и ультрамафические породы магматических массивов. Рудные продукты ударных процессов образуются при падении больших космических тел, что приводит к формированию структур и месторождений типа Садбери в соответствии с рассмотренным выше ударным механизмом накопления рудных веществ. Как возможный новый источник импактные продукты рассматриваются, прежде всего, по отношению к России, где имеется Попигайская структура, перспективная на обнаружение руд садберского типа [8].

В малоизмененных ультрамафических породах (пикритах, перидотитах и дунитах), независимо от их формационной принадлежности, содержится повышенное количество Ni (0,1–0,4%), Co (0,005–0,03%) и элементов платиновой группы (ЭПГ) (10–1000 мг/т и более). Никель и кобальт входят как изоморфные примеси в состав оливина, а ЭПГ в основном находятся в самостоятельных, преимущественно металлургических, соединениях. К тому же ультрамафические тела постоянно содержат высокие концентрации хрома в виде рассеянной и массивной минерализации хромита. В ходе выветривания ультрамафитов образуются промышленные россыпные месторождения ЭПГ.

Извлечение цветных и благородных металлов из ультрамафических пород традиционными методами неэкономично, но, как показали наши исследования, при применении специальных технологий вполне может быть рентабельно. Принципиальная особенность этих технологий состоит в том, что в них используется энергия, содержащаяся в самих ультрамафитах.

Преобладающим первичным минералом ультрамафитов является оливин ($\text{MgFe}_2\text{SiO}_4$), который при нагреве в присутствии воды легко превращается в серпентин ($\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) с выделением значительного количества тепла, например, по реакции: $6[(\text{Mg}_{1,5}\text{Fe}_{0,5})\text{SiO}_4] + 7\text{H}_2\text{O} = 3[\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4] + \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2$.

Тепловой эффект образования серпентина и других соединений приблизительно можно оценить исходя из величин их энтальпий, в том числе определенных для стандартных состояний ($\Delta H_f^{(298,15)}$):

$$Q_i = \Delta H_i \cdot M_i,$$

где Q_i — количество тепла, выделившегося или поглощенного; ΔH_i — энтальпия образования со-

единения, кал/г (1 кал=4,1868 Дж; 3600 Дж=1 Вт·ч; $3,610^6$ Дж=1 кВт·ч); M_i — масса вещества, г.

Энтальпия образования серпентина из химических элементов в стандартном состоянии составляет –1043,36 ккал/моль (3,76 ккал/г), тогда как $\Delta H_f^{(298,15)}$ CO_2 , основного продукта горения органического топлива, –94,05 ккал/моль (2,13 ккал/г) [11]. Тепловой же эффект приведенной выше реакции гидратации оливина равен 0,373 ккал/г. По сравнению с органическим топливом это весьма скромная величина, но она вполне достаточна для осуществления процессов получения ценных металлов и для рентабельного производства электрической энергии.

Серпентинизации подверглись огромные массы ультраосновных и основных пород. В последние годы, как отмечалось выше, в Срединно-Атлантическом хребте обнаружены действующие очаги серпентинизации ультраосновных тел (поле Логачев — 14°15' с.ш. и поле Рейнбоу — 36° с.ш.), обеспечивающие функционирование гидротермальных потоков (черных курильщиков), приносящих рудное вещество и отлагающих его на океаническом дне [3, 12].

Поле Рейнбоу входит в зону, протягивающуюся вдоль оси Срединно-Атлантического хребта с перерывами от экватора до 36° с.ш., где ежегодно образуется, как предполагается по различным оценкам, около 0,5–0,6 км³ серпентинитов. Оно расположено на западном склоне осевого поднятия Рейнбоу в пределах глубин от 2270 до 2320 м. Его протяженность с запада на восток составляет 250 м, с севера на юг — 60 м. Считается, что здесь проявлен один из самых интенсивных потоков глубинного вещества в пределах Срединно-Атлантического хребта. В границах поля обнаружены более 10 групп активных черных курильщиков и большое количество реликтовых сульфидных построек. Существование поля и поднятия связывается не с вулканическими (магматическими) процессами, как это имеет место в большинстве случаев, а с протрузией (диapiroвым поднятием) ультраосновных масс, под которыми отсутствует магматическая камера. Проникающая по системе трещин океаническая вода частично участвует в серпентинизации ультраосновных пород и в результате этого значительная ее доля превращается в высокотемпературный (364°C) гидротермальный флюид, выходящий на поверхность океанического дна. Флюиды характеризуются высокими concentra-

циями кобальта (7500 нмоль/кг) и никеля (130–190 нмоль/кг), источник которых связывается с подвергающимися серпентинизации ультрамафитами. В растворе содержатся также незначительные концентрации Si и высокие Fe и Zn при малых количествах Cu. Отличительная особенность флюидов — высокие концентрации в них H_2 и CH_4 (при низком содержании H_2S), образование которых рассматривается как результат серпентинизации оливина по приведенной выше реакции, продуцирующей в данной зоне до 150 тыс. т CH_4 и до 300 тыс. т H_2 в год.

По разработанным нами технологическим схемам переработку ультрамафитов можно вести двумя способами: с выемкой и без выемки пород из мест их природного залегания. Для первого способа проведены экспериментальные испытания в лабораторных условиях, а второй основывается на прогнозных оценках исходя из лабораторных данных и отмеченных выше природных наблюдений.

В технологии, разработанной в экспериментах, используется рассмотренный выше механизм гидротермального переотложения веществ. Она основана на химических транспортных реакциях [4], которые проводятся в специальном реакторе, предназначенном для гидротермальной переработки различных материалов [13]. Суть ее состоит в осуществлении процесса серпентинизации дробленой породы в камере растворения с одновременным выносом из исходного материала цветных и благородных металлов и их отложением в металлическом виде в камере кристаллизации постоянно циркулирующим (под влиянием температурного градиента) водным раствором. Например, если в качестве водной фазы применять раствор серной кислоты, то металлы будут выноситься сульфатным комплексом, который в камере кристаллизации разрушается с выпадением в осадок металла и восстановлением молекулы H_2SO_4 . Последняя циркулирующим потоком раствора возвращается в зону растворения и снова соединяется с металлом и т.д., вплоть до полного выноса рудных компонентов: $Ni + H_2SO_4 = NiSO_4 + H_2$ (камера растворения) $\rightarrow NiSO_4 + H_2$ (каналы переноса) $\rightarrow H_2SO_4 + Ni$ (камера кристаллизации) $\rightarrow H_2SO_4$ (возврат в камеру растворения).

Загрузка исходного материала и выгрузка получаемых продуктов производятся непрерывно в автоматическом режиме. В связи с тем, что перемещение веществ вдоль камер осуществ-

ляется шнеками (являющимися идеальными смесителями и идеальными вытеснителями), частицы перерабатываемого материала легко освобождаются (вследствие межзернового трения) от новообразований серпентина и постоянно находятся в контакте с водой. В результате этого обеспечивается максимальная скорость реакции серпентинизации. Выделяемое при реакции тепло используется для предварительного нагрева исходного вещества до стадии начала его серпентинизации. Извлечение металлов составляет от 80 до 90%.

Схема переработки ультрамафитов в их природном залегании состоит в организации (с помощью буровых скважин и стартового разрушения пород) постоянной циркуляции водного раствора, опускающегося по периферии массива и поднимающегося в его центральной части, где производится сьем рудного вещества и тепловой энергии.

Исходя из практической возможности бурения скважин глубиной до нескольких километров на основе крупных массивов (например, Гулинского, Инаглинского, Кондерского, Рай-Из, Бураковского в России, Бушвельдского в ЮАР, Стиллуотерского в США и др.) можно создавать природные реакторы, по существу, с неограниченным получением тепловой энергии и содержащихся в них металлов (распространенность ультрамафитовых масс в мире такова, что по запасам тепловой энергии они превышают известные запасы ископаемого топлива, оцениваемые по углероду в $\sim 5 \cdot 10^{12}$ т, и запасы рассматриваемых металлов).

На основе сочетания процесса серпентинизации и химических транспортных реакций нами разработана также эффективная технология переработки сравнительно бедных вкрапленных руд платино-медно-никелевых месторождений Норильского района, отработка которых современными методами нерентабельна. В ней используется тепловой эффект серпентинизации оливина пикритового габбро-долерита, являющегося основным носителем вкрапленных руд норильских месторождений. Авторагрегированный в реактор пикритового материала обеспечивает поддержание непрерывного процесса переотложения рудного вещества — его вынос из камеры растворения и отложение в камере кристаллизации с выделением дополнительного кристаллизационного тепла (~ 30 ккал/моль). Получаемой тепловой энергии достаточно не только для переработки руд пикритового горизонта,

но и для добавляемых к ним вкрапленных руд такситового и контактового габбро-долеритов. Массоперенос рудного вещества при этом составит ~10% в час от массы исходного (загружаемого в реактор) сульфидного материала. Реализация данной технологии позволит существенно расширить сырьевую базу Норильского комбината.

В заключение можно сделать следующие выводы.

1. Рудное вещество платино-медно-никелевых и платиновых месторождений первично по своей природе. Оно является самостоятельной рассеянной частью исходного мантийного и ядерно-мантийного материала. Его концентрация до промышленных значений происходит при закономерных упорядоченных процессах зарождения, внедрения и становления магматических масс. Случайности и хаос не свойственны эндогенному платино-медно-никелевому рудообразованию.

2. Существует несколько механизмов накопления рудных веществ: фракционного плавления, транспортно-гравитационный, сейсмогравитационный, гидротермальный и магматического переотложения, ударный и ассимиляционный. Первый из них действует в ходе мантийной магмогенерации, приводящей к образованию сульфидоносных магм и обогащенного рудными компонентами ресгитового материала, второй — при внедрении магм норильского типа и коматитовых формаций, третий — становлении крупных расслоенных комплексов типа Бушвельда и Стиллутер, четвертый — образовании эпигенетических руд печенгского и других типов и перераспределении металлов платиновой группы в ультрамафических массивах, пятый — формировании руд типа Садбери, шестой — играет второстепенную роль в рудообразовании.

3. В качестве новых источников получения цветных и благородных металлов могут использоваться продукты импактных процессов, формирующих месторождения типа Садбери (перспективна Попигайская структура) и крупные малоизмененные ультрамафические тела (Гулинский, Инаглинский, Кондерский, Рай-Из и др. в России, Бушвельдский в ЮАР, Стиллутер в США и др.).

4. К новым технологиям относятся разработанные в ЦНИГРИ и в ГИНЦВЕТМЕТе способы и оборудование, позволяющие осуществлять химический транспорт веществ с выносом и концентрацией ценных компонентов, в том числе в режиме авторазогрева с исполь-

зованием тепловой энергии гидратации минералов рудосодержащих пород. Новые технологии позволяют расширить источники получения цветных и благородных металлов и тепловой энергии, делая их практически неограниченными по запасам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Годлевский М.Н., Лихачев А.П. Экспериментальные и физико-химические данные о формировании медно-никелевых месторождений // Проблемы петрологии в связи с сульфидным медно-никелевым рудообразованием. М., 1981. С. 138–147.
2. Годлевский М.Н., Лихачев А.П. Условия образования и эволюция рудоносных ультраосновных магм // ЗВМО. 1981. Вып. 6. С. 646–655.
3. Леин А.Ю., Сагалевич А.М. Курильщики поля Рейнбоу — район масштабного абиогенного синтеза метана // Природа. 2000. № 8. С. 44–53.
4. Лихачев А.П. Теоретические и экспериментальные основы разделения веществ методом транспортных реакций // Теория процессов производства тяжелых цветных металлов. М., 1991. С. 116–120.
5. Лихачев А.П. Трапповый магматизм и платино-медно-никелевое рудообразование в Норильском районе // Отечественная геология. 1997. № 10. С. 8–19.
6. Лихачев А.П. Структура распределения и условия накопления металлов платиновой группы и других рудных компонентов в Талнахских интрузиях // Платина России. М., 1999. Т. IV. С. 86–100.
7. Лихачев А.П. Расслоенность и рудоносность интрузивных комплексов как результат становления магматической системы в условиях сейсмогравитационного воздействия // Петрология. 2000. Т. 8. № 6. С. 634–649.
8. Лихачев А.П. Перспективные направления работ на никель, медь и платиноиды в Норильском районе и на прилегающих территориях // Руды и металлы. 2000. № 4. С. 24–33.
9. Лихачев А.П., Кириков А.Д., Ли-Фату А.В. Изотопия переходных элементов: новые возможности в геохимических исследованиях // Руды и металлы. 1995. № 3. С. 24–34.
10. Лопатин Г.Г. К открытию россыпей благородных металлов в Маймеч-Котуйской провинции // Очерки по истории минеральных богатств Таймыра. Новосибирск, 2001. С. 156–158.
11. Наумов Г.Б., Рыженко В.Н., Ходаковский И.Л. Справочник термодинамических величин. — М.: Атомиздат, 1971.
12. Новый тип современной минералообразующей системы: «черные курильщики» гидро-

- термального поля 14°45' с.ш., Срединно-Атлантический хребет / Ю.А.Богданов, Н.С.Бортников, И.В.Викентьев и др. // Геология рудных месторождений. 1997. Т. 39. № 1. С. 68–90.
13. Реактор для гидротермальной переработки материалов / А.П.Лихачев, П.Н.Комозин, М.И.Мельников, Ю.И.Кресан // Роспатент. Патент № 2073733. 1997.
 14. Applications of the ^{190}Pt – ^{186}Os isotope system to geochemistry and cosmochemistry / R.J.Walker, J.W.Morgan, E.S.Beary a. o. // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 1997. Vol. 61. № 22. P. 4799–4807.
 15. Controls on the composition of Ni-Cu sulfide deposits as illustrated by those at Noril'sk, Siberia / A.J.Naldrett, V.A.Fedorenko, M.Asif a.o. // *Econ. Geol.* 1996. Vol. 91. P. 751–773.
 16. Geodynamics of magmatic Cu-Ni-PGE sulfide deposits: New insights from the Re-Os isotope system / D.D.Lambert, J.G.Foster, L.R.Frick a. o. // *Econ. Geol.* 1998. Vol. 93. № 2. P. 121–136.
 17. Ivanov B.A., Deutsch A. Sudbury impact event: Cratering mechanics and thermal history // *Geol. Soc. Amer. Spec. Pap.* 339. 1999. P. 1–9.
 18. Likhachev A.P. Sulfides of Noril'sk copper-nickel-PGE deposits as the earth core substance // IAGOD Symposium, Orleans, France. Abstracts supplement N 3 to Terra nova. 1993. Vol. 5. P. 28.
 19. Likhachev A.P. The discovery of a new Maimecha-Kotuyskaya platinum bearing province in the north of the Siberian platform: prognosis and its practical corroboration // 8th International Platinum Symposium. Abstract. Rustenburg. 1998. P. 203–205.
 20. Naldrett A.J., Duke J.M., Lightfoot P.C., Thompson J.F.H. Quantitative modelling of the magmatic sulfides: an exploration guide // *Bul. Can. Inst. Min. Met.* 1984. Vol. 77. P. 46–57.
 21. Naldrett A.J., Brugmann G.E., Wilson A.H. Models for the concentration of PGE in layered intrusions // *Can. Mineral.* 1990. Vol. 28. P. 389–408.

УДК 552.325 (235.5)

© А.А.Маракушев, Н.А.Панеях, И.А.Зотов, 2002

ПРОБЛЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ СУЛЬФИДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

А.А.Маракушев, Н.А.Панеях, И.А.Зотов (ИГЕМ РАН)

Огромный размах сульфидного оруденения медно-никелевых сульфидных месторождений Норильского района несоизмерим с небольшими размерами их материнских интрузивов. М.Н.Годлевский первым обратил внимание на связь ликвидационных сульфидных руд этих месторождений с богатыми железом ультраосновными дифференциатами, образование рудоносных интрузивов без нарушения стратиграфического разреза вмещающих толщ и антидромный характер траппового вулканизма, с которым связаны рудоносные интрузивы. Последующие исследования показали широкое развитие подобных месторождений в докембрии в связи с антидромными коматитит-базальтовыми толщами с существенно никелевой специализацией, а в более молодые эпохи — с базит-ультрабазитовым вулканизмом и интрузивным магматизмом от перидотит-верлитового к пикритовому с контрастным формированием железистых дифференциатов. Эта возрастная эволюция магматизма обусловлена нарастанием щелочного уклона в связи с формированием и утолщением континентальной коры. Метаматматическая сульфуризация железистых дифференциатов рудоносных интрузивов — главный механизм сульфидообразования, а участие в этом процессе трансмагматических флюидов определило активное проявление магматического замещения в становлении интрузивов.

Норильские медно-никелевые сульфидные месторождения, выявленные в трапповой формации на севере Сибирской платформы, поразили исследователей огромным размахом

сульфидного оруденения, несоизмеримого с небольшими размерами их материнских интрузивов. На заре их исследований это обсуждалось в работах В.К.Котульского, В.С.Домарева,

Н.С.Зонтова, М.Ф.Смирнова, Г.М.Шешуковой, Г.В.Роговера, предполагавших образование норильских рудоносных интрузивов при ассимиляции магмами гидротермальных сульфидных месторождений.

Работы перечисленных авторов предшествовали и отчасти были одновременными с исследованиями М.Н.Годлевского, обобщенными в его монографии [2], заострившей внимание на ключевых проблемах формирования медно-никелевых месторождений. Со свойственной талантливой интуицией М.Н.Годлевский постулировал в связи с генезисом сульфидных руд образование богатых железом ультраосновных дифференциатов, привлекая для своих выводов результаты экспериментов Я.И.Ольшанского (1951): «Результаты, полученные экспериментально Я.И.Ольшанским ближе всего подходят к природным гипербазитам, с той, однако, разницей, что они железистые, содержание Mg_2SiO_4 в шихте не превышало 15%. Что же касается ликвационных руд, то они связаны исключительно с магнезиальными породами» [2, с. 45]. Эта подмеченная М.Н.Годлевским контрастность составов по- существу и отражает процесс формирования сульфидных руд, обусловленных флюидной сульфуризацией богатых железом магматических ультраосновных дифференциатов [6], что схематически выражено реакцией в символах нормативных минералов: $MgFeSiO_4 + H_2S = MgSiO_3 + (FeS + H_2O)$. Сульфуризация сопряжена с развитием сульфидно-силикатной несмесимости, признаки которой на норильских месторождениях также были подмечены М.Н.Годлевским. Его геологические наблюдения выявили «вставленный характер» норильских интрузивов, которые заместили при внедрении огромные объемы слоистых пород платформенного чехла без существенного нарушения их стратиграфической последовательности. Такое замещение, практически не сопровождаемое гибридизмом, могло осуществляться лишь при участии потоков флюидов, фильтрующихся через расплавы (трансмагматических, по Д.С.Коржинскому). Эти флюиды и выступали в качестве факторов сульфуризации богатых железом магматических дифференциатов, определявших приобретение интрузивами металлогенической специализации.

Материнские интрузивы медно-никелевых сульфидных месторождений входят в трапповые формации, приурочиваясь к глубо-

ким тафрогенным прогибам кристаллического фундамента. Они систематически возникали в геологической истории, начиная с глубокого докембрия (2,9–2,7 млрд. лет), когда стали формироваться платформы, положившие начало развитию трапповых формаций со свойственным им антидромным образованием богатых железом магматогенных дифференциатов. Гипербазит-базитовый магматизм в них приобретал щелочной уклон, сопровождаемый образованием железистых расплавов, которые подверглись флюидной сульфуризации, сопровождавшейся формированием медно-никелевых сульфидных месторождений платино-палладиевой специализации [8].

В архее эти месторождения были подчинены базальт-коматиитовым формациям в Западной Австралии (Пилбара и др.), Канаде (Дьюмен, Моак, Лангмюр, Тексмен, Мапуотерс и др.) и Зимбабве (Шангани, Дамба, Эпок). Сульфидные руды представлены никеленосными типами с отношением Ni/Cu в пределах 15–30, например, на месторождении Камбалда в Австралии: Ni 2,96, Cu 0,22, Co 0,07%; Pd 425, Pt 326, Rh 220, Os 110, Ir 60, Au 339, Ag 1170 мг/т [4]. Массивные сульфидные руды залегают в них в нижних частях рудных залежей, сменяясь кверху прожилково-вкрапленными и вкрапленными, что характерно для всех типов сульфидных медно-никелевых месторождений. В сульфидоносных коматиитах и сульфидно-коматиитовых расслоенных лавах содержится множество признаков сульфидно-силикатной жидкостной несмесимости, сопровождающей их образование [12]. Сульфиды образуют в оливиновых породах капли («blebby sulfides») и сами в свою очередь служат матрицей силикатных выделений. Большие объемы сульфидной руды на месторождениях этого типа не согласуются с данными по ограниченной растворимости серы в силикатных расплавах. Это приводит цитируемых авторов к представлениям об отделении сульфидных расплавов от гипотетического «большого объема жидкой коматиитовой магмы» («a largely liquid komatiite magma»). Альтернативой подобных представлений служит развиваемая нами гипотеза трансмагматической сульфуризации богатых железом дифференциатов (в данном случае феррокоматиитовых магм), не имеющая ограничительного параметра в части объемов сульфидных руд, определяемых только количеством железа, сконцентрированного при магматических процессах.

Уникальность архейских месторождений состоит в их непосредственной связи с вулканическими породами — коматиитами, совместно с базальтами и долеритами образующими потоки и субвулканические силлы. Из этого следует, что металлогеническую специализацию ультрамафитовый магматизм приобрел еще в мантийных очагах. Отделение ультрамафитовых магм в них сопровождалось образованием богатых железом дифференциатов, подвергавшихся сульфуризации трансмагматическими флюидами с привносом никеля, платины, палладия, тогда как привнос меди играл в этих условиях незначительную роль. Этим обусловлена специфика архейских никелевых сульфидных месторождений коматиитовой формации [4], в частности почти никелевый состав руд, отличающий их от протерозойских и фанерозойских медно-никелевых сульфидных месторождений, генетически связанных с интрузивным магматизмом. Повидимому, с течением времени и развитием на Земле осадочной оболочки характер платформенного магматизма изменялся в направлении все более контрастного разделения трапповых формаций на вулканические лавы, изливавшиеся на поверхность, и плутонические интрузивы, внедрявшиеся в осадочные толщи платформенных прогибов. Эволюция платформенного магматизма приводила к изменению состава пород и в вулканической фации:

коматииты вытеснялись пикритами и описанная металлогеническая специализация становилась характерной для ультрамафитов плутонической фации. Механизм ее возникновения оставался неизменным, определяясь флюидной сульфуризацией богатых железом ультрамафитовых дифференциатов, но осуществлялся не в мантийных очагах, а в земной коре, большей частью на месте становления рудоносных интрузивов в иных условиях. Эти условия способствовали вытеснению никеля медью, а платины палладием, чему способствовал также переход от ультраосновных к основным ультрамафитам и к пикритам.

С архейскими месторождениями коматиитовой формации в России некоторыми авторами сопоставляется протерозойское месторождение Кингаш на юге Красноярского края (Восточный Саян), которое, согласно [9, с. 15] «во многом схоже с месторождениями рудного поля Камбалда в Западной Австралии». Только массивные руды этого месторождения относятся к никелевым с палладиевой металлогенической специализацией, вкрапленные же руды — медно-никелевые с платино-палладиевой специализацией (таблица) [1].

Кингашское месторождение приурочено к синклинальной структуре Канского зеленокаменного пояса в северо-западной части Восточного Саяна. Он сформировался в виде депрессионного вулканического трога около 1,9–2 млрд. лет

Содержание Ni, Co, Cu, S (%) и ЭПГ в сульфидных Cu-Ni рудах месторождения Кингаш, по А.И.Глотову и др., 2001

Руды	Ni	Co	Cu	S	Pt	Pd	Rh	Ni/(Ni+Cu)	Pt/(Pt+Pd)
1	0,72	0,02	0,28	1,30	0,52	0,54	0,05	0,72	0,49
2	1,50	0,03	0,29	2,67	1,28	0,76	0,05	0,84	0,63
3	1,05	0,03	0,92	3,00	0,82	1,60	0,06	0,53	0,34
4	2,00	0,03	0,90	5,28	0,92	0,76	0,04	0,69	0,55
5	0,70	0,02	0,47	1,29	0,26	0,22	0,03	0,60	0,54
6	16,70	0,36	0,98	24,36	0,22	5,80	0,07	0,94	0,04
7	0,52	0,02	0,20	0,54	0,40	0,32	0,02	0,72	0,56
8	0,46	0,01	0,15	0,52	0,30	0,34	0,03	0,75	0,47
9	2,90	0,07	0,85	13,52	0,03	0,50	0,04	0,77	0,06
10	6,20	0,10	0,38	26,94	0,09	1,25	0,06	0,94	0,07
11	0,12	0,02	0,07	2,55	0,03	0,01	0,01	0,62	0,71
12	0,05	0,01	0,02	0,51	0,06	0,07	0,01	0,73	0,47
13	0,08	0,01	0,05	1,18	0,08	0,02	0,01	0,60	0,78

Примечание. Разновидности руд: 1–5, 7, 8 — вкрапленные и гнездово-вкрапленные; 6, 9, 10 — жильные и брекчиевидные (9); 11–13 — вкрапленные, существенно пирротитовые (троилитовые).

назад, испытал сложные деформации и метаморфизм. По характеру базит-гипербазитового магматизма в нем различаются как эвгеосинклинальные офиолитовые формации, представленные Идарским дунит-гарцбургитовым комплексом с хромитовыми рудопрооявлениями (на р. Борынь), так и формации платиноносных гипербазитов, с которыми и связано Кингашское месторождение. Оно приурочено к платформенной депрессии, фиксируемой аномалией силы тяжести, отражающей воздымание под ней мантийного субстрата. В результате метаморфизма осадочные породы месторождения превращены в гнейсы (биотитовые, гранат-биотитовые и др.), сланцы и мраморы, а базит-гипербазитовые магматические породы в амфиболиты, актинолит-тремолитовые, тальковые и серпентиновые породы. Кингашская свита имеет мощность около 4 км и подразделяется на верхнюю и нижнюю толщ широкого распространения базит-гипербазитовых пород, разделенные существенно терригенной (гнейсовой) толщей. Согласно работе [9], подрудный комплекс пород представлен ортоамфиболитами, мраморами и гнейсами. Рудоносная пачка мощностью 40–120 м содержит богатые руды и состоит из амфиболитов, мраморов, перидотитов, дунитов, метаморфизованных коматиитов и пикробазальтов. В надрудных толщах последовательно возрастает роль основных вулканических пород, занимающих в верхних частях разреза 50% объема.

Несмотря на метаморфизм, базит-гипербазитовые породы месторождения по исходной природе подразделяются на вулканические (коматииты, пикриты, базальты и долериты) и плутонические (дуниты, верлиты, лерцолиты, пироксениты и габбро). Плутонические породы богаче железом, судя по средним составам коматиитов и дунитов (в скобках), %: SiO_2 39,82 (36,94), TiO_2 0,17 (0,16), Al_2O_3 2,33 (3,09), $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ 9,15 (13,89), MnO 0,12 (0,14), MgO 36,67 (35,63), CaO 1,38 (1,79), Na_2O 0,21 (0,12), K_2O 0,09 (0,09), п.п.п. 10,83 (8,21), Σ 99,70 (99,77) [9]. Поэтому можно полагать, что именно плутонический базит-гипербазитовый комплекс был на месторождении рудоносным, при его формировании возникали богатые железом дифференциаты, подвергавшиеся флюидной сульфуризации.

Дополнительным подтверждением этого служат вариации состава магнетит-хромшпинелевых твердых растворов в сульфидных медно-никелевых рудах. На месторождении

Кингаш хромшпинель-магнетитовый изоморфный ряд этих минералов аналогичен минералам месторождений, генетически связанных с плутоническими гипербазитами, примеры которых на диаграмме рис. 1 представляют месторождения Печенги на Кольском полуострове и Норильска на севере Сибирской платформы. На архейских платиновых месторождениях сульфидные руды содержат хромит-магнетитовые твердые растворы, практически без алюминия.

Ближайшим аналогом месторождения Кингаш может служить Аллареченское, залегающее в южном дислоцированном комплексе Печенгской кольцевой вулканической депрессии (рис. 2). Оно, как и месторождение Кингаш, локализовано в сложнотектонизированном амфиболит-гнейсовом комплексе, возникшем при наложении дислокаций, метаморфизма и гранитизации на южную окраину Печенгской кольцевой структуры. Однако в северной части рудоносная кольцевая структура сохранилась в слабодислоцированном состоянии, что представляет уникальные возможности получения генетической информации при их сопоставлении.

В работе [10] было обосновано выделение на Балтийском щите двух эпох метаморфизма — архейской и протерозойской. Образование Печенгской кольцевой рудоносной структуры относится к разделяющему их интервалу времени. Наложенные протерозойский метаморфизм и гранитизация охватили только южную часть Печенгской вулканической кольцевой депрессии, которая сформировалась на архейском кратоне, представленном кольцевой гранито-гнейсовой серией. Временной диапазон ее формирования — 2,5–1,7 млрд. лет. Вначале образовались базальные конгломераты и внедрился габбро-норитовый интрузив горы Генеральская, залегающий в основании Печенгской структуры. Возраст его по фазам внедрения относится к интервалу 2505–2447 млн. лет [15]. Породы вулканической депрессии сохранились в слабонарушенном состоянии только в ее северной части, где они представлены печенгской серией. Она разделяется на нижний и верхний вулканические комплексы мощной (1,5 км) толщей туфогенно-осадочных пород (ждановской свитой), к которой приурочены базит-гипербазитовые интрузивы (в количестве более 300) с медно-никелевыми сульфидными месторождениями (Пильгуйarvi и др.). Рудоносный горизонт представляет собой главный структурный элемент Печенгской депрессии, разделяющий ее вулканические комплексы на нижний и верх-

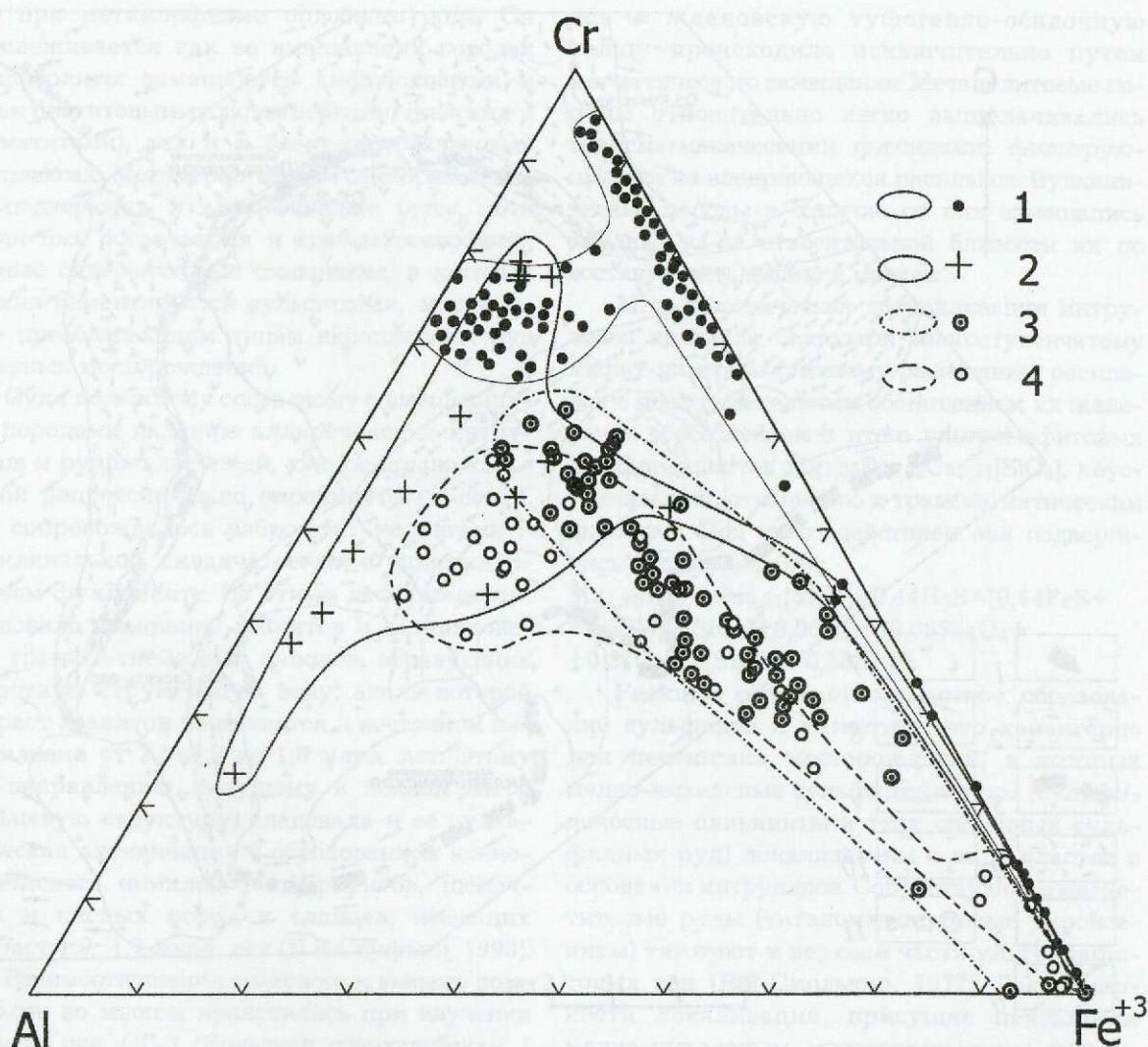


Рис. 1. Вариации состава хромшпинелей в сульфидных рудах и породах месторождений Камбалда в Австралии (1), Кингаш в Восточном Саяне (2), Печенга на Кольском полуострове (3), Норильск и Талнах в Сибири (4), сводка по данным [5, 9, 10]

ний. В подстилающем (нижнем) вулканическом комплексе по составу выделяется несколько свит, расчлененных маломощными слоями осадочных пород. Нижняя свита (I) представлена однородными толеитовыми базальтами, которые в вышележащих свитах (II и III) сменяются субщелочными базальтами, ферроандезитами и ферропикритами, пирокластическими породами.

Ждановская рудовмещающая свита фиксирует длительный перерыв в вулканических условиях осадконакопления, что предшествует обычно усилению щелочного уклона в составе магматических пород (комплексов) вулканических депрессий. В Печенгской структуре это нашло отражение как в составе вулканических

пород пильгуярвинской свиты, завершающей печенгскую серию, так и особенно в базит-гипербазитовых интрузивах, в огромном множестве внедрившихся в терригенную ждановскую свиту. Их щелочной уклон проявился в оливин-клинопироксеновом (верлитовом) составе ультрамафитов, в которых отсутствует ортопироксен, и в верхней (базитовой) части интрузивов, представленной габбро, габбро-диоритами, сиенито-диоритами, сиенитами, эссекситами и субщелочными гранитами. Рудный горизонт, связанный с базит-гипербазитовыми интрузивами, хорошо сохранился только в ее северной половине. В южной сильно-дислоцированной части кольцевой структу-

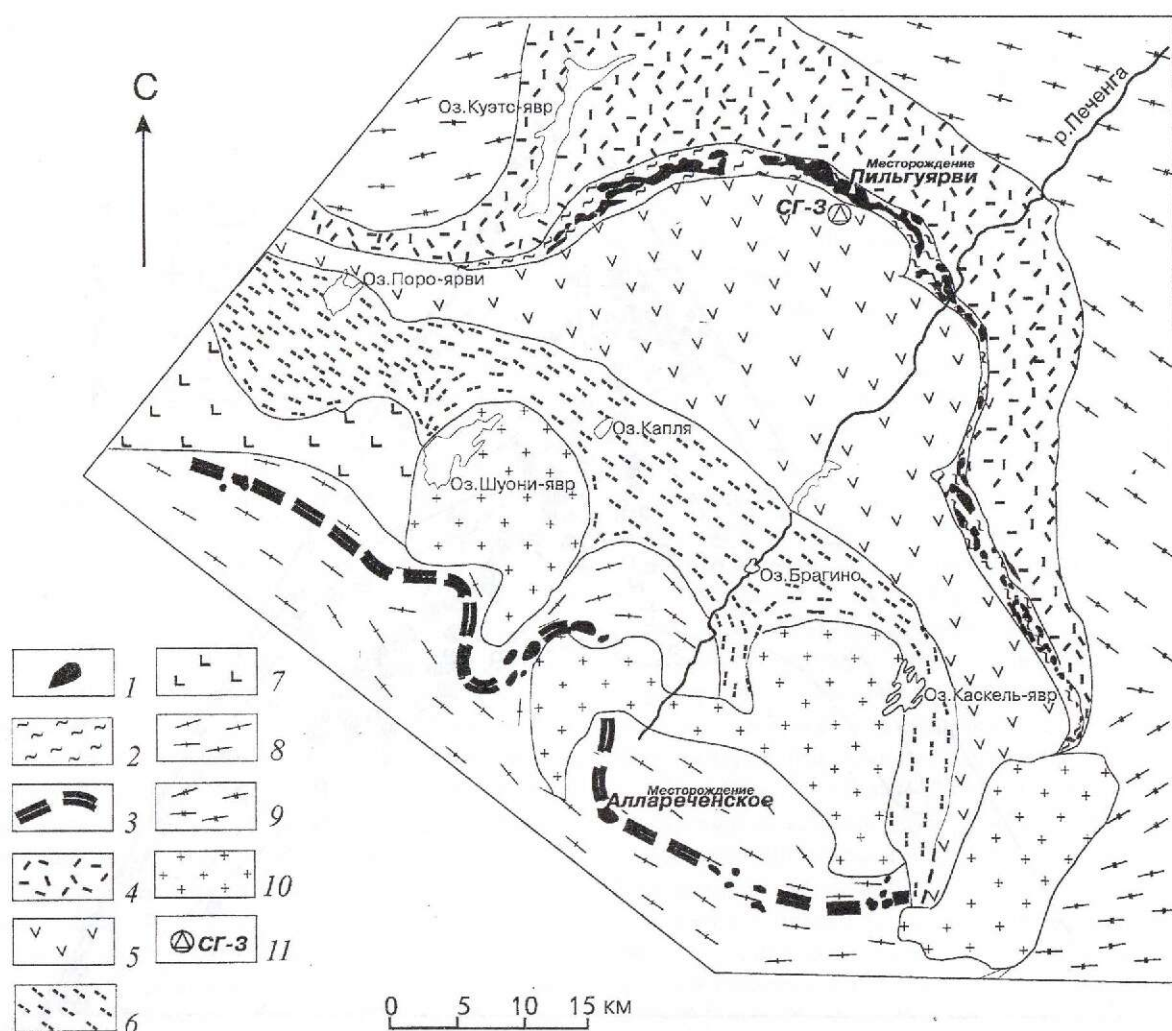


Рис. 2. Схематическая геологическая карта Печенгской кольцевой структуры, по [7] с упрощениями и дополнениями:

1 — базит-гипербазитовые интрузивы, в том числе рудоносные; вмещающие породы; 2 — туфогенно-осадочные ждановской свиты в северной части структуры; 3 — метаморфические (амфиболиты, гнейсы) в южной; 4 — нижний интрузивно-вулканический комплекс с прослоями осадочных пород; 5 — верхний вулканический комплекс (пильгуярвинская свита); 6 — комплекс вулканических, осадочных и метаморфических пород наложенной южнопеченгской структурной зоны; 7 — габбро; 8 — амфиболиты, гнейсы, мигматиты и сланцы нерасчлененные; 9 — гнейсы, мигматиты и амфиболиты кольцевой серии; 10 — граниты; 11 — скв. СГ-3 глубиной 12 км

ры он прослеживается фрагментарно по сохранившимся базит-гипербазитовым интрузивам, в том числе рудоносным, сопровождаемым медно-никелевыми сульфидными месторождениями (Аллареченское, Восток и др.). Они залегают в гнейсово-амфиболитовом комплексе на юго-западном склоне Аллареченского гранито-гнейсового купола и по составу сульфидного оруденения могут рассматриваться в качестве аналогов северных месторождений. Однако гипербазиты, вмещающие

оруденение, в южном и северном регионах различны: аллареченские, представленные дунит-гарцбургит-лерцолитовым рядом пород, беднее кальцием по сравнению с пильгуярвинским верлитовым (дунит-клинопироксенитовым) комплексом. Объясняется это тем, что аллареченские гипербазиты, как и вмещающие их породы, подверглись глубокому аллохимическому метаморфизму, связанному с развитием Аллареченского гранито-гнейсового купола. Вынос кальция из пород характе-

рен при метаморфизме подобного рода. Он прослеживается как во вмещающих породах (амфиболиты замещаются амфиболовыми и затем биотитовыми плагиогнейсами, гнейсами и мигматитами), так и в базит-гипербазитовых комплексах. Метаморфическим преобразованиям подверглись и аллареченские руды, хотя среди них встречаются и слабометаморфизованные сидеронитовые оливиниты, в которых оливин цементируется сульфидами, аналогичные преобладающим типам вкрапленных руд северных месторождений.

Судя по южному согласному с вмещающими породами падению аллареченских интрузивов и рудных залежей, южное крыло кольцевой депрессии было опрокинуто на север, что сопровождалось взбросами, надвигами и изоклинальной складчатостью в кристаллическом фундаменте. За этими деформациями следовало внедрение гранитов и возникновение гранито-гнейсовых куполов, образующих широтную структурную зону, вдоль которой возраст гранитов понижается в восточном направлении от 2,1–1,9 до 1,8 млрд. лет. Этому же направлению, секущему в южной части кольцевую структуру, следовала и ее вулканическая активизация с образованием южно-печенгского комплекса порфириров, щелочных и кислых пород и сланцев, имеющих возраст 1,9–1,7 млрд. лет (П.К.Скуфьин, 1993).

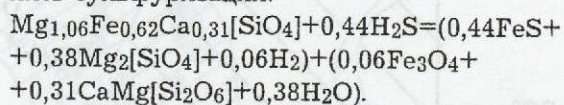
Взаимоотношения северного и южного комплексов во многом проявились при изучении разреза скв. СГ-3 (Кольская сверхглубокая / Под ред. Е.А.Козловского, 1984), по которой было выявлено нарастание степени метаморфизма пород печенгской серии с глубиной. В интервале глубин 5,7–6,8 км (маярвинская и телевинская свиты) вулканические породы вытесняются амфиболитами, гнейсами и сланцами, т.е. комплексом метаморфических пород, сходных с породами Аллареченского рудного поля. В результате метаморфизма переход к кристаллическому фундаменту кольцевой структуры (кольской серии) по скважине на глубине 6,7–6,9 км, как и в южном обрамлении депрессии, не имеет четких геологических границ.

Печенгская серия представляется, таким образом, реликтовой, сохранившейся в обстановке метаморфических преобразований. Уникальность этого объекта состоит в возможности исследования взаимоотношений магматизма и медно-никелевого рудообразования в протерозойской метаморфической формации [14].

Внедрение базит-гипербазитовых интрузи-

вов в ждановскую туфогенно-осадочную толщу происходило исключительно путем магматического замещения. Метапелитовые породы относительно легко выщелачивались трансмагматическими флюидами, фильтрующимися из внедряющихся расплавов. Вулканические породы в отличие от них замещались труднее из-за относительной близости их по составу внедрявшимся магмам.

Металлогеническая специализация интрузивов возникла благодаря многоступенчатому мафит-ультрамафитовому расслоению расплавов с последовательным обогащением их железом и обособлением в итоге ультрамафитовых дифференциатов $Mg_{1,06}Fe_{0,62}Ca_{0,31}[SiO_4]$, неустойчивых по отношению к трансмагматическим флюидам. Под их воздействием они подвергались сульфуризации:



Реакция отражает совместное образование сульфидов и магнетита, что характерно для печенгских месторождений, в которых медно-никелевые сульфидные руды (сульфидоносные оливиниты и тела сплошных сульфидных руд) локализованы в виде пластов в основании интрузивов. Сопутствующие магнетитовые руды (титаномagnetитовые пироксениты) тяготеют к верхней части ультрамафитовых зон (В.Ф.Смолякин, 1977). Закономерности локализации, присущие печенгским медно-никелевым месторождениям, относящимся к гипербазитовому (оливинитовому) типу, наблюдаются и в месторождениях других (базитовых) типов. Например, гигантские месторождения Норильского района на Сибирской платформе, связанные с небольшими пикрит-габбро-долеритовыми интрузивами, приурочены, как и печенгские, к вулканическим депрессиям (рис. 3). Интрузивы внедрялись в осадочные породы, почти не распространяясь в перекрывающие их базальтовые покровы (рис. 4).

Интрузивный магматизм развивался сопряженно с формированием пикрит-базальтовых покровов, представленных породами антидромных циклов и перекрывавших осадочные формации, вмещающие рудоносные интрузивы. Антидромность магматизма обусловлена влиянием трансмагматических флюидов, порождаемых магматическими очагами, разрастающимися на глубине за счет ультраосновного мантийного субстрата. Именно этой

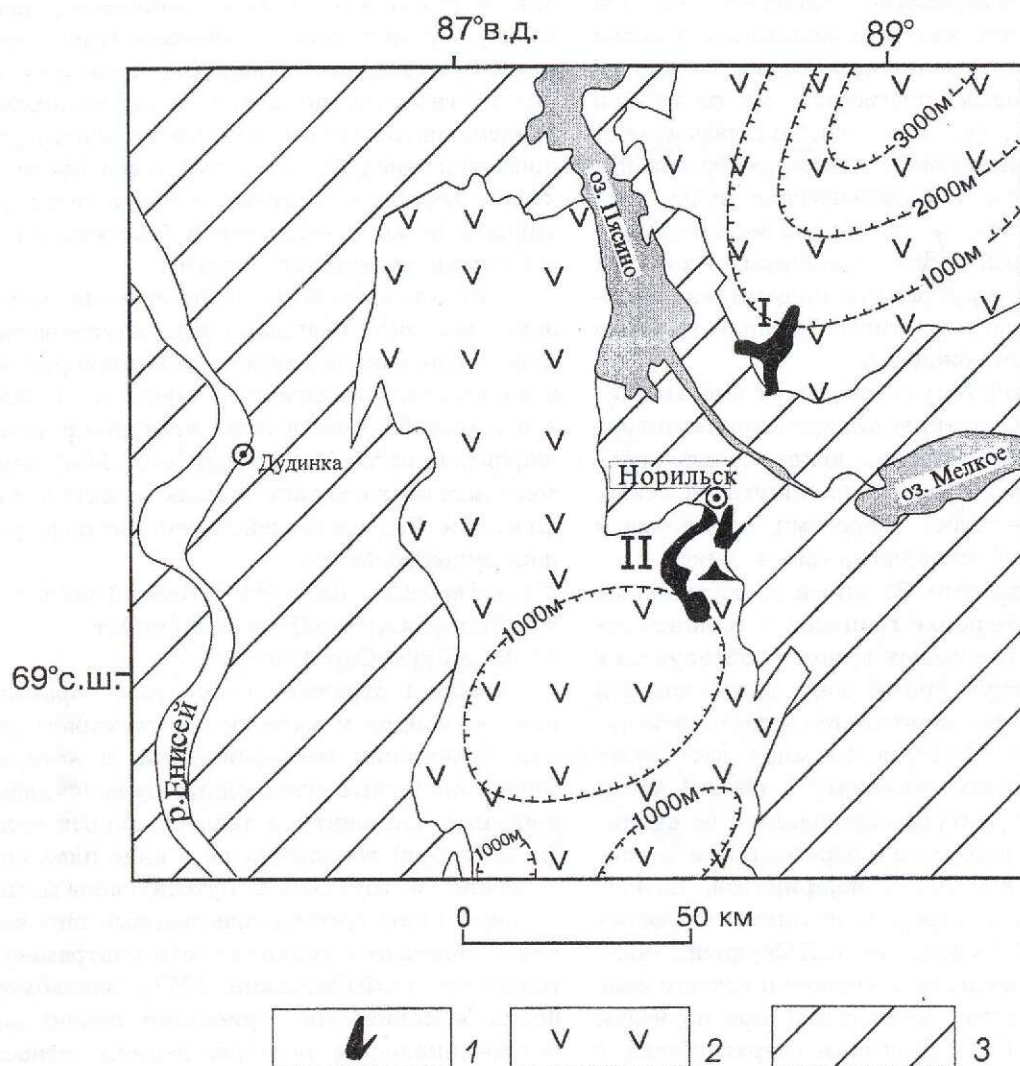


Рис. 3. Проекция на поверхность рудоносных интрузивов Норильского района, приуроченных к Хараелакской (I) и Норильской (II) депрессиям Сибирской платформы [11]:

1 — проекция интрузивов; 2 — покровы базальтов с изолиниями мощности (м), по [13]; 3 — осадочные породы протерозойского и палеозойского возраста

связью с глубинным ультраосновным магматизмом и определяется специализация интрузивов в отношении никеля и платиновых металлов. Дифференциация с обогащением расплавов железом играла главную роль при формировании их металлогенической специализации. Зарождение ее связано с разделением магматизма глубинных очагов на вулканический и плутонический. Эволюция интрузивного магматизма Норильского района приводит к разделению интрузивов на бедные

железом (безрудные) и железистые рудоносные, внедрявшиеся одновременно (см. рис. 4). В рудоносных интрузивах происходила дальнейшая дифференциация с ритмичным их расслоением и образованием пикритовых горизонтов (верхнего и нижнего), обогащенных хромом и платиновыми металлами. Богатые железом дифференциаты концентрировались преимущественно в нижних горизонтах.

Интрузивы, как и на Печенге, внедрялись путем магматического замещения пород плат-

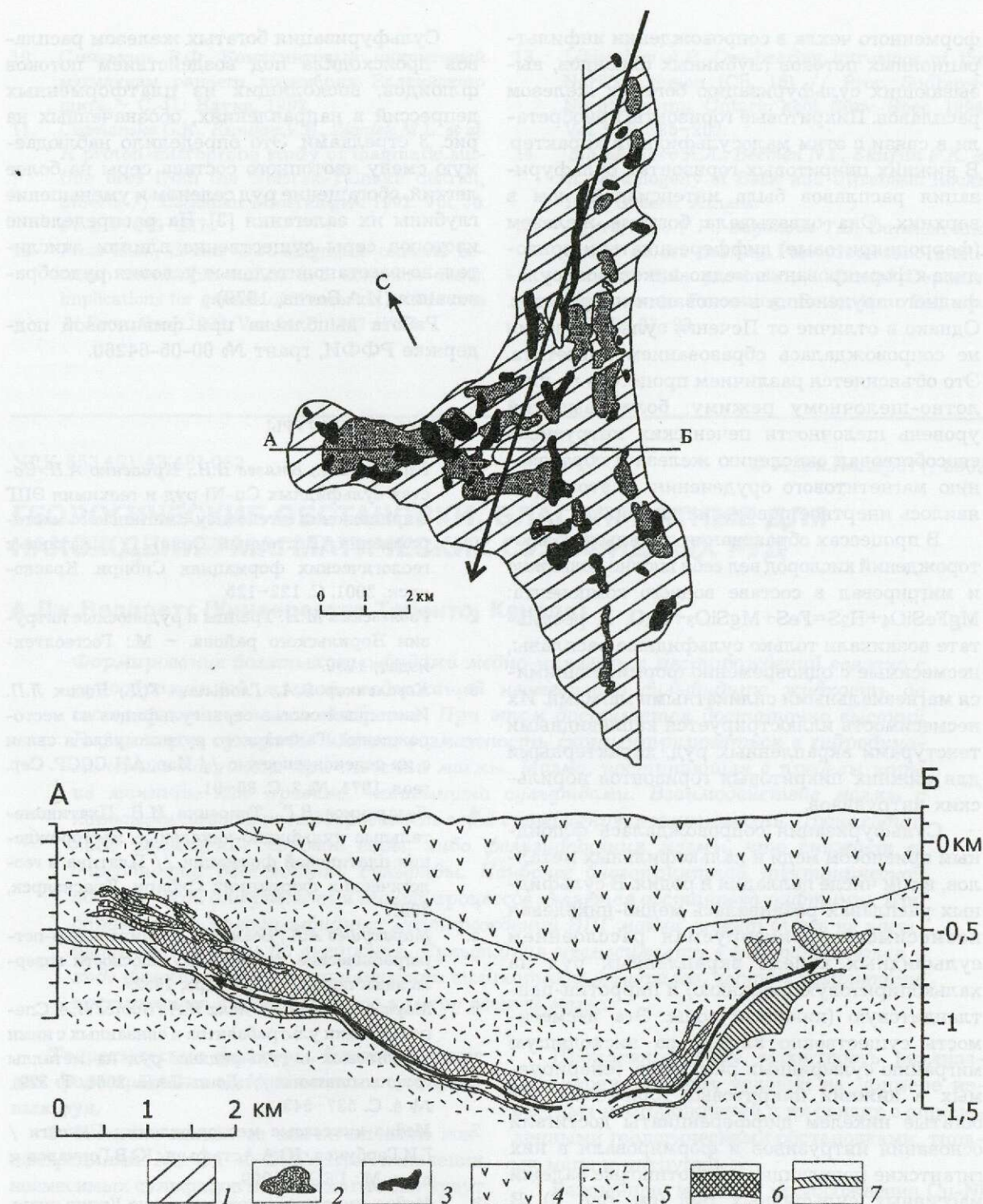


Рис. 4. Схема строения Хараелахской депрессии и размещения в ней рудоносных и безрудных интрузивов:

проекция на поверхность: 1 — рудоносных интрузивов, 2 — залежей массивных сульфидных руд в их основании, 3 — малосульфидных руд в их верхней части; геологический разрез депрессии по линии А-В: 4 — базальты, 5 — осадочные породы, 6 — рудоносные интрузивы с малосульфидными рудами в верхней части, вкрапленными и сплошными сульфидными рудами в основании; 7 — безрудные интрузивы; стрелки на проекции интрузивов и геологическом разрезе — направления воздымания интрузивов, сопровождаемого изменением изотопного состава серы $\delta^{34}\text{S}$ в рудных залежах (с использованием данных [3]) с 11 до 7‰ и одновременным повышением в них роли селена

форменного чехла в сопровождении инфильтрационных потоков глубинных флюидов, вызывающих сульфуризацию богатых железом расплавов. Пикритовые горизонты приобретали в связи с этим малосульфидный характер. В нижних пикритовых горизонтах сульфуризация расплавов была интенсивней, чем в верхних. Она охватывала богатые железом (ферропикритовые) дифференциаты и приводила к формированию медно-никелевого сульфидного оруденения в основании интрузивов. Однако в отличие от Печенги сульфуризация не сопровождалась образованием магнетита. Это объясняется различием процессов по кислотно-щелочному режиму; более высокий уровень щелочности печенгских интрузивов способствовал окислению железа и образованию магнетитового оруденения. В этом проявилось инертное поведение кислорода.

В процессах образования норильских месторождений кислород вел себя вполне подвижно и мигрировал в составе водного компонента: $MgFeSiO_4 + H_2S = FeS + MgSiO_3 + H_2O$. В результате возникали только сульфидные расплавы, несмешиваемые с одновременно формирующимися магнезиальными силикатными магмами. Их несмешиваемость иллюстрируется каплевидными текстурами вкрапленных руд, характерными для нижних пикритовых горизонтов норильских интрузивов.

Сульфуризация сопровождалась флюидным привнесом меди и халькофильных металлов, в том числе палладия и родия. В сульфидных расплавах развивалась медно-никелевая несмешиваемость, фиксируемая расслоением сульфидных капель вкрапленных руд на халькопиритовую (верхнюю) и пирротин-пентландитовую (нижнюю) зоны. Эта несмешиваемость существенно влияла на нисходящую миграцию сульфидных расплавов, генерируемых в нижних пикритовых горизонтах. Их богатые никелем дифференциаты достигали основания интрузивов и формировали в них гигантские пентландит-пирротиновые залежи массивных сульфидных руд (см. рис. 3). В отличие от них медистые более флюидные расплавы отличались меньшей глубиной миграции и формировали вкрапленные (гнездовые) сульфидные руды в такситовых габбро-долеритах, непосредственно подстилающих нижние пикритовые горизонты. В результате возникло закономерное строение рудных залежей в части распределения в их горизонтах меди, никеля и платиновых металлов [6].

Сульфуризация богатых железом расплавов происходила под воздействием потоков флюидов, восходящих из платформенных депрессий в направлениях, обозначенных на рис. 3 стрелками. Это определило наблюдаемую смену изотопного состава серы на более легкий, обогащение руд селеном и уменьшение глубины их залегания [3]. На распределение изотопов серы существенно влияли окислительно-восстановительные условия рудообразования (И.А.Зотов, 1979).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 00-05-64260.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глов А.И., Князев В.Н., Кривенко А.П. Состав сульфидных Cu-Ni руд и геохимия ЭПГ в приложении к генезису Кингашского месторождения (Восточный Саян) // Платина в геологических формациях Сибири. Красноярск, 2001. С. 122-125.
2. Годлевский М.Н. Траппы и рудоносные интрузии Норильского района. - М.: Госгеолтехиздат, 1959.
3. Коваленкер В.А., Гладышев Г.Д., Носик Л.П. Изотопный состав серы сульфидов из месторождений Талнахского рудного узла в связи с их селеноносностью // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1974. № 2. С. 80-91.
4. Лазаренков В.Г., Таловина И.В. Платинометаллы сульфидно-никелевые месторождения платиновой формации // Платина в геологических формациях Сибири. Красноярск, 2001.
5. Маракушев А.А., Безмен Н.И. Минералого-петрографические критерии рудоносности изверженных пород. - М.: Недра, 1992.
6. Маракушев А.А., Панеях Н.А., Зотов И.А. Специализация ультрабазитов и связанных с ними хромитовых и сульфидных руд на металлы группы платины // Докл. РАН. 2001. Т. 379. № 4. С. 537-543.
7. Медно-никелевые месторождения Печенги / Г.И.Горбунов, Ю.А.Астафьев, Ю.В.Гончаров и др. - М.: ГЕОС, 1999.
8. Медно-никелевое месторождение Джиньчуань в Китае и зависимость платиноносности гипербазитов от их щелочности / А.А.Маракушев, Н.А.Панеях, И.А.Зотов и др. // Геология рудных месторождений. 2000. Т. 42. № 5. С. 440-458.
9. Путеводитель по Кингашскому месторождению медно-никелевых и благороднометаллических руд (Восточный Саян) / Т.Я.Корнев, А.П.Романов, В.Н.Князев и др. - Красноярск: КНИИГИМС, 2001.

10. Смолькин В.Ф. Коматиитовый пикритовый магматизм раннего докембрия Балтийского щита. – С.-П.: Наука, 1992.
11. Czamanske G.K., Kunilov V.E., Zientek M.L. et al. A proton-microprobe study of magmatic sulfide ores from the Noril'sk-Talnakh district, Siberia // Canadian Mineralogist. 1992. Vol. 30. Pt. 2. P. 249–287.
12. Frost K.M., Groves D.J. Magmatic contacts between immiscible sulfide and komatiite melts: implications for genesis of Kambalda sulfide ores // Econ. Geol. 1989. Vol. 84. P. 1697–1704.
13. Likhachev A.P. Ore-bearing intrusions of the Noril'sk region (Ch. 16) // Proc. Sudbury-Noril'sk symp. Ontario geol. Surv. Spec. 1994. Vol. 5. P. 185–202.
14. Marakushev A.A., Bezmen N.I., Skuffin P.K. et al. Metallogeny of Basic and Ultrabasic Rocks. 1986. Greece, Athens.
15. Mitrofanov F.P., Bayanova T.B. Duration and timing of ore-bearing Paleoproterozoic intrusions of Kola province // Mineral Deposits: Processes to Processing, Rotterdam: Balkena, 1999. P. 87–93.

УДК 553.491'43'481.062

© А.Дж.Налдретт, 2002

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОБСТАНОВКИ, БЛАГОПРИЯТНЫЕ ДЛЯ НАХОЖДЕНИЯ МАГМАТИЧЕСКИХ СУЛЬФИДНЫХ РУД

А.Дж.Налдретт (Университет Торонто, Канада)

Формирование богатых сульфидами медно-никелевых месторождений связано с рудообразующей магмой, содержащей несмешиваемую сульфидную жидкость до своего окончательного внедрения. При этом достигается достаточно высокий R-фактор и сульфиды имеют возможность сконцентрироваться в гидродинамических ловушках при течении магмы. Магма, поступающая в пределы коры из мантии, как правило, недосыщена сульфидами. Взаимодействие магмы с коровыми породами поддерживает в ней сульфидную несмешиваемость. Происходит либо поглощение коровой серы, либо фельзификация магмы, что снижает ее способность растворять сульфиды. Наиболее благоприятной тектонической обстановкой для развития таких процессов является обстановка рифтинга. При образовании малосульфидных месторождений ЭПГ магма может быть не насыщена сульфидами до внедрения. Сульфидная несмешиваемость в ней развивается в ходе фракционной кристаллизации силикатных минералов, часто в результате поступления в интрузивную камеру свежей магмы.

Теоретические факторы, благоприятные для формирования магматических сульфидных руд.

1. Наличие магмы со значительными концентрациями Ni, Cu и ЭПГ. При появлении несмешиваемых сульфидов в такой магме они будут достаточно богаты названными металлами.
2. Магма достигает сульфидного насыщения и сегрегирует несмешиваемые сульфиды.
3. Сульфиды реагируют со значительным количеством магмы и накапливают халькофильные элементы до уровня промышленных содержаний.
4. Сами сульфиды концентрируются в отдельных участках магматической системы в количестве, достаточном для образования руды.

Проиллюстрируем вероятность реализации перечисленных условий на примере известных месторождений и их связей с определенными геологическими обстановками, типами магм и интрузий.

Важнейшие мировые месторождения Cu-Ni сульфидов (в противоположность малосульфидным месторождениям, которые ценны благодаря высокому содержанию ЭПГ) развиваются почти исключительно в основании магматических тел, с которыми они ассоциируют. Это позволяет предположить, что соответствующие магмы были насыщены сульфидами и уже содержали несмешиваемую сульфидную жидкость во время их окончательного внедрения. Экспериментальные данные [16, 29] свидетельствуют о

о том, что со снижением давления при подъеме магмы ее способность растворять сульфид увеличивается (рис. 1). Таким образом, даже если магма в районе мантийного источника была насыщена или почти насыщена сульфидами, по мере ее подъема степень такого насыщения снижается. Большинство базальтовых магм (исключая базальты срединно-океанических хребтов и некоторые расплавы, образованные при очень низкой степени частичного плавления) имеют высокие концентрации ЭПГ; они содержат 1–10 ppb Pt и близкое количество Pd. Это показывает, что первичные мантийные расплавы не были насыщены сульфидами. Поэтому при формировании магматического месторождения такого типа следует предполагать, что в соответствующей порции магмы происходили некоторые специфические процессы, которые вызвали сульфидное насыщение.

Главные факторы, контролирующие растворимость сульфида железа в силикатном расплаве, — это [17]: давление (1); температура (2); содержание в расплаве $\text{FeO}+\text{TiO}_2$ (3); степень окисленности расплава (4); соотношение мафитовых и фельзитовых компонентов (5).

Фактор давления обсуждался выше. Из немногочисленных экспериментальных данных, где рассматривается влияние температу-

ры (фактор 2), можно заключить, что снижение температуры природных магм от 1450 до 1200°C приведет к уменьшению растворимости сульфида в 3–5 раз. Однако большинство расплавов интродуцирует и изливается при температуре, близкой температуре их ликвидуса. Так что при остывании, когда способность магмы растворять FeS снижается, одновременно с сегрегацией сульфидов кристаллизуются и силикатные минералы. Сегрегирующие сульфиды будут смешиваться с силикатным кумулусом. Для того чтобы магматические Cu-Ni месторождения были промышленными, они (в противоположность малосульфидным месторождениям ЭПГ) должны содержать намного больше сульфидов, чем может быть образовано при совместном выделении силикатного кумулуса и сульфидной жидкости. Таким образом, одного фактора снижения температуры для образования промышленных месторождений недостаточно. Требуются некоторые внешние факторы, которые будут способствовать сегрегации значительного количества сульфидов без существенной кристаллизации силикатных минералов.

Растворимость сульфида тем выше, чем больше содержание $\text{FeO}+\text{TiO}_2$ (фактор 3) (см. рис. 1). В открытых магматических системах этот фактор тесно связан с обсуждаемыми ниже фак-

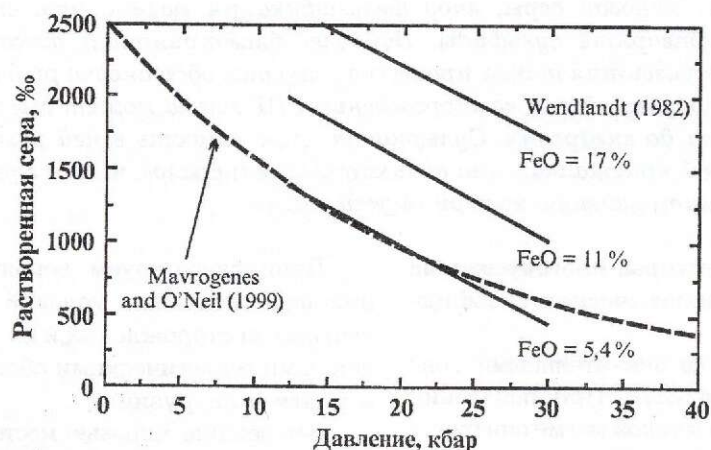


Рис. 1. Влияние общего давления на растворимость серы в базальтовых расплавах, по экспериментальным данным Wendlandt [29] и Mavrogenes and O'Neill [16]:

при подъеме (снижении давления) магмы увеличивается растворение сульфидов. Их сегрегация возможна только в следующих случаях: 1) когда магма кристаллизует силикатные минералы, так что концентрация сульфида в уменьшающемся объеме жидкости возрастает; 2) при добавлении серы из внешнего источника; 3) когда растворимость сульфида снижается в результате контаминации магмы; 4) при комбинации перечисленных факторов

торами 4 и 5. В закрытых системах содержание $\text{FeO}+\text{TiO}_2$ в остаточных расплавах может существенно увеличиться в ходе кристаллизации и фракционирования магм, что приведет к задержке развития сульфидной несмесимости.

В процессе окисления (фактор 4) происходит преобразование FeO в Fe_2O_3 , что снижает содержание FeO , и это может вызвать выделение сульфидов без обязательной кристаллизации силикатных минералов. Однако автору известен только один пример (месторождение Платриф в комплексе Бушвелд, где магма поглотила значительное количество известняков из вмещающих пород [2]), когда этот фактор мог играть существенную роль. Заметим, что Платриф не является Cu-Ni месторождением. Развита там сульфидная вкрапленность бедна в количественном отношении, она ценна благодаря высокому содержанию ЭПГ.

Влияние соотношения мафитовых и фельзитовых компонентов в силикатных расплавах (фак-

тор 5) рассматривалось в работе [11], где моделировалась фельзитизация базальтовой магмы при ее смешении с выплавкой гранодиоритового состава. Рассчитанная кривая насыщения сульфидом представлена на рис. 2. Здесь же приведены две модели смешения. Содержание сульфидов в магматических смесях будет находиться на прямых линиях, соединяющих составы смешивающихся расплавов. При определенных пропорциях смешения это содержание может оказаться выше предела растворимости, и сульфиды начнут выделяться из раствора, образуя капельки несмешиваемой сульфидной жидкости. Итак, фельзитизация базальтовой магмы в принципе может привести к развитию сульфидной несмесимости, но это зависит от содержания серы в базальтовом расплаве и степени фельзитизации.

Эмпирические факторы, благоприятные для формирования магматических сульфид-

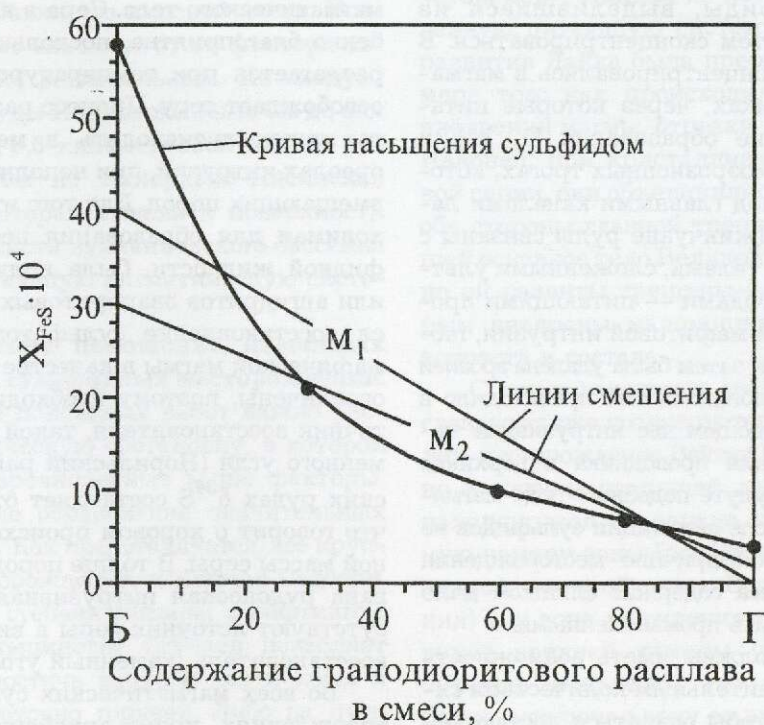


Рис. 2. Моделирование растворимости сульфида при смешении базальтовой магмы с выплавкой гранодиоритового состава при давлении 1 атм, по Li and Naldrett [11]:

X_{FeS} — мольная фракция FeS ; Б — базальтовый расплав (SiO_2 49,10, FeO 11,20, MgO 6,61%; T 1250°C); Г — гранодиоритовый расплав (SiO_2 66,70, FeO 3,30, MgO 1,86%; T 1180°C); M₁ — модель смешения базальтовой магмы ($X_{\text{FeS}}=4 \cdot 10^{-5}$, ~0,2% S) с гранодиоритовым расплавом ($X_{\text{FeS}}=0$, сера отсутствует); M₂ — модель смешения базальтовой магмы ($X_{\text{FeS}}=3 \cdot 10^{-5}$, ~0,15% S) с гранодиоритовым расплавом ($X_{\text{FeS}}=0,2 \cdot 10^{-5}$, ~0,01% S)

ных руд. Анализ генетических особенностей многих крупных Cu-Ni месторождений мира, представленный в работе [19], приводит к следующим выводам.

1. Для образования магматического сульфидного месторождения необходима сегрегация значительного количества сульфидов без обильной кристаллизации силикатных минералов. Как подчеркивалось выше, такой ход событий не является частью нормального процесса эволюции базальтовой или коматиитовой магмы в закрытой системе. В тех месторождениях, где причины развития сульфидной несмешиваемости выяснены, несмешиваемость главным образом вызывается взаимодействием магмы с коровыми породами. Во-первых, это добавление серы из внешнего источника: сульфидов в Дулуте и Камбалде [18] или, возможно, ангидритов в Норильске [22]. Во-вторых, это коровая контаминация (фельзификация) мафитовой магмы, что установлено в Норильске [20], Камбалде [10] и Войсис Бэе [13].

2. Для образования промышленного месторождения сульфиды, выделившиеся из магмы, должны затем сконцентрироваться. В Норильске руды концентрировались в магматических проводниках, через которые питались вулканические образования [1, 22], в Камбалде — в термоэрозийных трогах, которые развивались под главными каналами лавовых рек [10]. В Джинчуане руды связаны с воронкообразными телами, сложенными ультрамафитовыми породами — питающими проводниками крупной мафитовой интрузии, габбровая часть которой затем была удалена эрозией [3]. В Войсис Бэе рудонакопление происходило в проводнике, соединяющем две интрузивные камеры, и у вхождения проводника в верхнюю камеру [12, 24]. В Дулуте подобного рода магматические каналы после сегрегации сульфидов не развивались. По этой причине месторождения Дулутского комплекса содержат слишком мало сульфидов, чтобы быть промышленными.

3. Сульфиды должны иметь возможность реагировать со значительным количеством силикатной магмы, чтобы оказаться достаточно богатыми Ni, Cu и ЭПГ, т.е. должен быть достигнут достаточно высокий *R*-фактор*. А.Дж.Наддретт с соавторами [23] аргументировал, что в Норильском районе такие реакции

происходили в процессе течения магмы через проводящие каналы, после того как в каналы были введены сульфиды. Разные содержания Ni, Cu и ЭПГ в сульфидах разных рудно-магматических систем (Хараелахской, Талнахской и Норильск-I) объяснялись тем, что через эти системы проходило различное количество силикатной магмы. В месторождении Джуан рудного района Камбалда установлены значительные различия в содержании никеля в сульфидах двух соседних лавовых каналов, что хорошо объясняется разным объемом лав, протекавшим по каналам [8]. В работе [25] аргументируется, что содержание металлов в рудах месторождения Войсис Бэй могло возрасти за счет взаимодействия сульфидов с магмой, проходившей через питающий проводник, внутри или вблизи которого сконцентрированы руды.

Пути использования изложенных положений при геологической разведке ясны. Наличие серы во вмещающих породах является дополнительным фактором перспективности магматического тела. Сера в виде пирита особенно благоприятна, поскольку этот минерал разлагается при температуре около 800°C и освобождает серу. Процесс разложения пирита может происходить в метаморфических ореолах интрузий, при неполной ассимиляции вмещающих пород. Для того чтобы сера, необходимая для образования несмешиваемой сульфидной жидкости, была получена из гипсов или ангидритов эвапоритовых толщ, требуется восстановление сульфатов. Возможности мафической магмы в качестве восстановителя ограничены, поэтому необходим внешний источник восстановителя, такой как пласты каменного угля (Норильский район). В Норильских рудах $\delta^{34}\text{S}$ составляет от +6 до +14 [5], что говорит о коровом происхождении основной массы серы. В толще пород, где локализована рудоносная интрузивная система, присутствуют источник серы в виде ангидрита и восстановитель (каменный уголь).

Во всех магматических сульфидных месторождениях, кроме архейских, присутствие коровой серы почти однозначно устанавливается изотопным анализом серы.

Выявить процесс фельзификации магмы, который мог привести к развитию сульфидной

* *R* — отношение массы силикатного расплава, прореагировавшего с сульфидом, к массе сульфида; *R*-фактор — влияние, которое отношение *R* оказывает на состав сульфидов.

несмесимости, не всегда просто. Показателем такой реакции может быть присутствие в интрузии частично расплавленных обломков вмещающих пород или включений с реакционными каемками герцинита и (или) кордиерита [13, 15]. В работе [21] на примере Норильска и вулканитов Кивинован района оз. Верхнее показано, что свидетельством фельзификации может служить положительная корреляция отношения La/Sm с содержанием SiO_2 в валовом составе пород. Известно, что на коровую контаминацию магмы, обычно сопровождаемую фельзификацией, указывает изотопный состав Sr и Nd , иногда Pb .

Многие $Cu-Ni$ месторождения связаны с разного рода магматическими проводниками. Такие структуры гораздо более привлекательны с поисковой точки зрения, чем простые депрессии в основании интрузий. В Норильском районе рудоконцентрирующие магматические проводники развивались в основании вулканического бассейна, в области максимального прогиба его килевой части. Возможно, поисковое значение этого фактора является не только региональным. Не следует забывать, что руды Норильска были бы до сих пор скрыты под 3,5-километровой толщей базальтов, если бы не Кайеркано-Пясинская антиклиналь, которая вывела к поверхности центр килевой части вулканического бассейна и обнажила питающую магматическую систему.

Тектоническое положение известных магматических сульфидных месторождений. При постановке поисковых работ важно распознать геологическую обстановку, в которой проявляются перечисленные выше факторы, контролирующие образование значительных месторождений. Как представляется, все крупные $Cu-Ni$ месторождения, исключая Садбери, в той или иной степени связаны с рифтингом. Рифтинг в большинстве случаев позволяет магме быстро достичь верхней части коры и оставаться достаточно горячей. Либо на пути подъема, либо в конце внедрения магма реагирует с окружающими породами, контаминируется, и это приводит к развитию сульфидной несмесимости. Проявления рифтинга довольно многообразны. Обстановки, с которыми связаны важнейшие месторождения, представлены на рис. 3. Это зарождающийся внутриконтинентальный рифтинг, зрелые внутриконтинентальные рифтовые системы, рифтинг с открытием

океанического бассейна и рифтинг ранее существовавшей островной дуги.

Месторождения, связанные с зарождающимся рифтингом. Внутриконтинентальный рифтинг начинается с простого растяжения, при котором вдоль ослабленных зон внедряются интрузивные тела различной морфологии и сопровождающие их дайки. Наиболее характерный пример — Великая Дайка Зимбабве, имеющая раннепротерозойский возраст (2,47 млрд. лет). Длина этой интрузии 550 км при максимальной ширине 16 км. В поперечном сечении она имеет V-образную форму. Нижняя часть интрузии сложена ультрамафитовыми, верхняя — габбровыми породами. И та и другая серия пород была образована в результате многократных внедрений магмы. В верхней части ультрамафитовой серии развито вкрапленное сульфидное оруденение, богатое ЭПГ. Согласно интерпретации [30], главное тело интрузии (вдоль удлинения) образовано двумя «камерами», состоящими из нескольких «субкамер», каждая из которых имела собственную питающую систему. В начале своего развития Дайка была прерывистой. Затем, по мере того как происходили новые и новые внедрения магмы, отрезки Дайки сближались. Наконец, при кристаллизации пород габбровой серии, они объединились в единое тело. По обе стороны главной трещины, контролирующей основное тело Великой Дайки, параллельно ей развиты трещины-сателлиты, по которым внедрены маломощные дайки сходного возраста и состава.

С зарождающимся рифтингом, возможно, связано также позднепротерозойское (1334 млн. лет) месторождение Войсис Бэй. Оно приурочено к магмопроводящей дайке (соединяющей находящуюся на западе нижнюю интрузивную камеру зоны Рид Брук с верхней интрузивной камерой зоны Восточного Погружения) и к зоне вхождения проводника в основание верхней камеры (рис. 4). Детальное бурение показало, что магмопроводящая дайка, исключая зону ее вхождения в камеру Восточного Погружения, субвертикальна и ориентирована с запада на восток [4].

Субширотное простираие имеют и все другие дайки, соединяющие интрузивные тела, а также северная стенка интрузии Восточного Погружения. Все эти факты указывают на то, что субширотные структуры оказали сильное влияние на размещение интрузий в районе Войсис Бэй. Как видно из карты вос-

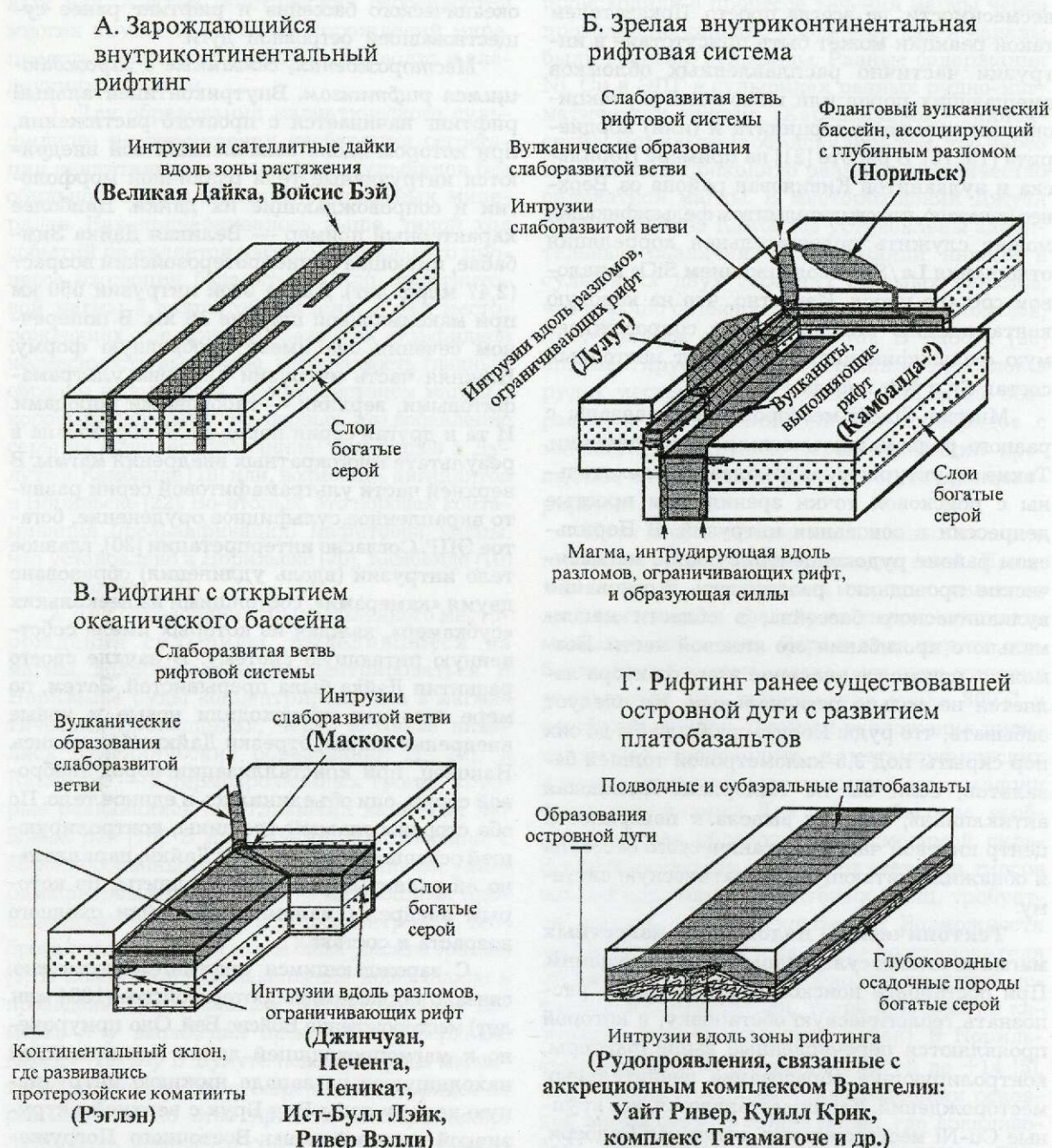


Рис. 3. Типы рифтинга, связанные с ними магматические образования и сульфидные магматические месторождения (А–Г)

точной части Центрального Лабрадора (рис. 5), в районе существует серия субширотных трещин, при эрозии которых образовались фьорды. Последняя активизация трещин относится к недавнему открытию Баффинова залива. Но они, возможно, представляют долгоживущие ослабленные зоны. Само месторождение Войсис Бэй располагается на трассе субмеридио-

нального сдвига Абловиака, который разделяет находящуюся на западе раннепротерозойскую провинцию Черчилл и расположенную восточнее архейскую провинцию Нэйн. Однако в работе [26] представлены данные о том, что действительная граница между этими двумя провинциями находится восточнее и что, может быть, сдвиг Абловиака не представляет собой структуру принци-



Рис. 4. Обобщенный субширотный геологический разрез, представляющий проекцию интрузии Войсис Бэй на вертикальную плоскость, по Lightfoot and Naldrett [14] с изменениями:

1 — тела габбро-троктолитов (магматические камеры); 2 — ассоциация пород магматического проводника; 3 — сульфидные руды

пиального значения. Следовательно, роль границы между провинциями Нэйн и Черчилл в отношении размещения оруденения остается неясной, в частности потому, что интрузии, образующие рудоносную систему, не имеют с ней связи. Эти интрузии, скорее, связаны со структурами субширотного простирания, которые, возможно, и контролировали их внедрение.

Месторождения, связанные со зрелыми внутриконтинентальными рифтовыми системами. Развитие некоторых рифтовых систем заканчивается на начальной стадии, когда происходило простое растяжение. Однако большинство из них продолжает развиваться с формированием грабенов, ограниченных ступенчатыми сбросами, которые выполняются вулканическими и обломочными породами. В некоторых рифтовых системах развиваются зоны тройного сочленения и фланговые вулканические бассейны.

Представляется, что позднеархейские коматиитовые лавы, с которыми связаны важные месторождения рудного района Камбалда и других частей зеленокаменного пояса Уилуна-Норсмен в Западной Австралии, развивались в рифтовой системе, заложенной на континентальной коре. Поэтому можно считать, что эти месторождения связаны с вулканистами, выполняющими внутриконтинентальный рифт.

Пример интрузивных образований, внедренных вдоль ступенчатых сбросов, ограничивающих рифтовую систему, — комплекс Дулут. Он относится к позднепротерозойскому

(1115–1090 млн. лет) магматизму Кивинован, связанному с развитием рифтовой системы Мидконтинент, которая прослеживается на расстояние более 1000 км в западной части Северо-Американской платформы (рис. 6). Комплекс Дулут находится у северо-западной границы рифтовой системы, вблизи зоны тройного сочленения образующих ее ветвей. Интрузия контактировала с раннепротерозойскими сульфидсодержащими сланцами и железистыми кварцитами, ассимилировала содержащуюся в них серу, что привело к развитию сульфидной несмесимости. Сульфидное оруденение распространено вдоль большей части северо-западного контакта комплекса Дулут. Данная зона оруденения — одна из крупнейших в мире по ресурсам руд. Сульфиды отличаются высокой концентрацией Ni, Cu и ЭПГ, но, поскольку вкрапленное оруденение бедное, оно не имеет промышленного значения.

В акватории оз. Верхнее развита наиболее мощная толща вулканических пород рифтовой зоны Мидконтинент. Направление рифтовой системы изменяется здесь с северо-восточного на юго-восточное. Предполагается, что здесь же начинается третья слаборазвитая ветвь рифтовой системы, которая простирается к северу. Обычно считается, что направление этой ветви маркируется силлами, развитыми у оз. Нипигон (см. рис. 6). Однако возможно, что первоначальное положение места тройного сочленения отмечено расположением интрузивного комплекса Колдвелл, который

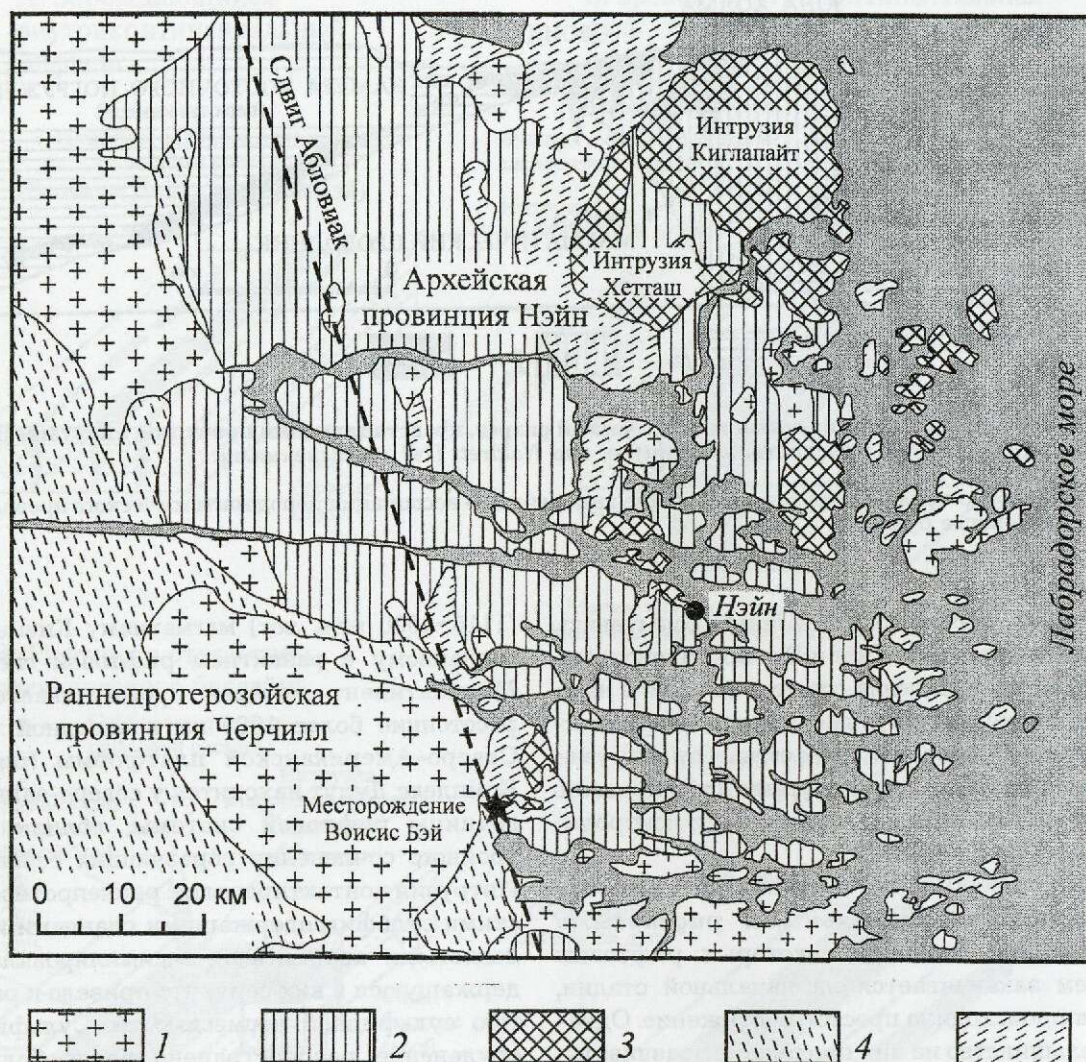


Рис. 5. Региональная геологическая карта восточной части Центрального Лабрадора, показывающая распространение интрузий плутоического комплекса Нэйн и фьорды, контролируемые долгоживущими ослабленными зонами:

позднепротерозойский плутоический комплекс Нэйн: 1 — гранитоиды, 2 — анортозиты, 3 — троктолиты; 4 — раннепротерозойские гнейсы Тасуик; 5 — архейские гнейсы Нэйн

относится к числу наиболее ранних интрузивных образований рифтовой системы (1108 млн. лет). Область сочленения сместилась к западу, к южной границе силлов Нипигон, вероятно, уже позднее. К северо-востоку от комплекса Колдвелл примерно на 200 км протягивается линейный пояс кольцевых щелочных интрузий, который может маркировать ослабленную зону. Комплекс Колдвелл состоит из трех интрузивных фаз. Ранняя фаза представлена достаточно крупной расслоенной интрузией

толеитового состава, две поздние — меньшими по размеру щелочными интрузиями. Ранняя толеитовая интрузия включает несколько зон обогащенного ЭПГ сульфидного оруденения, в том числе прерывистый слой апатит-магнетит-халькопиритовых руд, богатых палладием.

Наиболее крупные месторождения, относящиеся к обстановке зрелого рифтинга, конечно же, — норильские, сформированные на границе перми и триаса 251 млн. лет назад.

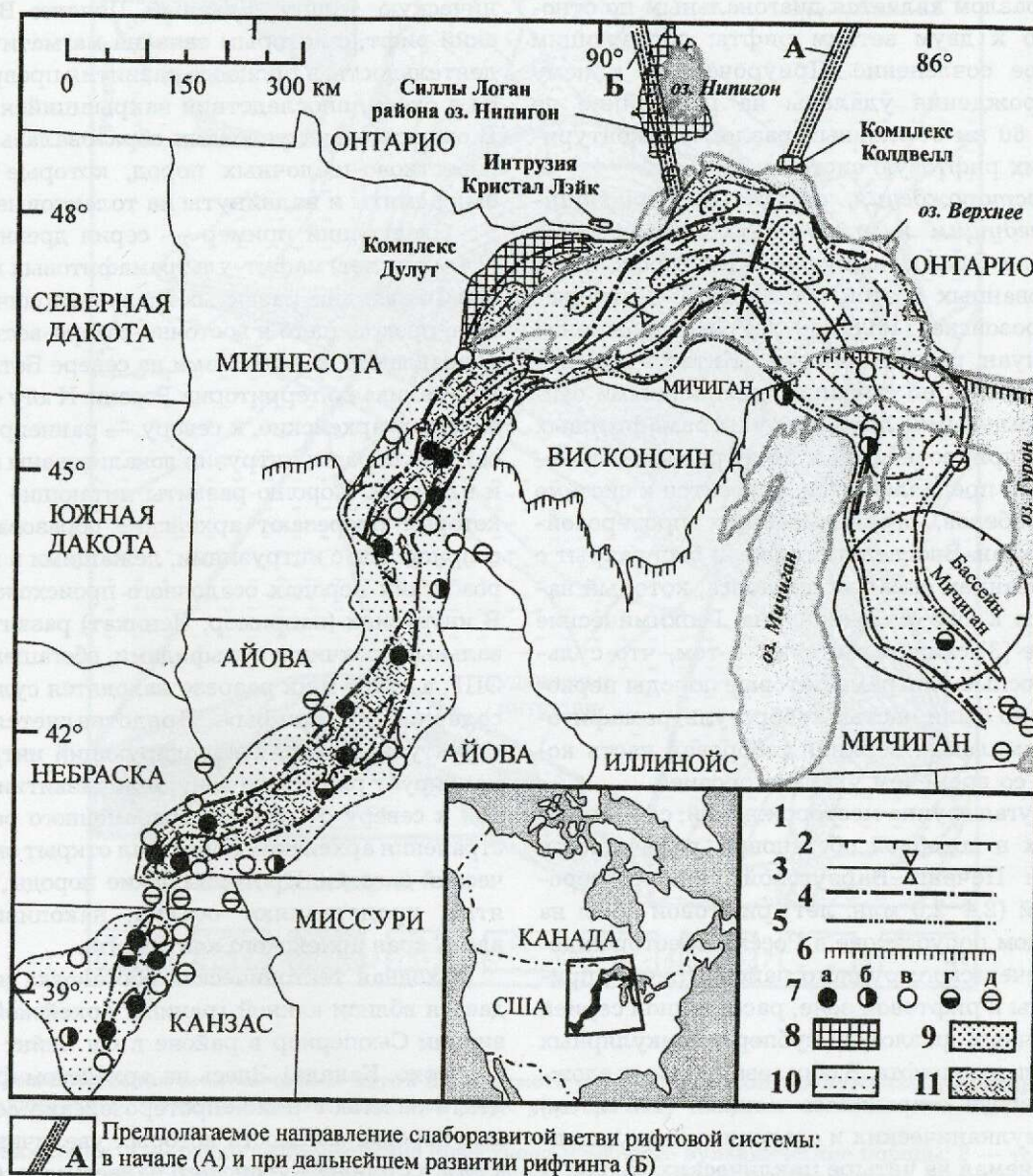


Рис. 6. Распространение пород, образующих рифтовую систему Мидконтинент, по Halls [6] с добавлениями автора:

1 — геологические границы; 2 — простирание и направление падения пород в районе оз. Верхнее; 3 — оси синклиналей; 4 — разломы; 5 — границы распространения вулканических пород Кивинован; 6 — северная граница палеозойского осадочного чехла; 7 — породы, вскрытые буровыми скважинами (а — мафитовые изверженные, б — красноцветные обломочные породы Кивинован и подстилающие мафитовые вулканические, в — красноцветные обломочные, г — красноцветные обломочные, лежащие непосредственно на фундаменте, д — вскрыт только фундамент супергруппы); 8 — интрузивные образования; 9 — зона распространения вулканических пород; 10 — зона распространения вулканических пород; 11 — зона распространения вулканических пород

Они связаны с вулканическим бассейном, который развивался на фланге рифтовой системы вдоль Норильско-Хараелахского разлома. Этот разлом является диагональным по отношению к двум ветвям рифта, образующим тройное сочленение. Приуроченные к нему месторождения удалены на расстояние не менее 60 км от главных разломов, оконтуривающих рифтовую систему.

Месторождения, связанные с рифтингом, ведущим к открытию океанического бассейна. Одно из важнейших месторождений, образованных в этой обстановке, — позднепротерозойское (1508 млн. лет) месторождение Джинчуан, расположенное в Китае в провинции Ганьсу. Оно связано с удлиненными субвертикальными линзами ультрамафитовых пород, приуроченных к зоне разлома, который, как предполагается, относится к системе полуграбенных, ограничивавших протерозойский океан. Впоследствии океан был закрыт с образованием складчатого пояса, который находится к югу от Джинчуана. Геохимические данные [3] свидетельствуют о том, что сульфидоносные ультрамафитовые породы первоначально были частью габбро-ультрамафитового комплекса, верхняя габбровая часть которого со временем удалена эрозией.

Другая группа месторождений, сформированных в подобной обстановке, размещается внутри Печенга-Варзугской раннепротерозойской (2,4–2,0 млн. лет) рифтовой зоны на Кольском полуострове в России. Месторождения Печенгского рудного района (рис. 7) приурочены к рифтовой зоне, рассеченной серией поперечных разломов субперпендикулярных направлению рифта. В образованном ими сложном грабене сохранилась мощная (10–12 км) серия вулканических и осадочных пород, подразделяемая на четыре циклических толщ. В основании каждого цикла залегают осадочные, сверху — вулканические породы. Вулканические образования преимущественно имеют толеитовый состав, но среди лав 4-го цикла встречаются необычные породы ферропикритового состава. Осадочные породы, залегающие в основании 4-го цикла, сложены песчаниками, алевритами и граувакками, содержащими сульфиды. В районе, где эти породы имеют повышенную мощность и перекрываются ферропикритовыми лавами, в осадочную толщу 4-го цикла внедрены силлообразные интрузии (габбро, клинопироксениты и верлиты), которые вмещают сульфидные Cu-Ni

месторождения. Очень вероятно, что рудоносные интрузии служили магматическими проводниками, питавшими вышележащую вулканическую толщу. Главный Печенга-Варзугский рифт, с которым связана магматическая деятельность, в процессе развития превратился в океан, впоследствии закрывшийся с юга. В океанических условиях образовалась серия известково-щелочных пород, которые затем были смяты и надвинуты на толеитовые лавы.

Следующий пример — серия древнейших (2,4 млрд. лет) мафит-ультрамафитовых интрузий Финляндии, развитых вдоль тектонического шва, проходящего в восточно-северо-восточном направлении от зоны Кеми на севере Ботнического залива до территории России. К югу от шва залегают архейские, к северу — раннепротерозойские породы; интрузии локализованы и в тех и в других. Хорошо развиты питающие дайки, которые прорезают архейские образования и сопрягаются с интрузиями, лежащими в протерозойских породах осадочного происхождения. В интрузиях (например, Пенникат) развиты базальные брекчии с сульфидами, обогащенными ЭПГ, а выше в их разрезе находятся сульфидсодержащие «риффы». Представляется, что структурный шов, контролирующий интрузии, маркирует рифтовую зону, при развитии которой к северу от области современного распространения архейских пород был открыт океанический бассейн. Протерозойские породы, вероятно, представляют осадки, накопившиеся вдоль края архейского континента.

Сходная тектоническая обстановка наблюдается вблизи южной границы архейской провинции Сьюпериор в районе г. Су Сейнт Мари (Онтарио, Канада). Здесь на архейском фундаменте залегают нижнепротерозойские осадочные породы, мощность которых увеличивается к югу в сторону Гуронского палеоокеана. Океан заложился к югу от провинции Сьюпериор в начале раннего протерозоя и закрылся во время орогении Пенокеан 1,8–1,9 млрд. лет назад. Вблизи главных разломов, определяющих край Гуронского океана, развита серия мафит-ультрамафитовых интрузий, имеющих возраст 2,4 млрд. лет, которые внедрены в протерозойские осадочные породы. При разведке 2000–2002 гг. некоторых из этих интрузий (Ривер Вэлли и Булл Лэйк) установлено, что они содержат базальные брекчии с бедной вкрапленностью обогащенных ЭПГ сульфидов, а также внутренние минерализованные зоны, которые могут оказаться платиноносными рифами.

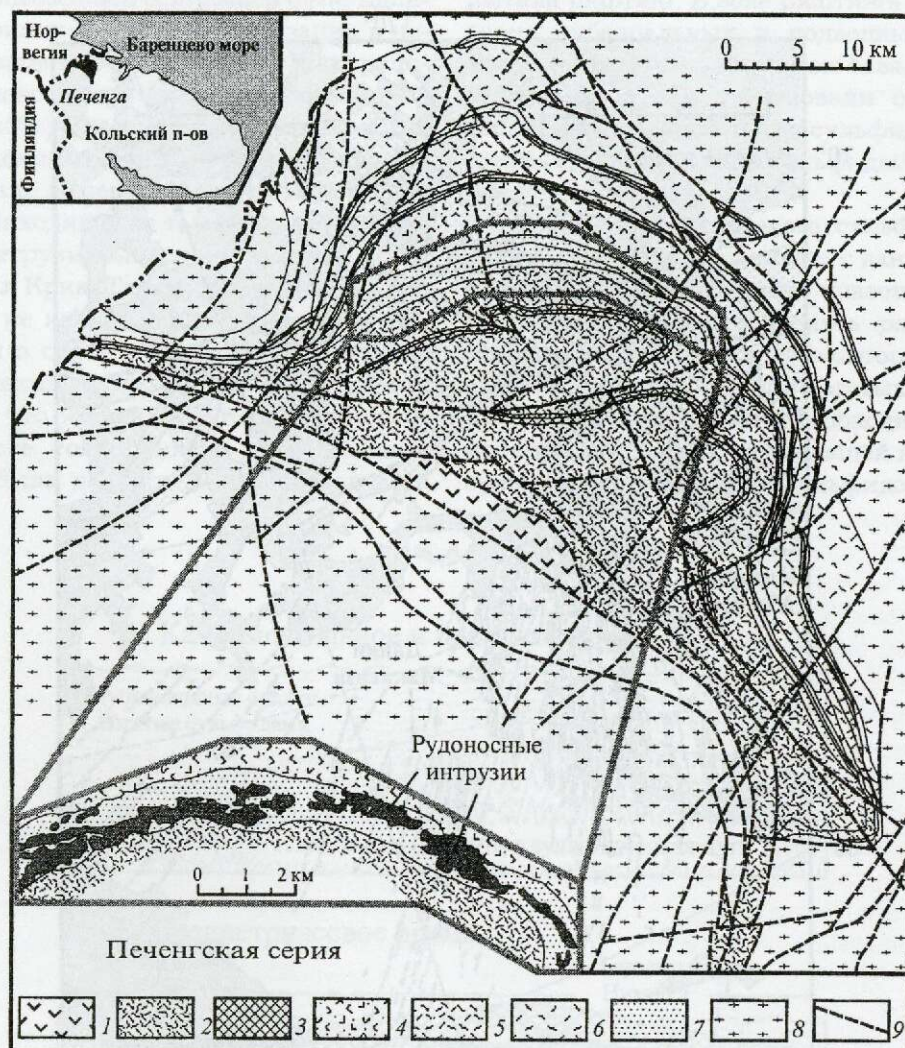


Рис. 7. Схематическая геологическая карта Печенгского района с врезкой, показывающей распространение рудоносных интрузий, по Smolkin et al. [27] с упрощением:

печенгская серия: 1 — раннепротерозойские известково-щелочные вулканические породы; 2 — толеитовые вулканические породы 4-го цикла; 3 — ферропикритовые вулканические породы 4-го цикла; 4 — толеитовые вулканические породы 3-го цикла; 5 — то же, 2-го цикла; 6 — то же, 1-го цикла; 7 — осадочные породы; 8 — архейские и раннепротерозойские породы обрамления рифта: граниты, гнейсы, сланцы; 9 — разломы

Магматизм, связанный со слаборазвитой ветвью рифтовой системы при открытии океанического бассейна, иллюстрируют позднепротерозойские (1270 млн. лет) интрузии, возникшие при открытии палеоокеана Посейдон на севере Канады (рис. 8). Здесь развито обширное дайковое поле Маккензи с интрузией Маскоккс в северной части. На современном эрозионном срезе она представляет собой дай-

кообразное тело, которое расширяется к северу и переходит в воронкообразную расслоенную интрузию. Еще далее к северу интрузия погружается под платобазальты Коппер Майн. В месте, где дайкообразная часть интрузии переходит в воронкообразное тело, в ее основании сконцентрировано значительное количество сульфидов. Они бедны никелем (массовое содержание Ni в 100%-ном сульфиде 1-2%), но от

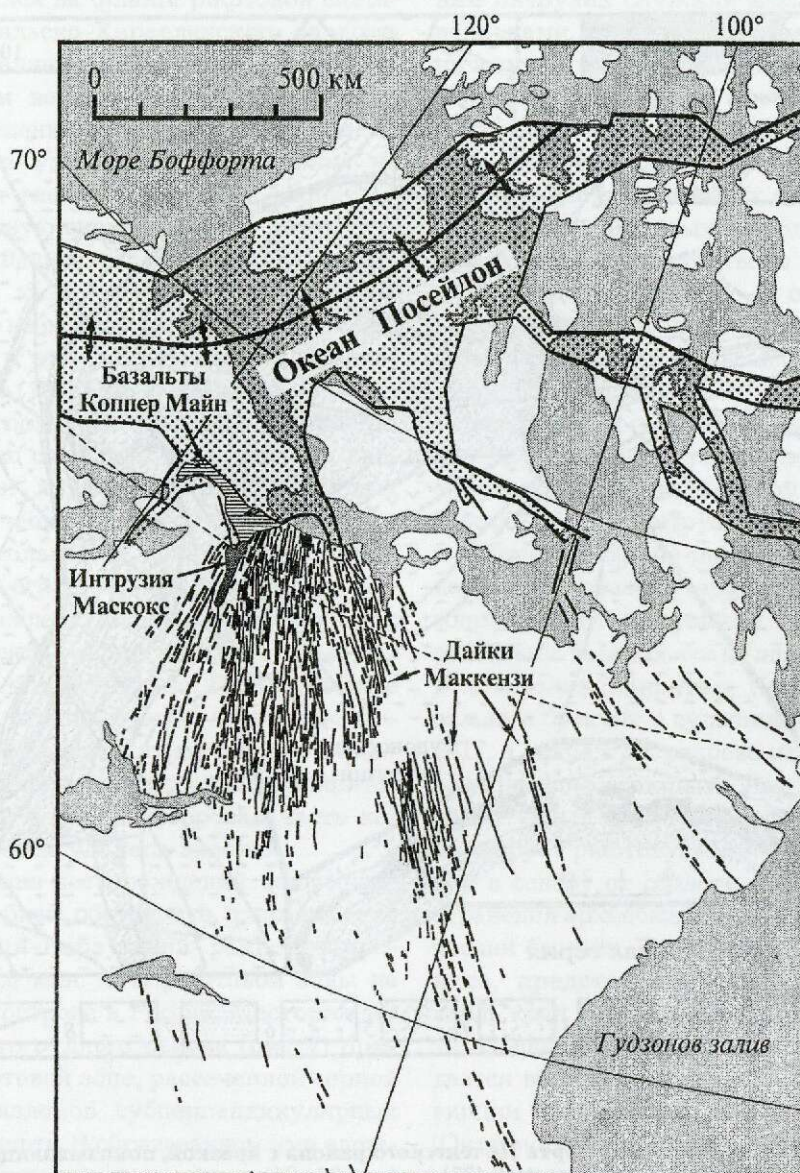


Рис. 8. Позднепротерозойские магматические образования Канады (дайковое поле Маккензи, интрузия Маскокс и платобазальты Коппер Майн), связанные со слаборазвитой ветвью рифтовой системы при открытии океана Посейдон

рудной зоны, локализованной в интрузии, во вмещающие породы уходят жилы сульфидов богатых Cu и несущих высокие концентрации ЭПГ. Промышленная значимость этих жил еще не ясна.

Наконец, с обстановкой рифтинга при открытии океанического бассейна, возможно, связаны раннепротерозойские коматииты района Рэглэн (Квебек, Канада), которые вмещают высококаче-

ственные медно-никелевые руды богатые ЭПГ. Они формировались в период между 1959 и 1918 млн. лет назад. В работах [9, 28] доказываются, что извержения, сформировавшие коматиитовые лавы, происходили в достаточно глубоководных условиях, где накапливались сульфидсодержащие осадки (на глубине, превышающей глубину карбонатной компенсации), возможно, вблизи континентального склона.

Месторождения, связанные с рифтингом ранее существовавшей островной дуги. Единственный пример Cu-Ni минерализации в подобной обстановке — это рифтинг в аккреционном комплексе Врангелия, расположенном у западного побережья Северной Америки и простирающемся от Аляски через территорию Юкон в Канаде до северной части Британской Колумбии. Находящееся там оруденение, связанное с интрузивными комплексами Уайт Ривер, Куилл Крик, Татамагоче и др., в настоящее время не является промышленным; оно упоминается в связи с уникальностью обстановки его нахождения. В работе [7] сделан вывод о том, что островная дуга, существовавшая на месте современного аккреционного комплекса, была перекрыта глубоководными

сульфидсодержащими осадками и затем испытала рифтинг. В зоне рифтинга накопилась серия субазральных и подводных платобазальтов. Интрузии, питавшие базальтовые извержения, взаимодействовали с осадочной серой; их магма достигала сульфидного насыщения и сегрегировала сульфиды. Эта модель представлена на рис. 9.

Теория магматического сульфидообразования, рассмотренная вместе с данными о распространении и строении известных месторождений, позволяет сделать ряд выводов, применимых в практике геологоразведочных работ. Для формирования богатых сульфидами Cu-Ni месторождений необходимо наличие материнской магмы, содержащей несмешиваемую сульфидную жидкость. Сульфидсодержащая

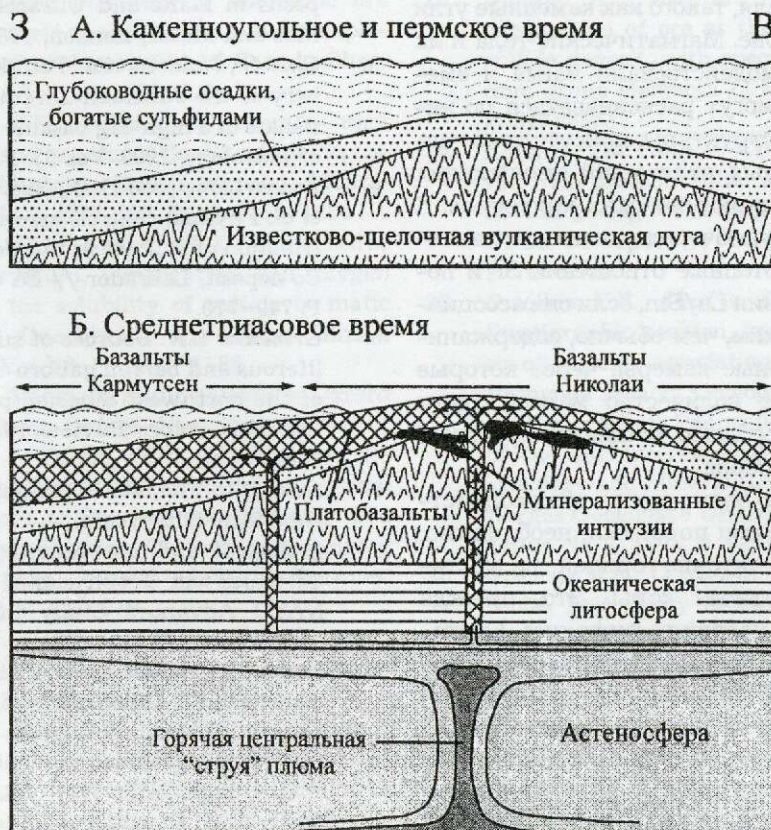


Рис. 9. Модель развития Cu-Ni оруденения в аккреционном комплексе Врангелия, по Hulbert [7]:

вулканическая дуга, сложенная известково-щелочными породами, испытала поднятие и рифтинг под воздействием мантийного плюма. Магма, связанная с рифтингом, образовала базальтовое плато и силлы, внедрившиеся в глубоководные сульфидсодержащие осадочные породы. В силлах в результате взаимодействия магмы с коровой серой развилось Cu-Ni оруденение.

магма должна находиться в движении, чтобы сульфиды могли экстрагировать из силикатного расплава достаточное количество Ni, Cu и ЭПГ и сконцентрироваться в гидродинамических ловушках. Магмы, поступающие из мантии в пределы коры (исключая базальты срединно-океанических хребтов и некоторые расплавы, образованные при очень низкой степени частичного плавления), недосыщены сульфидами. Появление несмешиваемых сульфидов возможно только в случае взаимодействия магмы с коровыми породами с поглощением коровой серы и фельзификации магмы. Наиболее благоприятно взаимодействие магмы с сульфидсодержащими сланцами, особенно пиритсодержащими. Сульфатсодержащие эвапориты также являются потенциальным источником серы. Однако, поскольку способность мафитовых магм поглощать сульфатную серу ограничена, по-видимому, необходимо присутствие восстановителя, такого как каменные угли в Норильском районе. Магматические тела и их участки, где взаимодействовали магма и вмещающие породы, могут распознаваться по наличию такситовой структуры, присутствию частично расплавленных включений вмещающих пород и на основе геохимических критериев. К последним, в первую очередь, относятся высокие начальные изотопные отношения Sr и повышенные отношения La/Sm, если они ассоциируют с более высоким, чем обычно, содержанием SiO₂. Интрузивные камеры, через которые протекало большое количество магмы, будут сопровождаться необычно мощными ореолами метаморфических пород.

Для того чтобы магма могла взаимодействовать с вмещающими породами, необходимо, чтобы она была достаточно горячей, т.е. достаточно быстро достигла коры. Это, прежде всего, возможно в условиях рифтинга. Обстановки рифтинга (включающие структуры простого растяжения, зрелые внутриконтинентальные рифтовые системы и полуграбены у границ палеоокеанических бассейнов) наиболее благоприятны для формирования месторождений как медно-никелевой, так и платинометаллической специализации.

Для образования малосульфидных платинометаллических месторождений не требуется, чтобы рудообразующая магма содержала несмешиваемые сульфиды до своего внедрения. Сульфидная несмешиваемость здесь обусловлена фракционной кристаллизацией силикатных минералов и смешением резидентной магмы и

свежей, поступающей в интрузивные камеры. Интрузии, несущие малосульфидное платинометаллическое оруденение, за исключением Бушвельда, находятся в тех же тектонических обстановках, что и интрузии, вмещающие богатые сульфидами медно-никелевые месторождения. Тектоническая позиция Бушвельдского комплекса, с которым связаны крупнейшие в мире запасы ЭПГ, не обнаруживает связи с растяжением коры и этом случае пока остается загадочной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радько В.А. Модель динамической дифференциации интрузивных траппов северо-запада Сибирской платформы // Геология и геофизика. 1991. № 11. С. 19–27.
2. Buchanan D.L., Rouse J.E. Role of contamination in the precipitation of sulfides in the Platreef of the Bushveld complex // Sulfide Deposits in Mafic and Ultramafic Rocks. Inst. of Min. and Metal., London, 1984. P. 141–146.
3. Chai G., Naldrett A.J. Petrology and geochemistry of the Jinchuan ultramafic intrusion: Cumulate of a high-Mg basaltic magma // Journal of Petrology. 1992. Vol. 33. P. 1–27.
4. Evans-Lamswood D.M., Butt D.P., Jackson R.S. et al. Physical controls associated with the distribution of sulfides in the Voisey's Bay Ni-Cu-Co deposit, Labrador // Ec. Geol. 2000. Vol. 95. P. 749–770.
5. Grinenko L.N. Sources of sulfur of the nickeliferous and barren gabbro-dolerite intrusions of the northwest Siberian platform // International Geology Review. 1985. Vol. 27. P. 695–708.
6. Halls H.C. The late Precambrian central North American rift system — a survey of recent geological and geophysical investigations // Tectonics and Geophysics of Continental Rifts. NATO Advanced Study Institute, Series C, 1978. Vol. 37. P. 111–123.
7. Hulbert L.J. Geology and Metallogeny of the Kluane mafic-ultramafic belt, Yukon Territory, Canada: Eastern Wrangelia — a new Ni-Cu-PGE metallogenic terrane // Geological Survey of Canada Bulletin. 1997. Vol. 506.
8. Leshner C.M. Komatiite-associated nickel sulfide deposits // Ore Deposition Associated with Magmas. Reviews in Economic Geology, Society of Economic Geologists, 1989. P. 45–102.
9. Leshner C.M., ed. Komatiitic Peridotite-Hosted Ni-Cu-(PGE) Deposits of the Raglan Area, Cape Smith Belt, New Quebec. // Guidebook Series. Vol. 2, Mineral Exploration Research Centre, Laurentian University, Sudbury, 1999.

10. Leshe C.M., Arndt N.T., Groves D.I. Genesis of komatiite-associated nickel sulfide deposits at Kambalda, Western Australia; a distal volcanic model // Sulfide Deposits in Mafic and Ultramafic Rocks. Inst. of Min. and Metal, London, 1984. P. 70–80.
11. Li C., Naldrett A.J. Sulfide capacity of magma: a quantitative model and its application to the formation of sulfide ores at Sudbury // *Ec. Geol.* 1993. Vol. 88. P. 1253–1260.
12. Li C., Naldrett A.J. Geology and petrology of the Voisey's Bay intrusion: reaction of olivine with sulfide and silicate liquids // *Lithos.* 1999. Vol. 47. P. 1–31.
13. Li C., Naldrett A.J. Melting reactions of gneissic inclusions with enclosing magma at Voisey's Bay: Implications with respect to ore genesis // *Ec. Geol.* 2000. Vol. 95. P. 801–814.
14. Lightfoot P.C., Naldrett A.J. Geological and geochemical relationships in the Voisey's Bay intrusion, Nain Plutonic Suite, Labrador, Canada // *Dynamic processes in magmatic ore deposits and their application in mineral exploration. Geological Association of Canada Short Course Notes.* Vol. 13. 1999. P. 1–31.
15. Mainwaring P.R., Naldrett A.J. Country rock assimilation and genesis of Cu-Ni sulfides in the Water Hen Intrusion, Duluth complex, Minnesota // *Ec. Geol.* 1977. Vol. 72. P. 1269–1284.
16. Mavrogenes J.E., O'Neill H. St-C. The relative effects of pressure, temperature and oxygen fugacity on the solubility of sulfide in mafic magmas // *Geochimica and Cosmochimica Acta.* 1999. Vol. 63. P. 1173–1180.
17. Naldrett A.J. *Magmatic Sulfide Deposits*, Oxford University Press, Oxford, New York, 1989.
18. Naldrett A.J. Ni-Cu-PGE deposits of the Noril'sk region and other world-class nickel sulfide deposits // *Proceedings of Plutonic Ore Deposits Symposium, Canberra, February 1996, Australian Journal of Earth Sciences*, 1997. Vol. 44. P. 283–315.
19. Naldrett A.J. World class Ni-Cu-PGE Deposits: Key factors in their genesis // *Mineralium Deposita.* 1999. Vol. 34. P. 227–240.
20. Naldrett A.J., Lightfoot P.C., Fedorenko V.A. et al. Geology and geochemistry of intrusions and flood basalts of the Noril'sk region, USSR, with implications for the origin of the Ni-Cu ores // *Ec. Geol.* 1992. Vol. 87. P. 975–1004.
21. Naldrett A.J., Lightfoot P.C. The Ni-Cu-PGE ores of the Noril'sk region Siberia: A model for giant magmatic sulfide deposits associated with flood basalts // *Proceedings of Symposium on Giant Ore Deposits*, Queen's University, May 1992, Society of Economic Geologists Special Publication No 2, 1994. P. 81–123.
22. Naldrett A.J., Fedorenko V.A., Lightfoot P.C. et al. Ni-Cu-PGE deposits of the Noril'sk region, Siberia: Their formation in conduits for flood basalt volcanism // *Transactions of Institution of Mining and Metallurgy.* 1995. Vol. 104. P. B18–B36.
23. Naldrett A.J., Fedorenko V.A., Asif M et al. Controls on the composition of Ni-Cu sulfide deposits as illustrated by those at Noril'sk, Siberia // *Ec. Geol.* 1996. Vol. 91. P. 751–773.
24. Naldrett A.J., Li Chusi, Krstic Sasa. The Voisey's Bay Ni-Cu-Co deposit, Labrador, Canada: Implications for exploration elsewhere // *Mineral Deposits: Research and Exploration Where do they meet? Proceedings of the fourth biennial SGA meeting, Turku, Finland, August 1997, Balkema, Rotterdam*, 1997. P. 7–8.
25. Naldrett A.J., Asif M., Krstic S., Li C. The composition of ore at the Voisey's Bay Ni-Cu sulfide deposit, with special reference to platinum-group elements // *Ec. Geol.* 2000. Vol. 95. P. 845–866.
26. Ryan B. The Nain — Churchill boundary and the Nain plutonic suite: a regional perspective on the geological setting of the Voisey's Bay Ni-Cu-Co deposit // *Ec. Geol.* 2000. Vol. 95. P. 703–720.
27. Smolkin V.F., Skuf'in P.K., Mokrousov V.A. Stratigraphic position, geochemistry and genesis of volcanic associations of early Proterozoic Pechenga area // *Geology of Eastern Finmark — Western Kola Peninsula Region, Proceedings of the 1st. International Barents Symposium «Geology and Minerals in the Barents Region», Norges Geologiske Undersøkelse Special Publication No. 7, 1995.* P. 93–110.
28. St-Onge M.R., Lucas S.B. Evolution of the Cape Smith Belt: Early Proterozoic continental underthrusting, ophiolite subduction, and thick-skinned folding. Geological Association of Canada, Special Paper 37, 1990. P. 313–352.
29. Wendlandt R.F. Sulfur saturation of basalt and andesite melts at high pressures // *American Mineralogist.* 1982. Vol. 67. P. 877–885.
30. Wilson A.H., Prendergast M.D. The Great Dyke of Zimbabwe. I: Tectonic setting, stratigraphy, petrology, structure, emplacement and crystallization // *Magmatic sulfides — the Zimbabwe volume. Inst. of Min. and Metall., London*, 1989. P. 1–20.

СОСТАВ И СТРОЕНИЕ СУЛЬФИДОНОСНЫХ МАГМАТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ



УДК 552.1 (470.21)

© Е.С.Заскинд, О.М.Конкина, В.И.Кочнев-Первухов, 2002

РУДНО-ПЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ ТИПИЗАЦИЯ ПЛУТОНИТОВ МОНЧЕГОРСКОГО РУДНОГО РАЙОНА, КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ

Е.С.Заскинд, О.М.Конкина, В.И.Кочнев-Первухов (ЦНИГРИ МПР России)

Приведены результаты обработки большого массива анализов руд и пород расслоенных интрузивов перидотит-пироксенит-габбро-норитовой формации Мончегорского рудного района. Показана петрологическая неоднородность формации и выделены три петрологические типа, различающихся характером рудоносности и продуктивностью. Мончегорский тип перспективен на малосульфидные платинометалльные руды, мончетундровский — на платинометалльную минерализацию и хромиты, островской — на хромиты и, возможно, сульфидные руды с Pd и Pt. Перспективы интрузивов островского типа проблематичны.

Месторождения и рудопроявления Мончегорского рудного района (МРР) пространственно и генетически связаны с мафит-ультрамафитовыми плутонитами перидотит-пироксенит-габбро-норитовой формации, занимающими половину площади района. Рудные объекты и проявления рудогенерирующего процесса известны не во всех магматических телах МРР, что требует создания основы для выделения перспективных интрузивов. В качестве таковой выбраны петрохимические и рудно-геохимические характеристики, важное значение которых подчеркивал еще М.Н.Годлевский [1].

Структурное положение массивов определяется приуроченностью к обрамлению Печенгско-Варзугского рифта. Контакты интрузивов с вмещающими гнейсами интрузивные, с осадочно-вулканогенными толщами — большей частью тектонические. Интрузивы камерного типа, пластовые и лополитоподобные. Внутренняя структура массивов автономна по отношению к структурам рамы. По петрохимическим особенностям породы соответствуют производным толеитовых магм. Массивы в разной степени дифференцированы и расслоены. Ультрамафитовые дифференциаты представлены дунитами, гарцбургитами, лерцолитами, бронзититами и их плагиоклазсодержащими разновидностями, мафитовые — норитами, габбро-норитами и габбро, состав которых варьирует от меланодо лейкократовых разновидностей. Все петрографи-

ческое многообразие пород обусловлено количественными вариациями кумулусных и интеркумulusных хромита, оливина, пироксенов — ромбического и моноклинового — и плагиоклаза.

На рис. 1 показаны массивы формации, входящие в состав МРР: Мончеплутон с его частями Ниттис-Кумужья-Травяная (НКТ), Сопча, Нюд-Поаз и Выручайвенч; Пивнус; Мончетундровский; Чунатундровский; горы Девичьей; Мончеполуостровский; Островской; горы Ягельной.

В пределах НКТ и Сопчи расположено крупнейшее в Мончеплутоне месторождение сульфидных Cu-Ni руд — жильных и вкрапленных. Главная ценность месторождения — жильное поле НКТ (отработано). В массиве Нюд-Поаз в зоне перехода оливинсодержащих и безоливиновых пород известен критический горизонт с сульфидной Cu-Ni вкрапленностью и МПГ (до 1,97 г/т). В Выручайвенч установлен и прослежен на 2 км [11] горизонт малосульфидного оруденения с МПГ. В оливиновых норитах и плагиогарцбургитах массива Пивнус встречена бедная (Ni и Cu <19%) сульфидная минерализация. В дунитах Мончетундровского массива выявлено Сопчеозерское месторождение хромита [2]. Хромиты обнаружены и в пироксенитах массивов Мончеполуостровский и горы Девичьей.

Благодаря длительному развитию общего магматического источника состав расплавов,

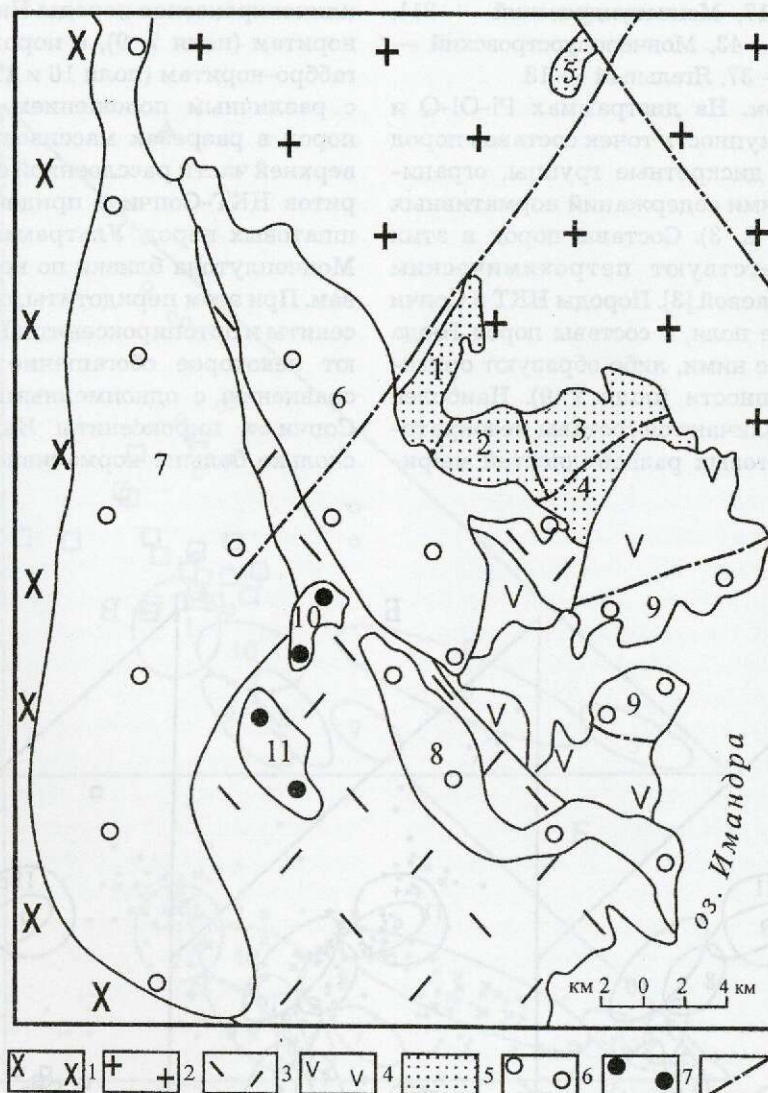


Рис. 1. Схема размещения мафит-ультрамафитовых образований МРР:

гнейсы и амфиболиты архея: 1 — беломорской, 2 — кольской серий; 3 — амфиболиты, гнейсы и сланцы тундровой серии верхнего архея; 4 — осадочно-вулканогенные породы имандра-варзугской серии нижнего протерозоя; массивы перидотит-пироксенит-габбро-норитовой формации: 5 — мончегорский (1 — НКТ, 2 — Сопча, 3 — Нюд-Поаз, 4 — Выручайвенч, 5 — Пивнус), 6 — мончетундровский (6 — Мончетундровский, 7 — Чунатундровский, 8 — горы Девичьей, 9 — Мончеполуостровский), 7 — островской (10 — Островской, 11 — горы Ягельной) типы; 8 — разломы

поступавших в камеры различных интрузивов, был неодинаков. Это обусловило образование разных последовательностей пород в разрезах конкретных тел и отразилось на составе их дифференциатов. Различия позволяют разделить формацию на субформации (типы) с различной рудоносностью, оценить их вероятную продуктивность и выделить наиболее перспективные на руды разного состава —

сульфидные Cu-Ni с МПГ, малосульфидные с МПГ и хромитовые.

Петролого-петрохимическая типизация массивов. Для типизации мафит-ультрамафитовых плутонов МРР использованы тройные нормативные диаграммы $Pl-Ol-Q$ и $cPx-Pl-oPx$. Источниками петрохимической информации послужили печатные и фондовые работы, а также база данных ГУП «Минерал» Количество ана-

лизов по различным массивам: Мончеплутон — 451, Пивнус — 17, Мончетундровский — 211, горы Девичьей — 43, Мончеполуостровский — 15, Островской — 37, Ягельный — 18.

Мончеплутон. На диаграммах Pl-Ol-Q и cPx-Pl-oPx совокупность точек составов пород распадается на дискретные группы, ограниченные значениями содержаний нормативных минералов (рис. 2, 3). Составы пород в этих группах соответствуют петрохимическим типам В.С.Докучаевой [3]. Породы НКТ и Сопчи образуют единые поля, а составы пород Ньюда либо совпадают с ними, либо образуют оригинальные совокупности (поля 7-9). Наиболее существенно различаются составы мезократовых и лейкократовых разновидностей мафи-

тов. По соотношениям нормативных орто- и клинопироксенов породы Ньюда соответствуют норитам (поля 7-9), а породы НКТ-Сопчи — габбро-норитам (поля 10 и 11), что согласуется с различным положением рассматриваемых пород в разрезах массивов: норитов Ньюда в верхней части расслоенной серии, а габбро-норитов НКТ-Сопчи в придонной зоне полевошпатовых пород. Ультрамафиты всех частей Мончеплутона близки по нормативным составам. При этом перидотиты, оливиновые пироксениты и ортопироксениты Ньюда обнаруживают некоторое обогащение плагиоклазом по сравнению с одноименными породами НКТ-Сопчи, а пироксениты Ньюда содержат несколько больше нормативного клинопироксе-

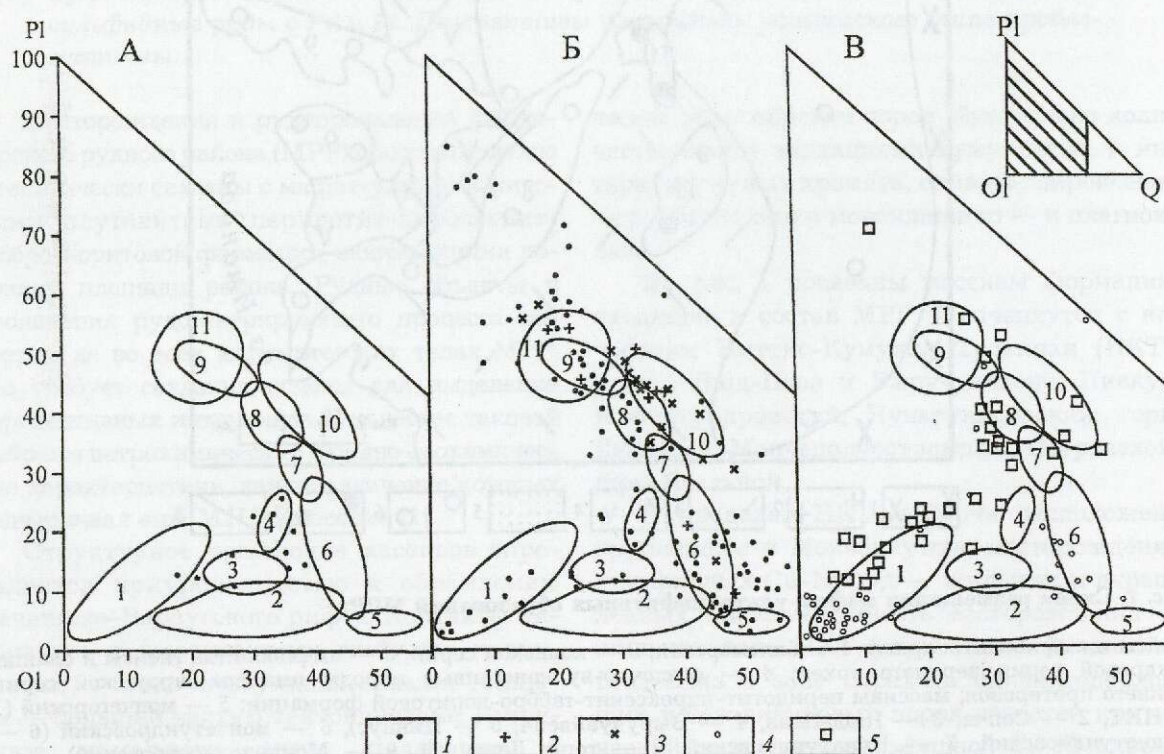


Рис. 2. Диаграмма плагиоклаз-оливин-кварц для пород перидотит-пироксенит-габбро-норитовой формации МРР:

А — массив Пивнус; Б — массивы Мончетундровский, Мончеполуостровский, горы Девичьей; В — массивы Островской, Ягельный. Породы массивов: 1 — Пивнус и Мончетундровский, 2 — Мончеполуостровский, 3 — горы Девичьей, 4 — Островской, 5 — Ягельный; цифрами показаны поля составов пород Мончеплутона: 1 — дуниты и пойкилитовые гарцбургиты основания расслоенной серии и плагиоперидотиты придонной зоны полевошпатовых пород, 2 — гранулярные перидотиты и оливиновые ортопироксениты расслоенной серии; оливиновые нориты: 3 — расслоенной серии, 4 — придонной зоны полевошпатовых пород, 5 — ортопироксениты расслоенной серии, 6 — мелано- и мезократовые нориты расслоенной серии; нориты расслоенной серии: 7 — лейко-мезократовые, 8 — мезо-лейкократовые, 9 — лейкократовые; габбро-нориты придонной зоны полевошпатовых пород: 10 — мезо-лейкократовые, 11 — лейкократовые

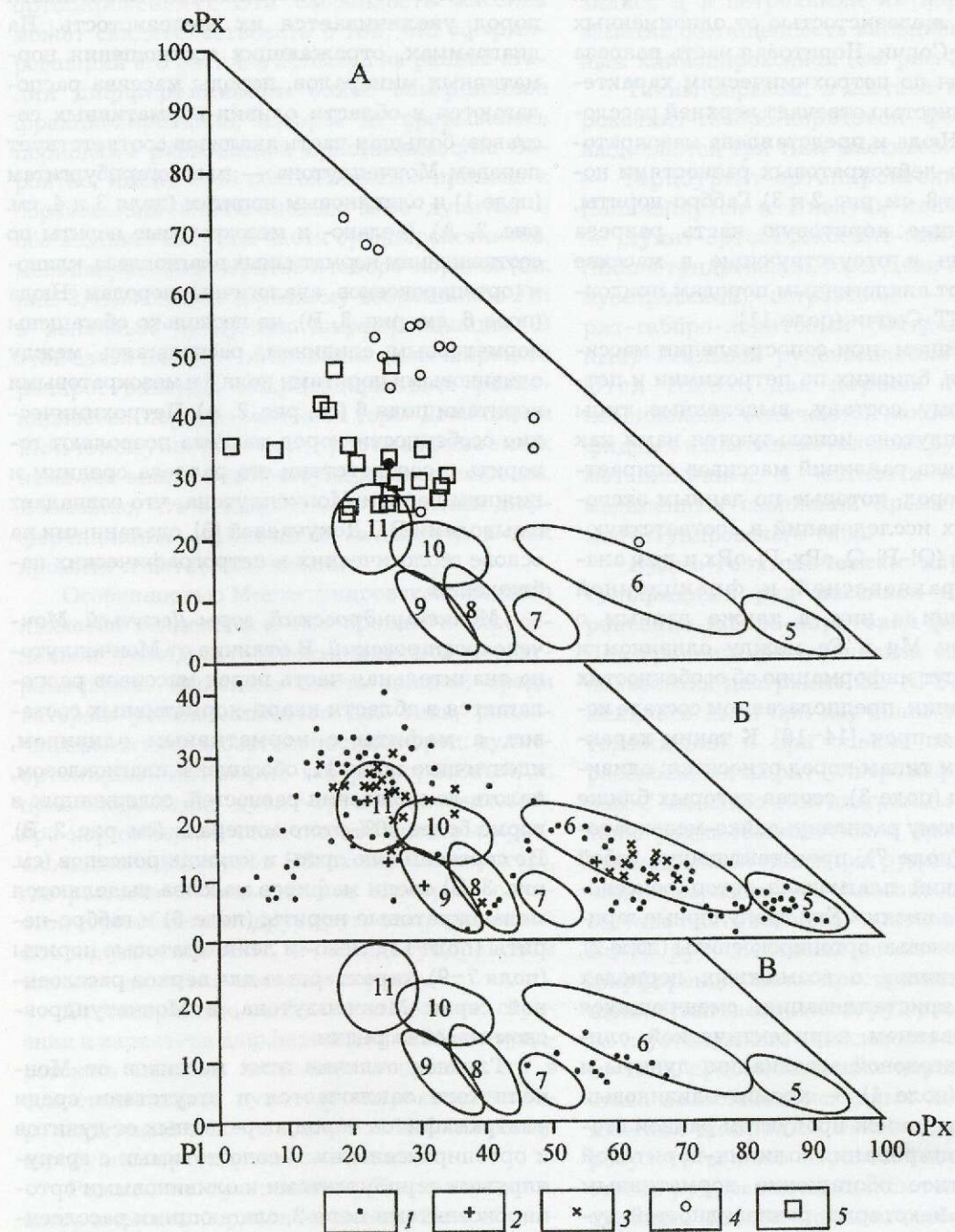


Рис. 3. Диаграмма клинопироксен-плаггиоклаз-ортопироксен для пироксенитов и мафитов перидотит-пироксенит-габбро-норитовой формации МРР:

А — массивы Островской и Ягельный; Б — массивы Мончетундровский, Мончеполуостровский, горы Девичьей; В — массив Пивнус; остальные усл. обозн. см. рис. 2

на, попадая на диаграмме (см. рис. 3) в левую верхнюю часть поля 5. В целом ультрамафиты Ньюда отличаются более высокой, а мафиты более низкой железистостью от одноименных пород НКТ и Сопчи. Норитовая часть разреза Выручайвенч по петрохимическим характеристикам полностью отвечает верхней расслоенной серии Ньюда и представлена мезократовыми до мезо-лейкократовыми разностями норитов (поля 6–8, см. рис. 2 и 3). Габбро-нориты, надстраивающие норитовую часть разреза Выручайвенч и отсутствующие в массиве Ньюд, отвечают аналогичным породам придонной части НКТ-Сопчи (поле 11).

В дальнейшем, при сопоставлении массивов формации, близких по петрохимии и петрографическому составу, выделенные типы пород Мончеплутона используются нами как эталоны. Оценка различий массивов опирается на типы пород, которые по данным экспериментальных исследований в соответствующих системах (Ol-Pl-Q, cPx-Pl-oPx и др.), анализу хода равновесной и фракционной кристаллизации в них, а также данным о распределении Mg и Fe между оливином и расплавом несут информацию об особенностях дифференциации, предполагаемом составе исходных магм и проч. [14–16]. К таким характеристическим типам пород относятся: оливинные нориты (поле 3), состав которых ближе всего к исходному расплаву; лейко-мезократовые нориты (поле 7), представляющие собой наиболее ранний плагиоклаз-ортопироксеновый кумулянт с низким Fm ; гранулярные гарцбургиты-оливиновые ортопироксениты (поле 2), свидетельствующие о возможных периодах равновесной кристаллизации, сменяющихся фракционированием перитектической оливин-ортопироксеновой ассоциации; дуниты и гарцбургиты (поле 1) — хромит-оливиновый кумулянт, являющийся продуктом ранней стадии фракционирования оливин-норитовой магмы. Заметное обогащение нормативным плагиоклазом некоторых разновидностей дунитов и гарцбургитов может рассматриваться как результат фракционирования гибридных магм, образующихся при смешении исходной магмы с родственными расплавами поздних стадий дифференциации. Наиболее вероятный состав таких гибридных магм лежит в поле 4, отвечающему одной из разновидностей оливинных норитов (см. рис. 2).

Пивнус. Разрез массива представлен сингенетическим рядом: плагиогарцбургиты-оливи-

новые нориты-меланократовые нориты-мезократовые нориты. В этом ряду, как и в Мончеплутоне, с уменьшением мафичности пород увеличивается их железистость. На диаграммах, отражающих соотношения нормативных минералов, породы массива располагаются в области оливин-нормативных составов; большая часть анализов соответствует породам Мончеплутона — плагиогарцбургитам (поле 1) и оливинным норитам (поля 3 и 4, см. рис. 2, А). Мелано- и мезократовые нориты по соотношениям нормативных плагиоклаза, клино- и ортопироксенов аналогичны породам Ньюда (поле 6, см. рис. 3, В), но несколько обогащены нормативным оливином, располагаясь между оливинными норитами поля 3 и мезократовыми норитами поля 6 (см. рис. 2, А). Петрохимические особенности пород массива позволяют говорить о соответствии его разреза средним и нижним частям Мончеплутона, что совпадает с выводами В.С.Докучаевой [5], сделанными на основе геологических и петрографических наблюдений.

Мончетундровский, горы Девичьей, Мончеполуостровский. В отличие от Мончеплутона значительная часть пород массивов располагается в области кварц-нормативных составов, а мафиты с нормативным оливином, идентичные полю 11, обогащены плагиоклазом, вплоть до появления разностей, содержащих в норме более 80% этого минерала (см. рис. 2, Б). По соотношению орто- и клинопироксенов (см. рис. 3, Б) среди мафитов массива выделяются меланократовые нориты (поле 6) и габбро-нориты (поле 11); мезо- и лейкократовые нориты (поля 7–9), характерные для верхов расслоенной серии Мончеплутона, в Мончетундровском массиве редки.

Главное отличие этих массивов от Мончеплутона заключается в отсутствии среди ультрамафитов пород, переходных от дунитов к ортопироксенитам и сопоставимых с гранулярными гарцбургитами и оливинными ортопироксенитами поля 2, слагающими расслоенную серию массивов НКТ-Сопча. В разрезе Мончетундровского массива В.С.Докучаевой и др. [4, 7, 12] описано переслаивание гарцбургитов и бронзититов, которое можно было бы сопоставить с аналогичной по строению толщей НКТ-Сопчи. Однако ни один из составов пород этой части разреза не попадает в поле 2: состав гарцбургитов соответствует полю 1, а ортопироксенитов — полю 5. Для ультрамафитов Мончетундровского массива вообще ха-

рактерна резкая, без промежуточных разностей, смена типов пород (например, дунит — ортопироксенит). Эта особенность массива может свидетельствовать о том, что сформировавший его расплав испытал на ранней стадии дифференциации более совершенное фракционирование, которое не прерывалось периодами равновесной кристаллизации. Вероятно, именно это обстоятельство привело к образованию значительных масс дунитов и обогащению кварцем части ортопироксенитов, меланократовых норитов и габбро-норитов (см. рис. 3, Б), а также к резкому возрастанию Fm в конечных продуктах дифференциации. В этой связи находит объяснение факт широкого распространения кварцсодержащих разновидностей пород в массивах горы Девичьей и Мончеполуостровский, рассматриваемых нами как аналоги Мончетундровского массива. Возможно, что этими же особенностями дифференциации обусловлено появление в них хромита и титаномagnetита.

Особенностью Мончетундровского массива является тенденция к повторению в определенной последовательности мафитов и ультрамафитов. Выделено шесть циклов, среди которых устанавливаются два типа, различающиеся последовательностью пород: дунит-ортопироксенит-норит-габбро-норитовый и, преобладающий, дунит-ортопироксенит-габбро-норитовый. В отличие от некоторых расслоенных интрузивов (Маскоккс, Стиллутер), где различные типы циклов в разрезе слоистой серии сменяют друг друга в определенной последовательности, в Мончетундровском массиве их смена незакономерна.

Рассмотренные особенности состава, строения и характера дифференциации Мончетундровского массива позволяют выделить его в самостоятельный дунит-ортопироксенит-габбро-норитовый тип, отличный от Мончегорского гарцбургит-ортопироксенит-норитового.

Редкая, по сравнению с Мончеплутоном, встречаемость норитов не может быть объяснена особенностями кристаллизации и дифференциации массивов мончетундровского типа. Более вероятно, что она связана с иным составом исходной магмы. Однако эти различия были не столь велики, чтобы в корне изменить последовательность выделения главных породообразующих минералов ($Ol \rightarrow oPx \rightarrow Pl \rightarrow cPx$).

Более существенные отличия в составе исходных магм Островского и Ягельного массивов, обусловившие иной порядок кристалли-

зации ($Ol \rightarrow oPx \rightarrow cPx \rightarrow Pl$), чем в массивах мончегорского и мончетундровского типов, отразились и в петрохимии их пород. Наиболее заметна обогащенность кальцием и нормативным клинопироксеном (см. рис. 2, В и 3, А).

Таким образом, в составе перидотит-пироксенит-габбро-норитовой формации МРР выделяются три типа массивов: мончегорский — гарцбургит-ортопироксенит-норитовый (Мончеплутоны и Пивнус); мончетундровский — дунит-ортопироксенит-габбро-норитовый (Мончетундровский, горы Девичьей, Мончеполуостровский); островской — дунит-вебстерит-габбро-норитовый (Островской, Ягельный). Реальной рудоносностью характеризуются только два первых типа, но она неодинакова: отличаются как качеством сульфидных и платинометаллических руд, так и общей металлогенией, в частности наличием промышленных скоплений хромита в массивах мончетундровского типа.

Рудно-геохимическая характеристика сульфидных руд массивов перидотит-пироксенит-габбро-норитовой формации МРР. Для сравнительного анализа состава руд использована диаграмма Cu-Ni-S, которая применялась нами при изучении руд Cu-Ni месторождений и при оценке платиноносности расслоенных мафит-ультрамафитовых плутонов. С помощью этой диаграммы были разработаны рудно-геохимические критерии внутриформационной типизации рудоносных магматических образований, показана специфичность состава платиноносных и платиносодержащих Cu-Ni руд, выявлены новые закономерности дифференциации и пространственного размещения сингенетических руд различного состава и установлена зависимость последнего как от типа рудовмещающих пород, так и от состава возможных исходных магм. Опыт применения диаграммы показал, что наилучшие результаты дает использование средних составов руд, различающихся текстурно-структурными и минеральными особенностями. Непременные условия применимости диаграммы — «генетическая» однородность выборок, предпочтительное использование сингенетических вкрапленных руд и поправка на силикатный никель.

На диаграмму Cu-Ni-S (рис. 4) были нанесены поля составов платиноносных и платиносодержащих Cu-Ni руд, выделенные по результатам обобщения аналитики большого числа Cu-Ni и собственно платиновых место-

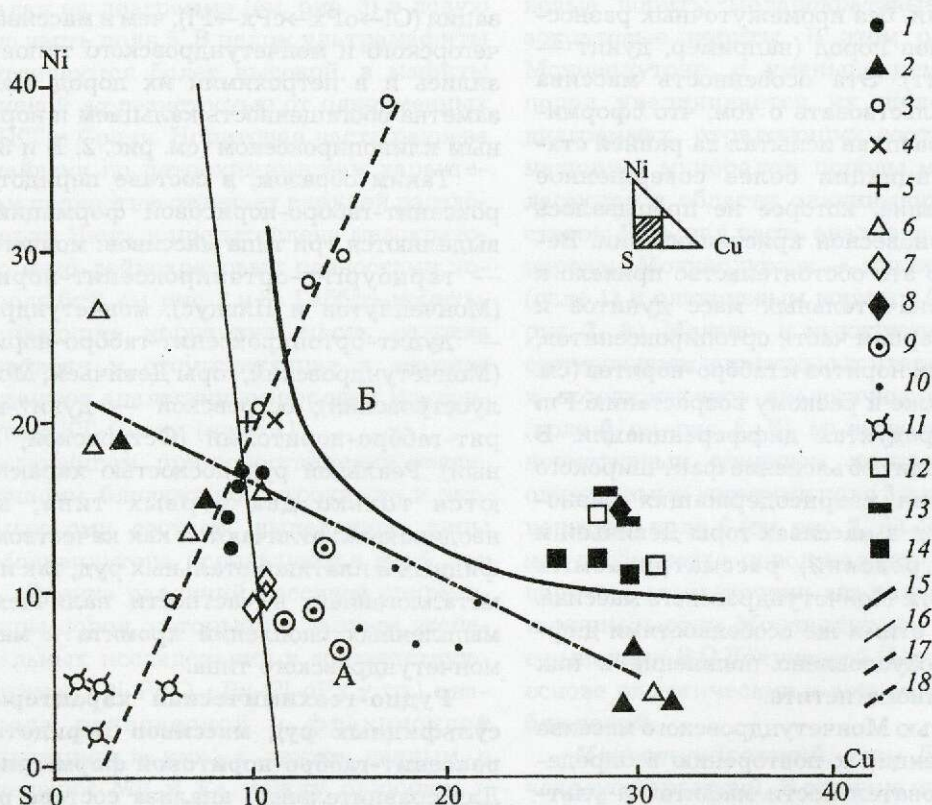


Рис. 4. Диаграмма Cu-Ni-S для сульфидных руд в массивах перидотит-пироксенит-габбро-норитовой формации MPP:

руды Мончеплутона: 1 — вкрапленные донной залежи НКТ, 2 — вкрапленные жильного поля НКТ, 3 — вкрапленные «пласта 330», 4 — среднее для руд «пласта 330», 5 — вкрапленные донной залежи Сопчи, 6 — массивные жильного поля, 7 — вкрапленные критического горизонта Нюда, 8 — вкрапленные горы Выручайвенч; минерализация Мончетундровского массива: 9 — вкрапленная в пироксенитах ультрамафитовой зоны, 10 — вкрапленная в габбро-норитах верхней зоны, 11 — то же, нижней; средние составы руд платиноносных горизонтов расслоенных массивов: 12 — Луккулайсваара, 13 — Панский, 14 — Контиярви и Пеникат; 15 — граница полей составов платиносодержащих (А) и платиноносных (Б) Cu-Ni руд; 16 — линия равных отношений Cu/S; 17 — тренд изменения составов вкрапленных руд «пласта 330»; 18 — тренд изменения составов массивных руд жильных полей НКТ и Сопчи

рождений России и мира [9], и средние составы минеральных разновидностей сингенетических вкрапленных и эпигенетических жильных руд эталона (Мончеплутон). Положение на диаграмме фигуративных точек составов руд свидетельствует о существовании закономерных различий как между эпигенетическими массивными и сингенетическими вкрапленными, так и между вкрапленными рудами из различных частей Мончеплутона. Руды эталона различаются «продуктивностью» (сумма Ni+Cu в 100% сульфидов) и относительной никеленосностью (отношение Ni/Cu). Тренды изменения составов в массивных и вкрапленных рудах имеют разную направленность: в пер-

вых обогащение сульфидного вещества Ni и Cu происходит на фоне увеличения относительных концентраций Cu при снижении таковых Ni (отношение Ni/Cu уменьшается с 6,3 до 0,12), во вторых возрастание «продуктивности» обусловлено одновременным увеличением концентраций Ni и Cu при незначительном (1,8–2,2) росте отношения Ni/Cu.

Средние составы вкрапленных руд всех месторождений Мончеплутона характеризуются постоянством отношения Cu/S, но различаются «продуктивностью» и относительной никеленосностью: рудам критического горизонта Нюда присущи самые низкие концентрации Ni и Cu с отношением Ni/Cu ~1; руды

«пласта 330» Сопчи обладают более высокими «продуктивностью» и относительной никельностью (отношение $Ni/Cu \sim 1,8$). Это означает, что в сульфидной массе рассматриваемых объектов существуют заметные различия не только абсолютных содержаний Ni , но и отношений Ni/Fe . Последнее может непосредственно сопоставляться со степенью примитивности магм, в равновесии с которыми находилось рудное вещество: в первом приближении можно заключить, что убывание этих отношений происходит в процессе фракционирования расплава. Косвенным подтверждением вывода служит более высокое Fm в ультрамафитах Нюда по сравнению с НКТ и Сопчей.

Как показано А.И.Кривцовым и др. (1996), подобная изменчивость состава сингенетических $Cu-Ni$ руд характерна для протяженных (>10 км) магматических тел и отражает латеральную зональность в рудном веществе, происхождение которой связано с дифференциацией рудоносной магмы по мере ее продвижения к месту локализации. В общих чертах это согласуется с представлениями [6, 13] о единстве Нюда с остальной частью Мончеплутона и позволяет предположить, что «пласт 330» и критический горизонт Нюда могли быть единым горизонтом протяженностью не менее 5 км. Как показывает пример Стиллуотера, сульфидоносный горизонт может лишь в самых общих чертах следовать структуре массива, переходя из одной разновидности рудовмещающих пород в другую. Это, возможно, имеет место в юго-восточной (Сопча-Нюд-Выручайвенч) ветви Мончеплутона и должно учитываться при корреляции разрозненных подсечений вкрапленных руд, когда рудовмещающие породы обладают разным петрографическим составом или различаются петрохимически.

Состав вкрапленных руд донной залежи массива Сопча аналогичен среднему составу руд «пласта 330». Положение фигуративных точек руд донной залежи НКТ вблизи пересечения трендов изменения составов вкрапленных и массивных руд с линией равных отношений Cu/S дает основание считать их состав средним для всех руд Мончеплутона и наиболее близким к составу исходной сульфидной жидкости. Сульфидное вещество $Cu-Ni$ руд Мончеплутона характеризуется наиболее высокими концентрациями МПГ по сравнению со всеми, кроме Норильских, $Cu-Ni$ месторожде-

ниями. Это согласуется с положением составов руд Мончеплутона на диаграмме $Cu-Ni-S$ относительно линии, разграничивающей поля платиносодержащих и платиноносных $Cu-Ni$ руд (см. рис. 4). Средние составы руд месторождений Мончеплутона приближаются к платиноносным, а отдельные разновидности из «пласта 330» аналогичны им. Именно в них установлены [8, 10] повышенные (до 3 г/т) содержания МПГ. Состав сульфидной минерализации в габбро-норитах юго-восточной части Мончеплутона, где выявлены [11] высокие содержания МПГ, аналогичен таковому платиноносных горизонтов расслоенных массивов Балтийского щита (Пеникат, Луккулайсваара, Панский).

Особенностью состава $Cu-Ni$ руд Мончетундровского массива является наличие резко обедненных Ni и Cu разностей (см. рис. 4), что характерно для некоторых платиноносных расслоенных интрузивов и массивов трапповой формации, где различные по составу руды занимают определенное положение в разрезе, отражая вертикальную зональность минерализации. Как правило, руды с подобными химическими характеристиками локализуются в нижней базальной зоне расслоенных массивов. В Мончетундровском массиве существенно пирротитовые вкрапленные руды также залегают в нижней габбро-норитовой части разреза, а обогащенные Ni и Cu разности — в ультрамафитовой (пироксенитовой) и верхней габбро-норитовой зонах. В этой связи следует заметить, что платиноносная сульфидная $Cu-Ni$ минерализация Выручайвенча располагается в габбро-норитах верхней, надноритовой, части разреза Нюда.

Из двух типов сульфидной минерализации в Мончетундровском массиве один, более богатый Ni и Cu , приближается по характеристикам к платиноносным рудам, другой — представлен пирротитом без Ni , Cu и МПГ. Как показало обобщение данных по расслоенным массивам, присутствие в их разрезах пирротитовых руд, лишенных Ni и Cu , служит признаком вероятной платиноносности руд иного состава.

В рамках перидотит-пироксенит-габбро-норитовой формации МРР выделяются три петрологических типа: мончегорский (гарцбургит-ортопироксенит-норитовый), мончетундровский (дунит-ортопироксенит-габбро-норитовый) и островской (дунит-вебстерит-габбро-норитовый). Массивы двух первых

типов при идентичности порядков кристаллизации главных породообразующих силикатов (Ol-oPx-Pl-cPx) различаются составом пород, что отражает разный характер фракционирования близких по составу исходных магм; массивы третьего характеризуются иным (Ol-oPx-cPx-Pl) порядком кристаллизации, который соответствует исходным магмам с повышенным содержанием нормативного клинопироксена.

Массивы мончегорского типа перспективны на Cu-Ni и платинометалльные малосульфидные руды: в Мончеплутоне наиболее вероятно выявление малосульфидных руд с МПГ (риф такого типа уже обнаружен на горе Выручайвенч); в связи с массивами Пивнус, разрез которых отвечает низам Мончеплутон, могут быть встречены вкрапленные Cu-Ni руды, подобные рудам донных залежей НКТ-Сопчи.

Массивы мончетундровского типа по особенностям состава, положению в их разрезе Cu-Ni минерализации, а также по наличию хромитовой сочетают признаки таких интрузивов, как Бушвельд и Стиллуотер. Это позволяет положительно оценить их перспективы на МПГ и хромиты. Возможные скопления придонных сульфидов, скорее всего, будут относиться к пирротиновому типу, бедному Ni, Cu и МПГ.

Массивы островского типа по особенностям порядка кристаллизации сопоставимы с Великой Дайкой Зимбабве и комплексом Муни Западной Австралии; они представляют потенциальный интерес на хромит в дунитовой и на сульфидные с Pd и Pt руды в пироксени-товой частях разреза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Годлевский М.Н. Магматические месторождения // Генезис эндогенных рудных месторождений. М., 1968. С. 7-151.
2. Додин Д.А., Чернышов Н.М., Якуевич Б.А. Платинометалльные месторождения России. - СПб.: Наука, 2000.
3. Докучаева В.С. Петрохимия ультраосновных — основных пород Мончегорского плутон // Основные и ультраосновные породы Кольского полуострова и их металлогения. Апатиты, 1975. С. 76-90.
4. Докучаева В.С. Дуниты из интрузивов перидотит-габбро-норитового формационного типа в Мончегорском районе // Базит-гипербазитовый магматизм Кольского полуострова. Апатиты, 1978. С. 109-132.
5. Докучаева В.С. Гипербазит-базитовый массив Пивнус — Грязное в Мончегорском рудном районе // Новые данные по месторождениям никеля Кольского полуострова. Апатиты, 1985. С. 55-60.
6. Козлов Е.К. Естественные ряды пород никеле-носных интрузий и их металлогения. - Л.: Наука, 1973.
7. Козлов Е.К., Юдин Б.А., Докучаева В.С. Основной и ультраосновной комплексы Монче-Волчьих-Лосевых тундр. - Л.: Наука, 1967.
8. Конников Э.Г. Распределение ЭПГ в «рудном пласте Сопчи» Мончегорского расслоенного плутон // Геология и геофизика. 1993. № 4. С. 112-118.
9. Кочнев-Первухов В.И., Заскинд Е.С., Конкина О.М. Оценка платиноносности расслоенных мафит-ультрамафитовых массивов // Руды и металлы. 1995. № 4. С. 20-27.
10. Орсов Д.А., Конников Э.Г., Загузан Г.Н. Оруденение перидотитового пласта г. Сопча в Мончегорском плутоне // Зап. ВМО. 1994. № 3. С. 26-40.
11. Платинометалльная минерализация в габбро-норитах массива Выручайвенч, Мончегорский плутон / Т.Л. Гроховская, Г.Ф.Бакаев, Е.П.Шелепина и др. // ГРМ. 2000. Т. 42. № 2. С. 47- 61.
12. Соколова В.Н. Новые данные о геологическом строении интрузивного комплекса Монче-Чуна-Волчьих тундр (Кольский п-ов) // Советская геология. 1976. № 6. С. 100-111.
13. Шарков Е.В. Петрология расслоенных интрузий. - Л.: Наука, 1980.
14. Эволюция изверженных пород. - М.: Мир, 1983.
15. Cawthorn R.G., Davies G. Experimental data at 3 kbars pressure on parental magma to the Bushveld Complex // Contrib. Miner. Petrol. 1983. 83. P. 128-135.
16. Irvine T.N., Sharpe M.R. Magma mixing and the origin of stratiform oxide ore zones in the Bushveld and Stillwater complexes // Metallogeny of basic and ultrabasic rocks. Institute Mining and Metallurgy, 1986. P. 183-198.

УДК 552.161:552.54

© Коллектив авторов, 2002

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОНТАКТОВЫЙ МЕТАМОРФИЗМ КАРБОНАТНЫХ ПОРОД В ОРЕОЛАХ НОРИЛЬСКИХ ГИПЕРБАЗИТ-БАЗИТОВЫХ ИНТРУЗИЙ

Д.М.Туоровцев, С.Ф.Служеникин (ИГЕМ РАН), С.К.Михалев
(ГП «Норильскгеология»), В.К.Степанов (МГГРА)

Показаны проявления высокотемпературных контактово-метасоматических образований (структуры, минеральный и химический составы) в карбонатных толщах из ореолов полностью дифференцированных гипербазит-базитовых массивов Норильского района.

Проявления контактового метаморфизма спуррит-мервинитовой фации и мелилит-монтичеллитовой субфации представляют значительный петрологический интерес [2–5 др.], отражая своим присутствием, прежде всего, возможность достижения максимально высоких температур на контактах с гипербазит-базитовыми магматическими расплавами. М.Н.Годлевский [1] в своих исследованиях предвидел возможность возникновения образований этой фации в контактах с высокотемпературными магмами Норильского района, но их находки стали возможными только после открытия талнахских интрузий, контактирующих с карбонатными толщами.

В ореолах гипербазит-базитовых интрузий Норильского района эти образования сравнительно редки. Чаще всего они встречаются в контактах с массивами норильского типа различной степени рудоносности (Талнахский, Хараелахский, Норильск-I, Томулахский, Восточно-Тальминский, Имангдинский). Вместе с тем они выявлены и в контактовых зонах интрузивов курейского типа (Силурийский, Верхнеильтукский, 69-км р. Курейка), а также в связи с некоторыми массивами неясной типовой принадлежности (Тукаландинский, Чопкинский, Хуперский). Во всех случаях эти проявления связаны с полностью дифференцированными гипербазит-базитовыми массивами.

Первоначально спуррит-мервинитовая фация была выделена в контактах с норильскими гипербазит-базитовыми дифференцированными интрузивами на основании находок параморфоз кварца по тридимиту в ороговикопановых кварцевых песчаниках непосредственно на контакте с интрузивами Талнахский и Норильск-II, муллита в ассоциации муллит-кор-

диерит-рутил-плагиоклаз — в апоаргиллитовых роговиках в ксенолите среди такситовых габбро-долеритов Хараелахского интрузива, а также тридимита в ассоциациях с плагиоклазом, санидином и рутилом — в ореолах интрузивов Норильск-I и Хуперский [7 и др.]. В метаморфизованных карбонатных толщах типоморфные для этой фации минералы были выявлены позднее в связи со значительным их замещением низкотемпературными минеральными ассоциациями.

Ниже рассматриваются проявления высокотемпературных контактово-метаморфических образований в карбонатных толщах в связи с некоторыми детально изученными интрузивными массивами.

Талнахский интрузив. Первые находки спуррита, мервинита и тиллеита в контактовой зоне Талнахского интрузива были установлены петрографом Р.И.Сошниковой в 80-х годах при изучении керн детальных разведочных скважин, пробуренных в восточной части рудника Комсомольский (рис. 1, 2). Здесь, как и на своем значительном протяжении, Талнахский интрузив контактирует с подстилающими отложениями каларгонской свиты верхнего девона, которые представлены доломитами чистыми или с примесью SiO_2 и Al_2O_3 , содержащими редкие прослои мергелей и глинистых известняков.

На прогрессивном этапе метаморфизма доломиты и известняки преобразуются в мраморы, обладающие зональным строением. Они подразделяется на внешнюю и внутреннюю зоны, границей между которыми служит периклазовая изограда.

Внутренняя зона сложена апопериклазовыми бруситовыми мраморами с монтичеллитом, мелилитом, форстеритом, шпинелью,

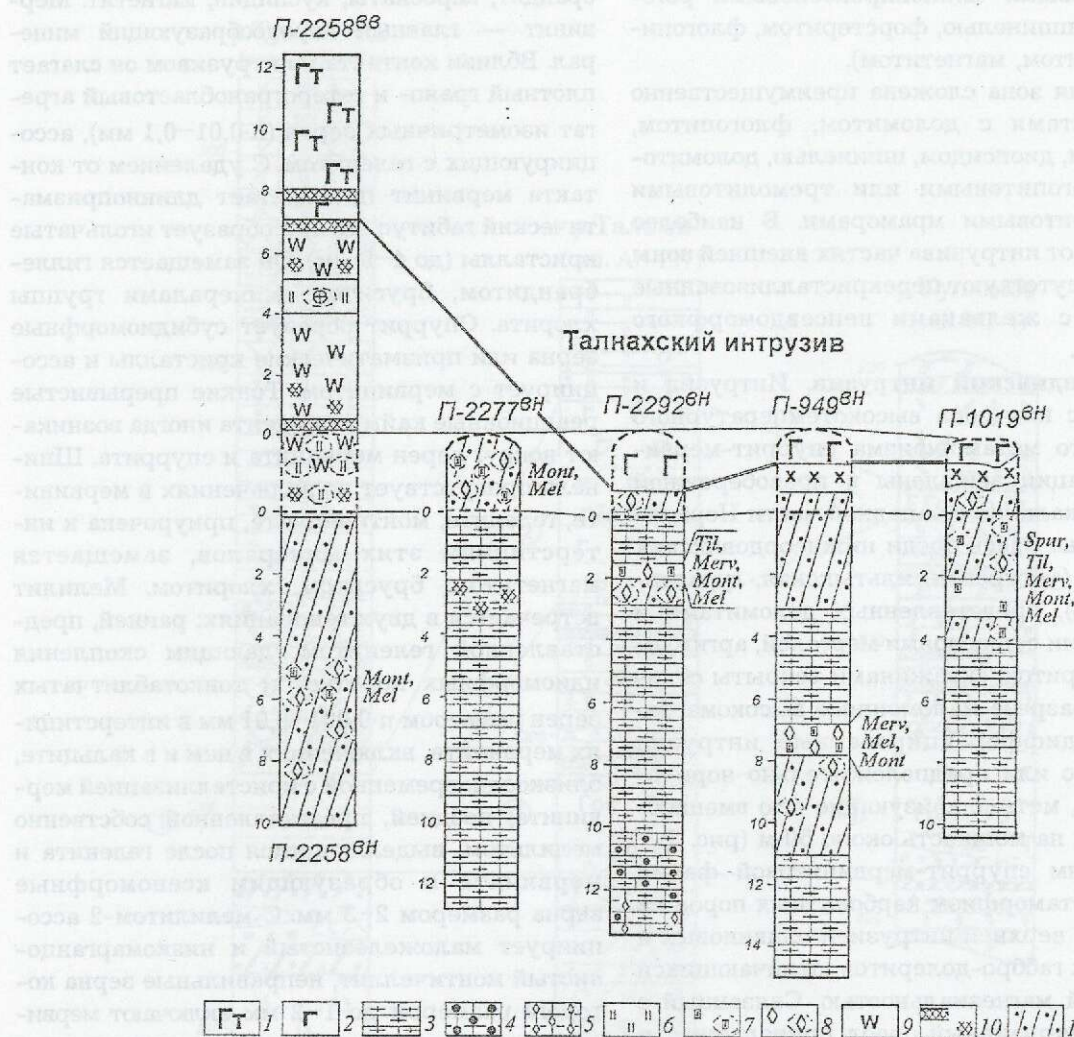


Рис. 2. Размещение спуррит-мервинитовой фации в разрезах контактовых мраморов, скарнов и апоскарновых метасоматитов из нижнего экзоконтакта Талнахского интрузива:

габбро-долериты: 1 — такситовые, 2 — контактовые; мраморы: 3 — бруситовые апопериклазовые, 4 — форстеритовые, 5 — монтичеллитовые; метасоматические породы: 6 — существенно полевошпатовые метасоматиты, 7 — скарны мелилитовые и их реликты, 8 — скарны монтичеллитовые и их реликты, 9 — скарны волластонитовые, 10 — скарны везувиан-гранатовые, 11 — гидрогранат-серпентиновые метасоматиты

флогопитом [6, 7, 9]. Непосредственно на контакте с интрузивом (на расстоянии до 2–7 м) локально развиты мервинит-мелилитовые мраморы со спурритом, тиллеитом, монтичеллитом, мелилитом, волластонитом, шпинелью, перовскитом в ассоциациях Spr+Wo+Mel+Ca*, Spr+Mel+Mont+Ca+Pvs, Merv+Til+Mel+Mont+Per+Shp+Ca, а также форстеритовые и монтичеллитовые скарны. Среди низкотемпературных минералов, замещающих высоко-

температурные парагенетические ассоциации, выявлены куспидин, гиллебрандит, аксинит, себоллит, гидрогранат, серпентин, хлорит, пренит, элестадит, гизингерит и др. При удалении от контакта с интрузивом (до 10–20 м) присутствуют мраморы с периклазом и монтичеллитом, еще дальше (до 45 м) — безмонтичеллитовые апопериклазовые бруситовые мраморы. Они переслаиваются с офикальцитами, форстерит-диопсидовыми мраморами и

*Символы минералов: Ca — кальцит, Gel — геленит, Mel — мелилит, Merv — мервинит, Mont — монтичеллит, Shp — шпинель, Spur — спуррит, Til — тиллеит, Per — периклаз, Phl — флогопит, Pvs — перовскит.

апомергелевыми клинопироксеновыми роговиками (со шпинелью, форстеритом, флогопитом, кальцитом, магнетитом).

Внешняя зона сложена преимущественно офикальцитами с доломитом, флогопитом, тремолитом, диопсидом, шпинелью, доломитовыми, флогопитовыми или тремолитовыми безфорстеритовыми мраморами. В наиболее удаленных от интрузива частях внешней зоны ореола присутствуют перекристаллизованные доломиты с желваками непсевдоморфного серпентина.

Тукаландинский интрузив. Интрузив и связанная с ним зона высокотемпературного контактового метаморфизма спуррит-мервинитовой фации выявлены в правобережной части р. Тукаланда в западной части Норильской мульды. Здесь среди нижнеордовикских отложений (уйгурская, ильтыкская, гурагирская свиты), представленных доломитами и известняками с прослоями мергелей, аргиллитов и ангидритов, скважинами вскрыты сближенные в разрезе маломощные высокомагнезиальные дифференцированные интрузии оронговского или предположительно норильского типов, метаморфизующие всю вмещающую толщу на мощность около 50 м (рис. 3).

Условиям спуррит-мервинитовой фации отвечает метаморфизм карбонатных пород на контактах с верхней интрузией оливиновых и пикритовых габбро-долеритов, отличающихся повышенной магнезиальностью. Связанный с ней околоинтрузивный ореол принадлежит к типу аномальных зон метаморфизма [8 и др.] с величиной критерия Ингерсола $K_{\text{и}} \geq 16$, коэффициентом симметрии ореола $K_{\text{с}} \geq 15$. Заметная роль в строении этого полифациального контактово-метасоматического комплекса принадлежит метасоматическим образованиям ($K_{\text{м}}=0,3$). Соотношение фаций оценивается отношением С-П:А:М=4-5:4-2:2-1 при заметной роли образований высокотемпературных фаций контактового метаморфизма.

Спуррит-тиллеит-мелилит-мервинитовые мраморы локализуются в верхнем экзоконтакте интрузива на расстоянии до 3 м от контакта с массивом, образуя слой мощностью 1,2 м. Мраморы мелко- и среднекристаллические с реликтовой слоистой текстурой. В их составе присутствуют, %: кальцит 15-60, мервинит 20-50, спуррит, тиллеит, шпинель 0-5, мелилит 0-15, монтичеллит, волластонит, элестадит, пирротин. Широко развиты вторичные минералы — серпентин, гидрогранат, хлорит, брусит, гилле-

брандит, карбонаты, куспидин, магнетит. Мервинит — главный породообразующий минерал. Вблизи контакта с интрузивом он составляет плотный грано- и гетерогранобластовый агрегат изометричных зерен ($n=0,01-0,1$ мм), ассоциирующих с геленитом. С удалением от контакта мервинит приобретает длиннопризматический габитус, иногда образует игольчатые кристаллы (до 4-5 мм). Он замещается гиллебрандитом, бруситом, минералами группы хлорита. Спуррит образует субидiomорфные зерна или призматические кристаллы и ассоциирует с мервинитом. Тонкие прерывистые реакционные каймы тиллеита иногда возникают вокруг зерен мервинита и спуррита. Шпинель присутствует во включениях в мервините, гелените, монтичеллите, приурочена к интерстициям этих минералов, замещается магнетитом, бруситом, хлоритом. Мелилит встречается в двух генерациях: ранней, представленной геленитом, дающим скопления идиоморфных коротко- и тонкотаблитчатых зерен размером $n=0,001-0,01$ мм в интерстициях мервинита, включениях в нем и в кальците, близкоодновременной с кристаллизацией мервинита; поздней, представленной собственно мелилитом, выделяющимся после геленита и мервинита и образующим ксеноморфные зерна размером 2-3 мм. С мелилитом-2 ассоциирует маложелезистый и низкомарганцевистый монтичеллит, неправильные зерна которого размером до 1-2 мм включают мервинит, шпинель, геленит. Волластонит ассоциирует с монтичеллитом и выделяется в составе минералов более поздней фазы.

Анализ взаимоотношений минералов позволяет наблюдать в мраморах две высокотемпературные минеральные парагенетические ассоциации. Первая формируется на прогрессивном этапе метаморфизма в условиях спуррит-мервинитовой фации и представлена ассоциацией $\text{Merv} + \text{Spur} + \text{Til} + \text{Gel} + \text{Shp} + \text{Ca}$. Вторая возникает при снижении температур на этапе регрессивного метаморфизма, соответствующего РТ условиям высокотемпературного поля пироксен-роговиковой фации (мелилит-монтичеллитовая субфация) [4], и представлена ассоциацией $\text{Mel-2} + \text{Mont} + \text{Vol} + \text{Ca}$.

Кроме мраморов, в ореоле Тукаландинского интрузива присутствуют аллохимические магнезиальные скарны форстеритового и флогопитового минеральных типов, широко развиты волластонитовые и гроссуляр-везувиановые известковые скарны, а также проявлено

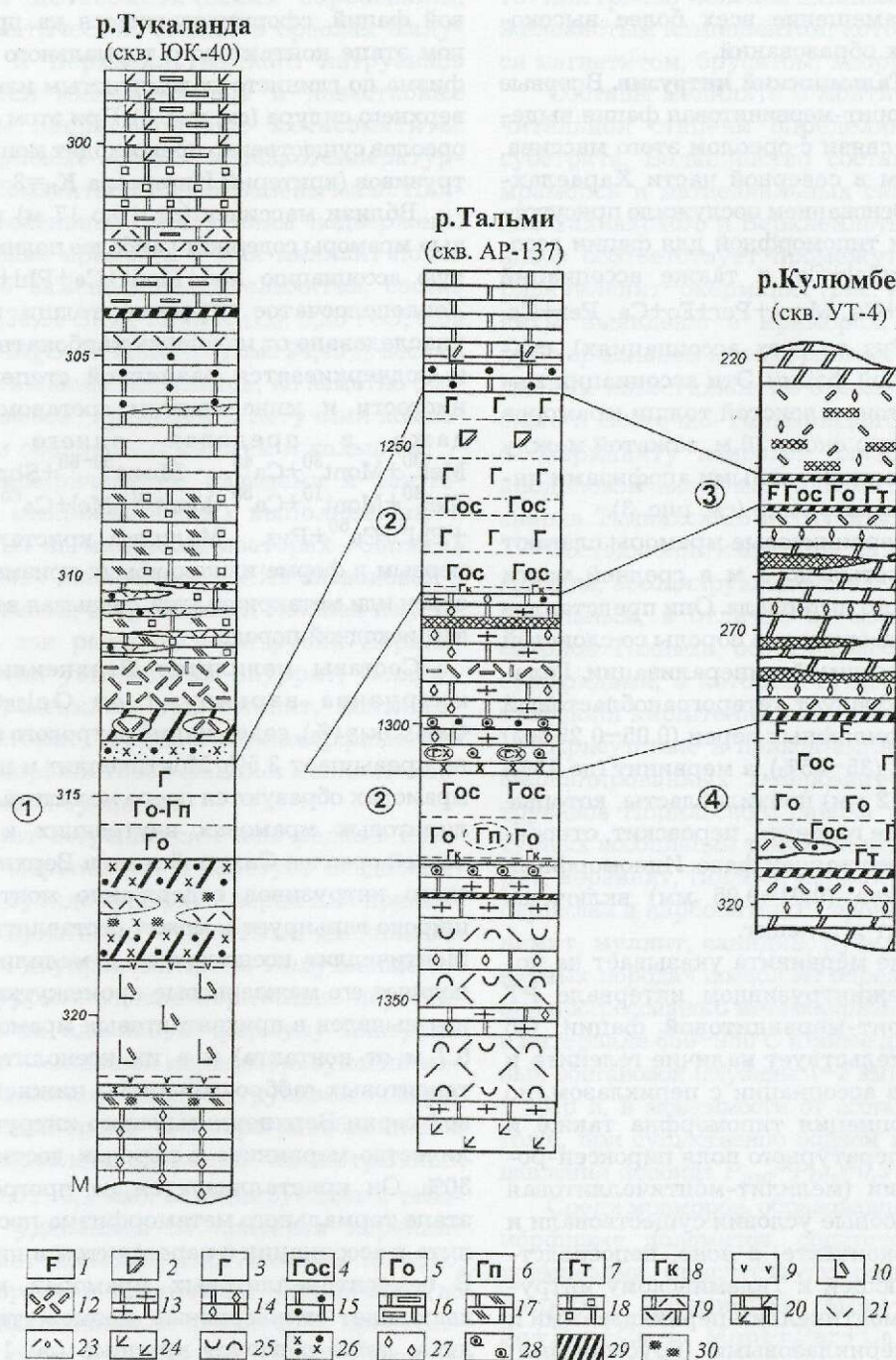


Рис. 3. Размещение спуррит-мервинитовой фации в контактовых зонах Тукаландинского (1), Тальминского (2), Силурийского (3) и Верхнеильтывского (4) интрузивов:

интрузивные породы: 1 — лейкогаббро, 2 — габбро-диориты; габбро-долериты: 3 — безоливиновые, 4 — оливинсодержащие, 5 — оливиновые, 6 — пикритовые, 7 — такситовые, 8 — контактовые; 9 — краевые микродолериты; 10 — плагиопорфировые долериты; 11 — доломиты; мраморы: 12 — со спурритом, мервинитом, тиллеитом, меллитом, 13 — апотериклазовые бруситовые, 14 — монтичеллитовые, 15 — форстеритовые, 16 — флогопитовые, 17 — волластонитовые, 18 — гранатовые, 19 — диопсидовые, 20 — тремолитовые; роговики апомергелевые: 21 — клинопироксеновые, 22 — плагиоклаз-клинопироксеновые, 23 — клинопироксеновые с центрической структурой, 24 — тремолитовые, 25 — перекристаллизованные ангидриты; метасоматиты, скарны: 26 — фассаитовые с форстеритом, 27 — монтичеллитовые, 28 — брусититы, 29 — серпентиниты апофорстеритовые, 30 — везувиан-гранатовые

интенсивное гидрогранат-хлорит-серпентин-карбонатное замещение всех более высоко-температурных образований.

Восточно-Тальминский интрузив. Впервые достоверно спуррит-мервинитовая фация выделена именно в связи с ореолом этого массива, расположенным в северной части Хараелахской мульды. Основанием послужило присутствие в мраморах типоморфной для фации ассоциации $Merv + Gel + Ca$, а также ассоциаций $Gel + Per + Mont + Ca$, $Mont + Per + Fo + Ca$, $Per + Ca$, $Fo + Ca$ ($\pm Mt$, Pvs во всех ассоциациях), стабильных в данной фации. Эти ассоциации выявлены среди тонкослоистой толщи мраморов общей мощностью около 30 м, зажатой между двумя дифференцированными апофизами интрузива норильского типа (см. рис. 3).

Мелилит-мервинитовые мраморы слагают прослой мощностью до 3 м в средней части межинтрузивного интервала. Они представляют собой среднезернистые породы со слоистой текстурой без видимой минерализации. Геленит (до 40%) образует гетерогранобластовый агрегат субидiomорфных зерен (0,05–0,25 мм) среди кальцита (35–65%), а мервинит (до 45%) — крупные (1–2 мм) пойкилобласты, которые включают, кроме геленита, перовскит, относящийся к наиболее ранней фазе. Идиоморфные зерна перовскита (0,01–0,05 мм) включены также в кальцит и геленит.

Присутствие мервинита указывает на достижение в межинтрузивном интервале PT условий спуррит-мервинитовой фации. Об этом же свидетельствует наличие геленита и монтichelлит в ассоциации с периклазом, но последняя ассоциация типоморфна также и для высокотемпературного поля пироксен-роговиковой фации (мелилит-монтichelлитовая субфация). Подобные условия существовали и в нижнем экзоконтакте, в зоне, непосредственно примыкающей к Тальминскому интрузиву. Наряду с монтichelлит-периклазовыми и существенно периклазовыми (бруситовыми) мраморами, нижний экзоконтакт слагают апомергелевые существенно пироксеновые и плагиоклаз-пироксеновые роговики, переслаивающиеся с сиреневыми ангидритовыми мраморами.

Верхнеильтытский и Силурийский интрузивы. Контактные ореолы интрузивов сложены высокотемпературными полифациальными комплексами пород, в строении которых участвуют образования спуррит-мервинитовой, пироксен-роговиковой (мелилит-мон-

тичеллитовая субфация) и амфибол-роговиковой фаций, сформировавшиеся на прогрессивном этапе контактового термального метаморфизма по глинисто-доломитистым известнякам верхнего силура (см. рис. 3). При этом мощность ореолов существенно превосходит мощность интрузивов (критерий Ингерсола $K_i = 3-4$).

Вблизи массивов (от 4 до 17 м) контактовые мраморы содержат наиболее полиминеральную ассоциацию $Mel + Mont + Ca + Phl + Shp + Pvs$. Тонкополосчатое строение толщи мраморов унаследовано от исходных карбонатных пород и подчеркивается различной степенью зернистости и минеральным составом слоев даже в пределах одного шлифа: $Mel^{30} + Mont^{30} + Ca^{40}$, $Mont^{50-60} + Shp + Ca^{30-40}$, $Mel^{40} + Mont^{10} + Ca^{50}$, $Mont^{10} + Mel + Ca^{85}$, $Mont^{40} + Phl^{50} + Ca^{50} + Pvs$. Мелилит кристаллизуется первым в форме идиоморфных призматических зерен или метакристаллов, связывая весь глинозем исходной породы.

Составы мелилитов Верхнеильтытского интрузива варьируют от $Gel_{28}Ok_{72}$ до $Gel_{55}Ok_{45}$ (%), содержание натрового мелилита не превышает 3,5%. Монтichelлит и шпинель в мраморах образуются после мелилита. В безмелилитовых мраморах внутренних и средних частей ореолов Силурийского и Верхнеильтытского интрузивов содержание монтichelлита широко варьирует и может составлять 40–50%. Монтichelлит ксеноморфен к мелилиту и выполняет его межзерновые промежутки. Мервинит выявлен в приконтактных мраморах (0,4–0,7 м от контакта) и в их ксенолитах среди такситовых габбро-долеритов нижней габбровой серии Верхнеильтытского интрузива. Количество мервинита в породах достигает 25–30%. Он кристаллизуется на прогрессивном этапе термального метаморфизма после мелилита в ассоциации с перовскитом и шпинелью. В безмонтichelлитовых мраморах мервинит выполняет межзерновые промежутки мелилита, реже образует крупные (до 1–1,5 мм) пойкилобластические метакристаллы, переполненные включениями зерен мелилита.

Контактные мраморы внешних частей ореолов представлены тонкослоистой толщей перекристаллизованных карбонатных и мергелевых пород и мраморов, содержащих новообразования форстерита, граната, клинопироксена, флогопита и тремолита, которые ассоциируют с доломитом и стабильны в условиях амфибол-роговиковой фации контактового метаморфизма.

Среди метасоматических образований послемагматической стадии в ореолах Силурийского и Верхнеильтыкского интрузивов выделяются магнезиальные и известковые скарны и послескарновые метасоматиты. Послескарновые средне- и низкотемпературные метасоматиты распространены мало. Наиболее интенсивным изменениям подвержены мелилитовые мраморы. В них мелилит почти полностью замещен гидромелилитом, состав которого (36,95 SiO₂, 11,62 Al₂O₃, 5,20 FeO, 0,09 MnO, 5,22 MgO, 35,41 CaO, сумма 94,49%) весьма близок к таковому мелилитов, но заметно обогащен железом, кремнием и летучими компонентами и обеднен алюминием и кальцием.

Петрографическими методами и рентгеновским микроанализом, выполненным в ИГЕМ РАН на микроанализаторах «Самеса» и «Самебах» аналитиками Т.И. Головановой и И.П. Лапутиной, в мраморах и скарнах из контактовых зон различных интрузий Норильского района установлены спуррит, тиллеит, мервинит, мелилит, волластонит, монтичеллит, форстерит, плеонаст, типоморфные для спуррит-мервинитовой фации и мелилит-монтичеллитовой субфации.

Спуррит встречается очень редко в ассоциации с мервинитом и образует несдвоенные субидiomорфные зерна или призматические кристаллы с простыми двойниками и высоким двупреломлением. Полученные составы спуррита удовлетворительно пересчитываются на идеальную формулу минерала. Мервинит — главный породообразующий минерал. Вблизи контакта с интрузивом он образует плотный grano- и гетерогранобластовый агрегат преимущественно изометричных зерен ($n=0,01-0,1$ мм), ассоциирующих с геленитом. С удалением от контакта мервинит приобретает длиннопризматический габитус, иногда образует игольчатые кристаллы (до 4–5 мм). Для минерала характерно присутствие двух систем полисинтетических двойников, пересекающихся под углом 43°. Замещается гиллебрандитом, бруситом, минералами группы хлорита. Составы проанализированных мервинитов близки к теоретическому.

Тиллеит наблюдается в виде тонких прерывистых реакционных кайм вокруг мервинита и спуррита, реже в более крупных (0,3 мм) неправильных выделениях. Во включениях в мервините, гелените, монтичеллите или в их интерстициях встречаются октаэдры и неправильные зерна размером 0,1–0,3 мм желтова-

то- или грязно-зеленой шпинели, обогащенной железистым компонентом, которая замещается магнетитом, бруситом, хлоритом.

Составы мелилита и монтичеллита в значительной степени определяются составом субстрата. Большинство составов мелилитов мраморов и магнезиальных скарнов из ореолов Талнахского и Верхнеильтыкского интрузивов соответствует промежуточным членам ряда геленит–окерманит (рис. 4). Чистые гелениты выявлены в мраморах, образованных при термальном метаморфизме низкоглиноземистых известняков из ореолов Тукаландинского и Восточно-Тальминского интрузивов, а к окерманиту наиболее близок мелилит из аподоломитового монтичеллит-мелилитового скарна Талнахского интрузива.

Составы монтичеллитов из мраморов р. Тукаланда, ассоциирующие с геленитом, близки к идеальным, в отличие от монтичеллитов из скарнов Талнаха, особенно ассоциирующих с сульфидами, в которых существенно возрастает доля кирштейнитового минала.

Присутствие в приконтактных зонах дифференцированных гипербазит-базитовых интрузивов Норильского района высокотемпературных ассоциаций таких минералов, как спуррит, мервинит, тиллеит, мелилит, монтичеллит, периклаз в карбонатных породах, а также тридимит, муллит, санидин, рутил в алюмосиликатных породах позволяет определить *PT* условия прогрессивного метаморфизма на контактах в интервале 850–950°C и более для гипабиссальных обстановок (глубины 1–2 км) при $P_{\text{общ}}=0,5-1$ кбар и, в зависимости от состава вмещающих толщ, при существенно водном или углекислом давлении флюида $P_{\text{H}_2\text{O}}=P_{\text{CO}_2}=0,3-0,6$ кбар.

Среди мраморов, образовавшихся при метаморфизме доломитов, содержащих примесь кремнезема, присутствуют равновесные минеральные ассоциации $\text{Mont}+\text{Fo}+\text{Shp}+\text{Ca}$, $\text{Fo}+\text{Per}+\text{Ca}$ и $\text{Mont}+\text{Per}+\text{Ca}$. Ассоциация $\text{Mont}+\text{Per}+\text{Ca}$ [10] связана с более высокими температурами (и меньшим P_{CO_2}), чем две первые ассоциации. Согласно экспериментальным данным [10], ассоциация монтичеллит+периклаз+CO₂ в соответствии с реакцией форстерит+кальцит $\leftrightarrow$ монтичеллит+периклаз+CO₂ при давлении P_{CO_2} 500 атм формируется при температуре не ниже 870–880°C. При более низких температурах монтичеллит возникает по реакции диопсид+форстерит+2кальцит $\leftrightarrow$ 3монтичеллит+2CO₂ [11]. Со-

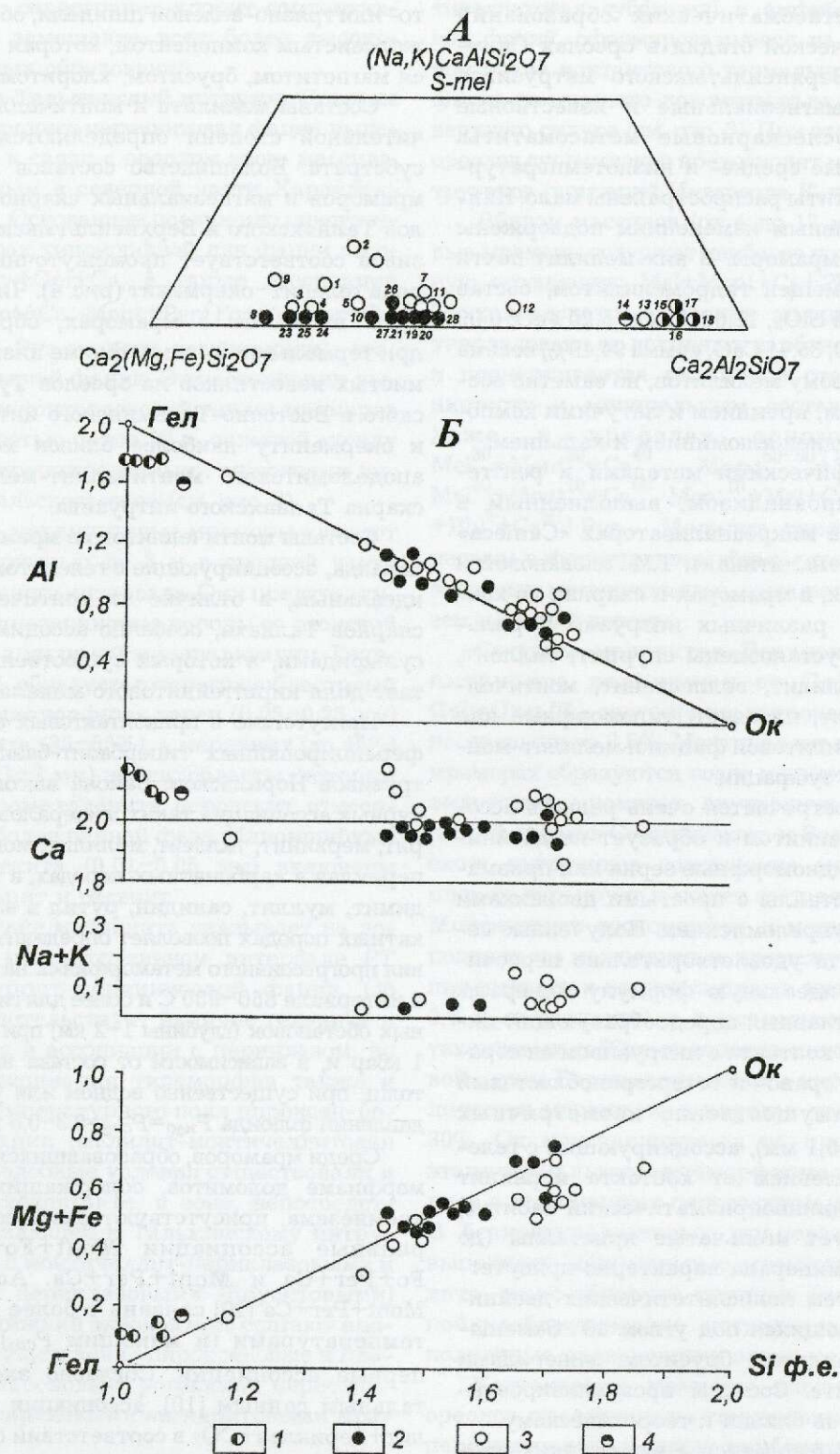


Рис. 4. Составы мелилитов на диаграмме окерманит-S-мелилит-геленит (А) и зависимости содержания (ф.е.) Al, Ca, Na+K, Fe+Mg от Si (Б) в мелилитах из контактовых ореолов гипербазит-базитовых интрузивов Норильского района:

1 — Тукаландинского, 2 — Талнахского, 3 — Верхнеильтыкского, 4 — Тальминского

гласно экспериментальным данным [12], образование монтчеллита за счет диопсида и форстерита при метаморфизме доломитовых мергелей при P_{CO_2} 500 атм происходит при температуре не ниже 850–860°C. В пределах экспериментальной ошибки обе реакции реализуются при одинаковой температуре [13]. Таким образом, появление монтчеллита в ассоциации с периклазом в экзоконтактовых зонах гипербазит-базитовых массивов возможно при температуре не ниже 850–880°C, что соответствует условиям мелилит-монтчеллитовой субфации.

В карбонатных породах с примесью силикатного материала изохимические минеральные ассоциации силикатов кальция и магния (спуррит, тиллеит, мервинит, мелилит, периклаз, монтчеллит, форстерит) формируются непосредственно на контакте с интрузивами в магматическую стадию при PT условиях спуррит-мервинитовой фации и мелилит-монтчеллитовой субфации (850–950°C и $P_{\text{общ}}=P_{\text{CO}_2}=0,5\text{--}1$ кбар). В условиях пироксен-роговиковой фации (850–750°C) возникают мраморы с периклазом, форстеритом, монтчеллитом, диопсидом, волластонитом, а также апомергелевые клинопироксеновые роговики с плагиоклазом, форстеритом, шпинелью, флогопитом. Эти породы составляют около половины мощности экзоконтактовых зон. Нижнюю половину ореолов составляют изохимические мраморы с доломитом, тремолитом, форстеритом или апомергелевые роговики с клинопироксеном, плагиоклазом, актинолитом, флогопитом, гранатом, стабильные в условиях амфибол-роговиковой фации (750–550°C). Во внешней части ореолов присутствуют мраморы и апомергелевые роговики с доломитом, тремолитом, флогопитом, эпидотом, хлоритом, формирующиеся в условиях мусковит-роговиковой фации (550–450°C).

На регрессивном этапе образуются инфильтрационные аллохимические магнезиальные и известковые скарны. Минеральный состав зональных магнезиальных скарнов (фассаитовых, форстеритовых, монтчеллитовых, флогопитовых) определяется составом субстрата. В мелилитовых мраморах при снижении $T^\circ\text{C}$ и P_{CO_2} возникает новая генерация мелилита, богатого окерманитом, и куспидин. Известковые скарны с гроссуляр-андрадитом, везувианом, диопсидом, волластонитом образуются позже магнезиальных. С низкотемпературными (менее 400°C) метасоматическими процессами связано развитие гидрограната, серпентина, деллаита,

брусита, хлорита, замещающих первичные минералы. Сульфидный расплав, формировавший массивные руды, замещает и перекристаллизует высокотемпературные магнезиально-известковые силикаты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Годлевский М.Н. Траппы и рудоносные интрузии Норильского района. – М.: Госгеолтехиздат, 1959.
2. Метасоматизм и метасоматические породы / В.А.Жариков, В.Л.Русинов, А.А.Маракушев и др. – М.: Научный мир, 1998.
3. Перцев Н.Н. Высокотемпературный метаморфизм и метасоматизм карбонатных пород. – М.: Наука, 1977.
4. Ревердатто В.В. Фации контактового метаморфизма. – М.: Недра, 1970.
5. Соболев В.С. Редкий тип контактового метаморфизма известняков // Зап. ВМО. 1935. Ч. 64. № 1.
6. Туровцев Д.М. Бруситсодержащие породы в контактовом ореоле Талнахской интрузии (Норильский район) // Зап. ВМО. 1969. Ч. 98. Вып. 4.
7. Туровцев Д.М. Условия формирования формации контактовых роговиков в ореолах дифференцированных трапповых интрузивов на Талнахском месторождении // Геология и петрология интрузивных траппов Сибирской платформы. М., 1970.
8. Туровцев Д.М. Типы контактово-метаморфических ореолов безрудных и рудоносных трапповых интрузий Норильского района в связи с критериями никеленосности магматических комплексов // Оценка и критерии никеленосности магматических комплексов рудных районов. Тр. ЦНИГРИ. М., 1986. Вып. 209. С. 28–33.
9. Туровцев Д.М., Служеникин С.Ф. PT -условия метаморфизма карбонатных пород в контактах с гипербазит-базитовыми интрузивами Норильского района // Physico-chemical aspects of endogenic geological processes. Abstr. Int. Symp. D.S.Korzhinskii 100th anniversary. Moscow-Chernogolovka, 1999.
10. Bowen N.L. Progressive metamorphism of siliceous limestones and dolomites // Journ. Geol. 1940. Vol. 48. № 3.
11. Harker R.J., Tuttle O.F. Studies in the system CaO-MgO-CO_2 . Part 1 // Amer. Journ. Sci. 1955. Vol. 253. № 3.
12. Harker R.J., Tuttle O.F. The lower limit of stability of akermanite ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$) // Amer. Journ. Sci. 1956. Vol. 254. № 8. P. 468–478.
13. Walter L.S. Experimental studies on Bowens Decarbonation series // Amer. Journ. Sci. 1963. Vol. 261. № 5–8.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ



УДК 553.41/48.042 (571.51)

© Коллектив авторов, 2002

СОСТОЯНИЕ РУДНОЙ БАЗЫ ЦВЕТНЫХ И БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ В НОРИЛЬСКОМ РАЙОНЕ И НАПРАВЛЕНИЯ ПЕРВООЧЕРЕДНЫХ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

В.А.Люлько (КПР по Таймырскому АО), Ю.Н.Амосов (ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель»), С.М.Козырев, М.З.Комарова (ОАО «Институт «Гипроникель»), В.А.Рябкин, В.А.Радько (ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель»), О.Н.Симонов, Н.В.Рочев (КПР по Таймырскому АО)

На основе анализа геологических материалов, полученных в последние годы, и результатов предшествующих работ дана оценка состояния минерально-сырьевой базы Норильского района с учетом эксплуатируемых и находящихся в госрезерве природных и техногенных месторождений платино-медно-никелевых руд. Разработана обобщенная типовая модель эталонного месторождения и рудных узлов формации. Принципиальные положения последней использованы при выделении площадей, перспективных на богатые платино-медно-никелевые руды, и обосновании направления и очередности поисковых работ.

Норильский геолого-экономический район (НЭР) (рис. 1) — средоточие крупнейших в мире эксплуатируемых месторождений платино-медно-никелевых (МПГ-Cu-Ni) руд, на базе которых работает Норильский горно-металлургический комбинат (сейчас — Заполярный филиал ОАО «Горно-металлургическая компания «Норильский никель» (ЗФ ГМК «НН»). 80% никеля и 95% меди сульфидных МПГ-Cu-Ni руд, составляющих основу минерально-сырьевой базы (МСБ) ОАО «ГМК «НН», включающего также предприятия Кольского полуострова, находятся в недрах НЭР [3, 12].

У истоков исследований месторождений НЭР и развития учения о их происхождении стояла плеяда геологов и среди них — М.Н.Годлевский. Фундаментальные труды этого ученого о проблемах места и времени продуктивных интрузивов в истории развития магматизма района, особенностях их формирования, обусловленных двойственной природой исходного расплава — источника рудного вещества, процессах рудообразования применительно к сульфидным МПГ-Cu-Ni рудам и составе руд все еще определяют существо гипотез образования Норильских месторождений и влияют на практику их поисков, разведки и освоения. Многие положения, разработанные М.Н.Годлевским, легли в основу статьи.

Все известные в НЭР концентрации МПГ-Cu-Ni руд можно разделить на три группы: месторождения эксплуатируемые; резервные; площади, перспективные для поисков и оценки.

Эксплуатируемые месторождения МПГ-Cu-Ni руд. В настоящее время в НЭР разрабатываются сульфидные МПГ-Cu-Ni руды месторождений Норильск-I, Талнахское и Октябрьское (см. рис. 1), связанных с дифференцированными базит-гипербазитовыми интрузивами норильского комплекса (НК) позднепермского — раннетриасового возраста. Месторождение Норильск-I разрабатывается карьером «Медвежий ручей» и подземным рудником «Заполярный», месторождения Талнахское и Октябрьское — подземными рудниками «Октябрьский», «Таймырский», «Комсомольский» (включает шахты «Маяк» и «Скалистая»).

На месторождениях выделены три промышленных типа руд: богатые (массивные); вкрапленные в интрузиве; прожилково-вкрапленные (медистые) в экзоконтактах интрузива и залежей массивных руд. Рентабельность отработки определяется богатыми и медистыми рудами. Добыча вкрапленных руд рентабельна лишь при открытой разработке и подземной по схеме обрушения.

За время эксплуатации месторождений запасы богатых руд уменьшились на 33%, вкрап-

ленных и медистых на 8% при снижении качества оставшихся запасов всех типов руд. Современное состояние рудной базы ЗФ ГМК «НН» приведено в табл. 1. Обеспеченность запасами богатых руд составляет не более 30 лет, рентабельными для отработки вкрапленными рудами месторождения Норильск-I — 20 лет. По исчерпанию запасов богатых руд в распоряжении ОАО «ГМК «НН» могут остаться лишь вкрапленные, пригодные к добыче подземным способом с закладкой. Это настолько увеличит себестоимость продукции, что исключит возможность конкуренции с зарубежными производителями. Отсюда — острая необходимость поиска и вовлечения в сферу освоения конкурентоспособных месторождений богатых руд или вкрапленных, пригодных для добычи карьером.

Наибольший интерес представляет Черногорское месторождение с рудным горизонтом в низах разреза интрузива. Сотрудники института «Гипроникель» в пробах вкрапленных руд этого горизонта выявили более 20 минералов МПГ и Au. Опыты по коллективной флотации на тех же пробах показали приложимость к ним схемы, действующей на предприятиях «ГМК «НН». С учетом близости месторождения к металлургическим предприятиям ЗФ «ГМК «НН», сходных горно-геологических условий и возможности карьерной добычи разработано ТЭО целесообразности освоения Черногорского месторождения сульфидных медно-никелевых руд. Для добычи выбран Восточный участок, где условный никель составит 1,76%. По расчетам института «Гипроникель» прибыльная добыча карьером до глубины 300–350 м обеспечивает

1. Качество и структура запасов руд эксплуатируемых месторождений НЭР

Типы руд	Качество			Запасы, %			
	Ni, %	Cu, %	МПГ, г/т	Руда	Ni	Cu	МПГ
Массивные	3,21	4,57	10,76	10,3	41,7	31,8	20,6
Медистые	0,88	3,33	9,82	7,4	8,1	16,4	13,3
Вкрапленные	0,49	0,93	4,34	82,3	50,2	51,8	66,1
Всего	0,84	1,58	5,40	100	100	100	100

Резервные объекты. Платино-медно-никелевые месторождения госрезерва. В госрезерве числятся три месторождения вкрапленных руд (6% от запасов эксплуатируемых объектов) — Черногорское, Горозубовское и Норильск-II (см. рис. 1), которые разведывались в 50–60-е годы. Качество вкрапленных руд месторождений госрезерва близко к такому месторождения Норильск-I (табл. 2).

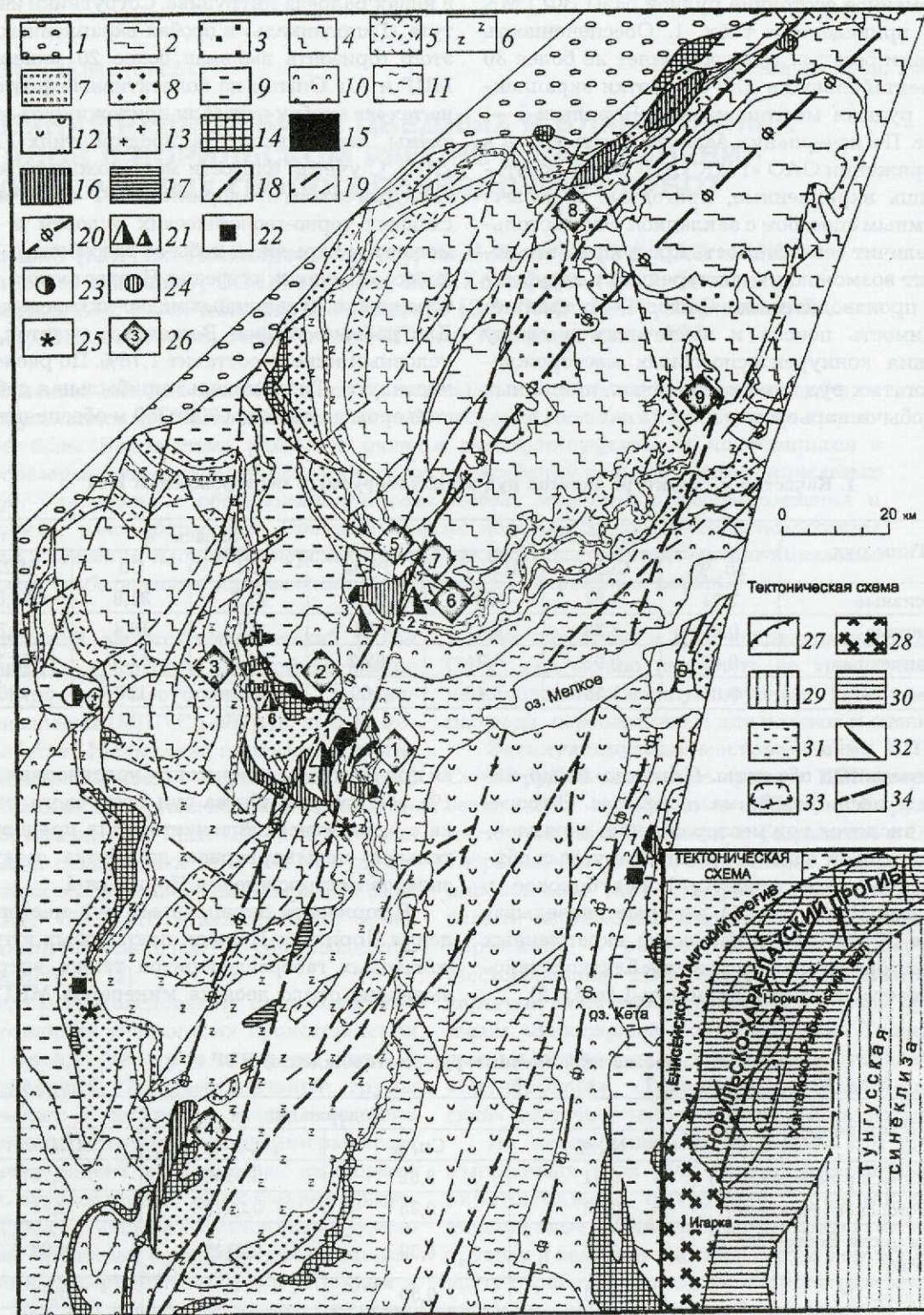
ся при бортовом содержании условного никеля 1%, так что разработка руд Восточного участка с экономической точки зрения предпочтительнее, чем карьерная доработка остатков запасов месторождения Норильск-I.

В горизонте вкрапленных руд месторождения Норильск-II среди пикритовых и троктолитовых габбро-долеритов также впервые выявлено около десятка минералов МПГ. По

2. Качество вкрапленных руд месторождений НЭР

Месторождения	Содержание			
	Ni, %	Cu, %	Co, %	МПГ, г/т
Медвежий ручей (карьер)	0,44	0,62	0,0150	7,70
Черногорское* (средние)	0,25	0,35	0,0145	4,71
В том числе Восточный участок	0,26	0,39	0,0145	4,93
Норильск-II*	0,20	0,50	—	3,63
Горозубовское*	0,23	0,44	0,0150	2,24
Имангдинское	0,35	0,52	—	5,20

* Месторождения госрезерва.



данным одной пробы извлечение никеля из этих руд аналогично вкрапленным рудам месторождения Норильск-1.

Горозубовское месторождение связано с интрузивом горы Зуб-Маркшейдерская, который еще М.Н.Годлевским [5] выделен в самостоятельный тип. Наиболее богатые руды в интрузиве приурочены к восточной, фронтальной, части; по склонению (на запад) с изменением морфологии тела руды становятся беднее.

При существующей конъюнктуре рынка МПП месторождения госрезерва требуют переоценки в качестве собственно платинометаллических объектов. Тогда они, хотя бы частично, могут быть вовлечены в эксплуатацию взамен выбывающих мощностей рудников «Медвежий ручей» и «Заполярный». Под этим же углом зрения необходимо пересмотреть материалы по Имангдинскому месторождению и всему Имангдинскому рудному узлу.

Малосульфидные платинометаллические руды верхнего эндоконтакта рудоносных интрузивов. Резкий скачок мировых цен на МПП в конце 90-х годов XX в. привел к необходимости поиска дополнительных источников платиноидов. Один из таких источников — малосульфидные руды верхних эндоконтактов рудоносных интрузивов. Руды залегают среди такситовых габбро-долеритов и лейкократовых габбро. Минералы МПП ассоции-

руют с бедной вкрапленностью хромита и сульфидов. Мощность рудного горизонта изменяется от долей до 5 м, содержания МПП — от <3 до >20 г/т.

Первые сведения о повышенных содержаниях МПП в верхней части разреза рудоносного интрузива получены в 1948–1952 гг. при разведке месторождения Норильск-1 [4]. Как подчеркивал М.Ф.Смирнов [23], наиболее характерная особенность химического состава сульфидной массы верхнего оруденения — необычно высокое содержание благородных металлов при низком значении Pd/Pt. По этому признаку оруденение ближе всего к «риффу Меренского», отличаясь абсолютным содержанием металлов и более изменчивой мощностью рудной зоны. После открытия уникальных Талнахских месторождений малосульфидный горизонт долго не рассматривался как потенциальный источник МПП. Лишь в 80–90-е годы геологами комбината, НКГРЭ (А.Валетов, В.Кравцов) и ИГЕМ РАН (В.Дистлер, С.Служеникин) был проведен комплекс работ по изучению малосульфидных горизонтов, в том числе минералогии МПП [18], и установлено их сходство с рядом месторождений ЮАР, США и Зимбабве. К настоящему времени геологической службой ГМК «НН» проведен первый этап работ, включая технологию обогащения [27], по оценке малосульфидных руд в поле рудника «Заполярный».

Рис. 1. Схематическая геологическая карта Норильского района, по В.А.Лялюко и др., 1977:

1 — юрско-четвертичные отложения; эффузивные образования нижнего триаса — верхней перми, свиты; 2 — самоедская — порфиоровые базальты, туфы, 3 — кумгинская — гломеропорфиоровые базальты, 4 — мокулаевская и хараелахская — пойкилооситовые, порфиоровые, гломеропорфиоровые базальты, туфы, 5 — моронговская — афировые, порфиоровые базальты, туфы, 6 — ивакинская, сыверминская, гудчихинская, хакачанская, туклонская, надеждинская — трахибазальты, андезитовые базальты, толеитовые, порфиоровые и гломеропорфиоровые базальты, туфы, 7 — гудчихинская — пикритовые базальты; 8 — верхний карбон — верхняя пермь, угленосные отложения; 9 — нижний девон — нижний карбон (курейская — бруская свиты), карбонатные, карбонатно-глинистые (соленосные отложения); 10 — силур — нижний девон (лландовский ярус — зубовская свита), ангидрито-мергелистые, карбонатные отложения; 11 — ордовик, ангидрито-мергелистые, карбонатные и терригенные отложения; 12–13 — граниты и сиенит-порфиры болгохтохского интрузивного комплекса; 14 — недифференцированные интрузивы габбро-долеритов, долеритов, трахидолеритов далдыканского, оганерского, ергалахского, пясинского комплексов; 15 — дифференцированные интрузивы норильского комплекса (выходы на поверхность); 16 — то же, на глубине; 17 — прочие дифференцированные интрузивы; 18 — разрывные нарушения зон глубинных разломов; 19 — прочие разрывные нарушения; 20 — разломы фундамента; 21 — месторождения (а — крупные, б — мелкие) медно-никелевой формации (1 — Норильск-1, 2 — Талнахское, 3 — Октябрьское, 4 — горы Черная, 5 — Норильск-II, 6 — горы Зуб, 7 — Имангдинское); месторождения: 22 — сульфидно-магнетитовой, 23 — медно-молибденовой, 24 — медно-цеолитовой рудных формаций; 25 — трубки взрыва; 26 — площадки, перспективные для поисков и разведки платино-медно-никелевых руд; 1 — Черногорская, 2 — хвостохранилище и пирротинохранилище, 3 — Средневологочанская, 4 — Среднефокинская, 5 — Томулахская, 6 — Восточно-Талнахская, 7 — Олорская, 8 — Тальминская, 9 — Мичандинская; 27 — контуры основных структурных форм; 28 — байкалиды (промежуточный этаж платформ); 29 — чехол древней Сибирской платформы с архейским основанием; 30 — чехол «молодой» Сибирской платформы с байкальским основанием; 31 — чехол Западно-Сибирской плиты; 32 — оси антиклиналей, поперечных к простиранию платформенных структур I порядка; 33 — брахисинклинали; 34 — зоны разломов

Запасы и ресурсы МПГ малосульфидных руд объекта приняты на учет ТКЗ КНР по Таймырскому АО.

Подсчитаны ресурсы МПГ малосульфидных руд Талнахского месторождения. Есть признаки наличия малосульфидного горизонта в рудоносных интрузивах гор Черной и Зуб, Южно-Пясинский, Норильск-II и Имангдинский. Так, в верхах разреза Южно-Пясинского массива (скв. НВ-12) выделен горизонт повышенных содержаний МПГ. При минералогическом изучении руд (институт «Гипроникель») выявлено более 10 минералов Pt и Pd в обычной для малосульфидных руд эксплуатируемых месторождений ассоциации с сульфоарсенидами и арсенидами Ni и Co.

Техногенные месторождения благородных металлов. Своеобразными объектами МСБ цветных и благородных металлов НЭР являются техногенные месторождения [21], образованные продуктами переработки норильско-талнахских руд: хвостами обогащения и пирротиновыми концентратами (см. рис. 1).

Наиболее крупное техногенное месторождение [21] — хвостохранилище 1 Норильской обогатительной фабрики (отвальные хвосты обогащения руд месторождений Норильск-I (78%) и Талнахское). Месторождение сформировано в 1948–1975 гг. Его площадь более 4,1 км², мощность отложений 42–44 м. Содержания полезных компонентов [9]: Pt до 2,1 г/т, Pd 5,8, Rh 0,24, Au 1,4, Cu 0,8, Ni 0,6%.

Пирротинохранилища 1 (1972–1979 гг.) и 2 (1977–1983 гг.) образованы отходами обогащения пирротиновых руд рудников «Комсомольский», «Маяк» и «Октябрьский». Площадь хранилища 1 — 0,4 км², средняя мощность залежи 14 м, запасы сухого концентрата 5,2 млн. т. Площадь хранилища 2 — 1,1 км², мощность залежи 5,5 м, запасы сухого концентрата 6 млн. т [25]. Концентраты содержат до 10 г/т МПГ, 0,3 г/т Au >10 г/т Ag, 1–3% Ni и Cu.

Перспективы использования техногенных месторождений связываются с благородными металлами. Они не требуют дополнительного измельчения, а значительная доля валовых концентраций благородных металлов представлена минеральной формой (в отвальных хвостах >75%), что позволяет использовать существующие технологии обогащения [19, 25].

Испытания проб лежалых хвостов, содержащих 1–1,5 г/т [19] МПГ, на центробежных аппаратах показали возможность извлечения

до 40–50% этих металлов в концентрат, пригодный для металлургической переработки. В 1997–1999 гг. ЗАО «Норд-Экспресс» [22] провело пилотные испытания хвостов с получением гравитационных концентратов благородных и цветных металлов и силикатной песковой фракции; разработано ТЭО рентабельного освоения хвостохранилища 1. Переработка лежалого пирротинового концентрата наиболее эффективна при использовании гравитационно-флотационных схем [19].

Хвосто- и пирротинохранилища являются реальным резервом для расширения сырьевой базы благородных металлов в НЭР. Работы по изучению, оценке и вовлечению в производство этих объектов приняты к реализации.

Таким образом, рудная база НЭР обеспечивает рентабельную работу ЗФ «ГМК «НН» лишь на ближайшие 30 лет, главным образом за счет богатых и «медистых» руд. Потенциальными объектами ее укрепления в пределах горных отводов предприятий могут быть:

вкрапленные руды эксплуатируемых месторождений при условии совершенствования систем добычи, схем обогащения, геолого-технологического картирования и разработки оптимальных вариантов управления качеством сырья;

вкрапленные руды месторождений госрезерва при условии их доразведки на участках, пригодных к открытой добыче;

техногенные месторождения;

малосульфидные руды верхней части разреза интрузивов.

Учитывая высокие темпы отработки запасов массивных руд, кардинальное решение проблемы стабилизации рудной базы НЭР на длительную перспективу возможно лишь за счет открытия новых месторождений с богатыми МПГ-Cu-Ni рудами.

Геологическая модель и главные признаки объекта прогноза и поиска. Успех поисковых работ во многом определяется конкретностью критериев и признаков, позволяющих правильно определить направление поиска или оценить значимость уже выявленного объекта. В последние годы при обобщении и анализе данных геологоразведочных и эксплуатационных работ на месторождениях НЭР была уточнена созданная трудами многих геологов [5–8, 10, 14–16, 23, 24] гипотеза их образования. На базе этой гипотезы разработана модель месторождения МПГ-Cu-Ni руд, которая используется при прогнозной оценке

территории и выборе объектов поисковых работ. Главные положения принятой гипотезы и признаки эталонного объекта заключаются в следующем.

Месторождения МПГ-Cu-Ni руд относятся к ортомагматическим и неразрывно связаны с базит-гипербазитовыми интрузивами. Как показано М.Н.Годлевским [6], они обладают двойственной природой, являясь производными как базальтовой (трапповой), так и ультраосновной магм. Накопление сульфидов Cu, Ni и Fe происходило на стадиях докамерной и внутрикамерной дифференциации рудоносных расплавов пикритовидного состава.

Пикритовые базальты, завершающие ранний цикл контрастно дифференцированной серии эффузивных траппов, приурочены к Норильско-Хараелахскому вулканогенному прогибу (НХР) и очерчивают область развития рудоносных интрузий, вероятно, имея с ними общий глубинный источник. Площадь распространения этих эффузивных образований — геологический эквивалент Норильской металлогенической зоны (см. рис. 1).

Основные структуры, контролирующие размещение дифференцированной серии лав и никеленосных интрузивов в НЭР — это Норильско-Хараелахская и Имангдино-Летнинская (Микчандская, Кета-Ирбинская) зоны глубинных разломов северо-восточного простирания (см. рис. 1). В палеозойских, наиболее контрастно в девонских, отложениях платформенного чехла они выражены кон- и постседиментационными флексурами амплитудой до 500 м, совпадающими с зонами изменения фаций и мощностей отложений (фациальные барьеры) шириной 5–10 км. Зоны разломов осложнены мезозойскими сбросами и взбросо-сдвигами с вертикальной амплитудой до 1000 м. К таким литолого-фациальным барьерам в зонах разломов с сокращенным до 700 м терригенным типом разреза девонских отложений приурочены все рудные узлы НЭР. Никеленосные интрузивы образуют группы — рудные узлы — на участках пересечения зон разломов антиклиналями северо-западного простирания (см. рис. 1).

Рудные узлы — полого восстающие системы веерных рудно-магматических ветвей корытообразного сечения (хонолитов), протягивающихся по восстанию на 10–15 км при ширине 1–2 км и мощности до 200 м. Ветви сходятся к единому подводящему каналу (субвулкану), расположенному в зоне разлома на

участке центриклинального замыкания мульды. В отличие от безрудных трапповых интрузий рудоносные хонолиты как бы замещают вмещающие породы или занимают готовые вулканические каналы, будучи корнями вулканических построек [23]. Они приурочены к «благоприятным литолого-стратиграфическим этажам внедрения»: угленосным песчано-глинистым отложениям среднего карбона-поздней перми, аргиллитам и мергелям с прослоями ангидрита раннего-среднего девона.

Рудные узлы НЭР представляют единую систему различных по степени дифференциации и рудоносности интрузивов нижнеталнахского, круглогорского и норильского типов. Наиболее четко система проявлена в Талнахском рудном узле (рис. 2). Предполагается, что все три составляющие последовательно формировались из общего источника в процессе ликвации, докамерной и внутрикамерной гравитационно-кристаллизационной дифференциации первичного гомогенного расплава (рис. 3).

Интрузивы нижнеталнахского типа (ИНТТ) (I фаза) имеют сложную морфологию (комбинация пластины и хонолита при мощности от первых десятков до 80–100 м) и простое внутреннее строение. Они дифференцированы от безоливиновых до троктолитовых и пикритовых габбро- и норит-долеритов. Иногда в кровле устанавливаются гибридные породы сиенит-диоритового и диоритового облика. Преобладают обогащенные оливином разновидности. Переходы между дифференциатами постепенные. Горизонт такситовых габбро-долеритов — обязательная составляющая рудоносных интрузивов норильского типа (ИНТ) — в ИНТТ отсутствует. Отсутствуют и типичные для ИНТ минералы протокристаллизации — хромит, форстерит и анортит-битовнит. К петрографическим особенностям пикритовых (троктолитовых) габбро-долеритов относятся: присутствие ортопироксена (до 15%), заметное количество биотита (флогопита) и псевдоморфные замещения оливина тальком и серпентином. Минералого-петрографические особенности отчетливо отражаются в валовом составе интрузивов: по сравнению с интрузивами норильского типа ИНТТ характеризуются более высокими содержаниями MgO и K₂O, а также резко (на порядок) пониженным содержанием хрома (0,002–0,007%). Различие между ИНТ и ИНТТ отражается величиной показателя дифференциации хрома K_{Cr} [2] (табл. 3).

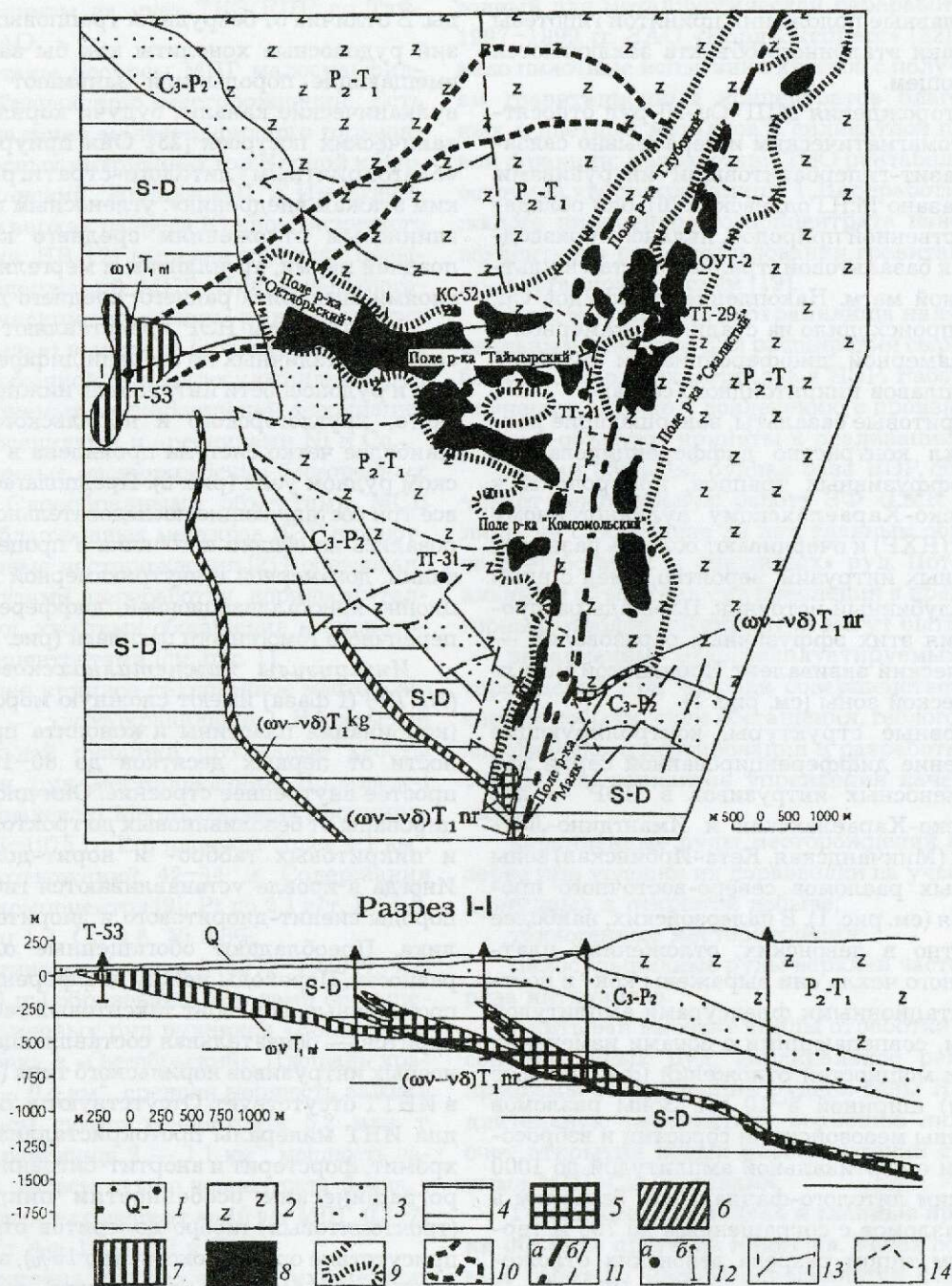


Рис. 2. Геологическая схема Талнахского рудного узла:

1 — валунные суглинки, пески, глины; 2 — туфоловая толща; 3 — аргиллиты, песчаники, угли; 4 — гипсы, ангидриты, мергели, известняки; 5 — дифференцированные интрузивы норильского типа; 6 — оливиновые и оливинсодержащие габбро-долериты и силлы круглогорского типа; 7 — дифференцированные интрузивы нижнеталнахского типа; 8 — установленные площади распространения богатых руд (в плане на глубине); 9 — контуры залегания в плане дифференцированной части Талнахского рудоносного интрузива; 10 — область распространения на глубине Нижнеталнахского интрузива; 11 — разрывные нарушения: «Главный шов» Норильско-Хараелахского разлома (а), прочие разрывные нарушения (б); 12 — буровые скважины: в плане (а), на разрезе (б); 13 — геологические разрезы; 14 — границы полей рудников

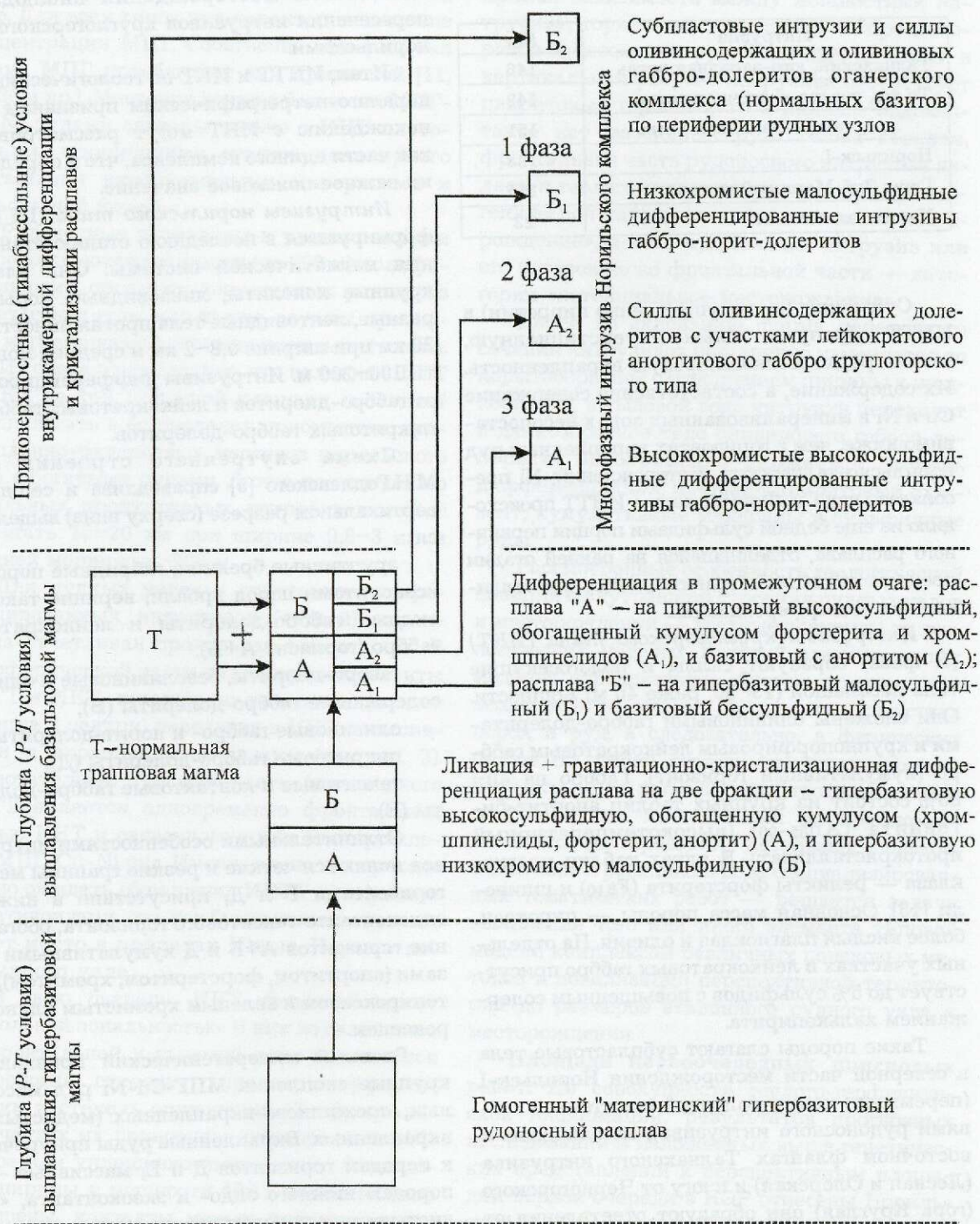


Рис. 3. Схематическая модель формирования никеленосных дифференцированных интрузивов норильского комплекса, по М.Н.Годлевскому с дополнениями и изменениями авторов

3. Показатели дифференциации хрома в некоторых дифференцированных интрузивах НЭР, по [2]

Интрузив	KCr
Талнахский, юго-западная ветвь	146
То же, северо-восточная ветвь	148
» , северо-западная ветвь	151
Норильск-I	183
Горы Зуб-Маркшейдерская	155
Нижнеталнахский	23

Сульфиды (преимущественно пирротин) в ИНТТ образуют только интерстиционную, весьма редко мелкошлировую вкрапленность. Их содержание, а соответственно содержание Cu и Ni в минерализованных зонах несопоставимо ниже, чем в горизонтах вкрапленных руд норильско-талнахских месторождений; Ni преобладает над Cu. Формирование ИНТТ происходило из еще бедной сульфидами порции первичного расплава, отделившейся на ранней стадии процесса ликвации и гравитационно-кристаллизационной дифференциации.

Интрузивы круглогорского типа (ИКТ) (II фаза) образуют силлы и пологосекущие тела небольшой (15–20, реже 40 м) мощности. Они сложены оливиновыми габбро-долеритами и крупнопорфировым лейкократовым габбро (кумулятивный горизонт). Габбро на 40–60% состоит из крупных таблиц анортит-битовнита (An_{85–90}) (высокотемпературный протокристаллизат). В ядрах таблиц плагиоклаза — реликты форстерита (Fa₁₀) и шпинели [13]. Основная масса породы — пироксен, более кислый плагиоклаз и оливин. На отдельных участках в лейкократовых габбро присутствует до 5% сульфидов с повышенным содержанием халькопирита.

Такие породы слагают субпластовые тела в северной части месторождения Норильск-I (перемычки между западной и восточной ветвями рудоносного интрузива); на западном и восточном флангах Талнахского интрузива (Лесная и Олорская) и к югу от Черногорского (гора Круглая) они образуют ответвления от рудоносных хонолитов.

Генетическая общность этих интрузий с рудоносными хонолитами подтверждается локализацией лейкократового габбро в виде автономного горизонта в их прикровельных частях или в виде шпиров среди любых диф-

ференциатов, вплоть до пикритовых габбро-долеритов (месторождение Норильск-II). На Талнахском месторождении наблюдались пересечения интрузивов круглогорского типа норильскими.

Итак, ИНТТ и ИКТ по геологическим, минералого-петрографическим признакам и соотношению с ИНТ могут рассматриваться как части единого комплекса, что и определяет их важное поисковое значение.

Интрузивы норильского типа (III фаза) формируются в последнюю стадию становления магматической системы. Они слагают крупные хонолиты, линзовидные, корытообразные, лентовидные тела протяженностью до 20 км при ширине 0,8–2 км и средней мощности 100–200 м. Интрузивы дифференцированы от габбро-диоритов и лейкократовых габбро до пикритовых габбро-долеритов.

Схема внутреннего строения ИНТ М.Н.Годлевского [5] справедлива и сегодня: в вертикальном разрезе (сверху вниз) выделяются:

эруптивные брекчии, гибридные породы с ксенолитами пород кровли, верхние такситовидные габбро-долериты и лейкократовые габбро (горизонт А+Б);

габбро-диориты, безоливиновые и оливинсодержащие габбро-долериты (В);

оливиновые габбро- и норит-долериты (Г);

пикритовые габбро-долериты (Д);

такситовые и контактовые габбро-долериты (Е).

Отличительными особенностями интрузивов являются четкие и резкие границы между горизонтами Г и Д, присутствие в нижнем эндоконтакте такситового горизонта, обогащение горизонтов А+Б и Д кумулятивными фазами (анортитом, форстеритом, хромитом), ортопироксеном и зеленым хромистым клинопироксеном.

Главный минерагенический признак — крупные скопления МПГ-Cu-Ni руд массивных, прожилково-вкрапленных (медистых) и вкрапленных. Вкрапленные руды приурочены к породам горизонтов Д и Е, массивные — к породам нижнего эндо- и экзоконтакта, «медистые» — к породам экзоконтактов интрузива и залежей массивных руд. В горизонте А+Б обычно развит маломощный горизонт мало-сульфидных руд с МПГ.

В рудах установлено более 100 минералов, главные из которых — пирротин, халькопирит, пентландит, часто кубанит, второстепен-

ные — миллерит, валлериит (в некоторых разновидностях преобладают), маккинавит, пирит, арсениды и сульфоарсениды Ni, Co, Cu и Fe. Для всех типов руд характерны высокие концентрации МПГ. Собственно минеральная форма МПГ преобладает над примесной [11, 20, 26 и др.]. Месторождения с богатыми МПГ-Cu-Ni рудами связаны только с ИНТ-плутонитами, прошедшими стадию докамерного обогащения кумулятивными минералами и сульфидной фазой.

Рудоносные интрузивы и рудные залежи сопровождаются мощными (до 200 м) полифациальными ореолами контактовых роговиков и метасоматитов, что также служит признаком магматической системы норильского типа.

Из сказанного следует, что наличие ИНТТ и ИКТ на той или иной площади позволяет предполагать в ее пределах присутствие промышленно-рудноносных массивов норильского типа с богатыми рудами. Длина по склонению отдельных продуктивных интрузивов может достигать 15–20 км при ширине 0,8–3 км и средней мощности ~200 м.

Для рудных узлов и отдельных дифференцированных интрузивов (ветвей) характерна отчетливая продольная зональность. В периферической части рудных узлов развиты ИНТТ и ИКТ, которые по склонению (или от флангов к центру) переходят в ИНТ с массивными и вкрапленными рудами (см. рис. 3). Следовательно, тыловая часть лентовидного ИНТТ является одновременно фронтальной частью ИНТ и связанного с ним месторождения МПГ-Cu-Ni руд. Именно в зоне их перехода можно ожидать обогащения ИНТТ сульфидами и платиноидами, что, как будет показано ниже, имеет место в пределах Южно-Норильского рудного узла.

В свою очередь, ИНТ также обладают продольной зональностью. В них по склонению от фронтальной к тыловой зоне изменяются морфология, строение, характер дифференциации и степень оруденения. Во фронтальных частях их поперечное сечение пластообразное или уплощенно-линзовидное (отношение ширины к мощности 40:1); они отчетливо расслоены, контакты между пикритовыми и вышележащими породами резкие. В этих частях обильны протокристаллизационные кумулаты и наиболее мощны горизонты густо-вкрапленных и массивных руд, что свидетельствует о завершенности процессов ликвации и докамерной дифференциации с разделением

ультраосновных и лейкократовых кумулатов и сульфидного расплава. Устанавливается прямая зависимость между мощностями интрузива, горизонта пикритовых габбро-долеритов и массивных руд. Замечено, что если в вертикальном разрезе интрузива отсутствует пикритовый горизонт, то в нижнем эндоконтакте нет массивных руд. Таким образом, фронтальная часть рудоносного интрузива является геологическим эквивалентом металлогенической категории «промышленное месторождение», а весь рудоносный интрузив или его отрезок не во фронтальной части — категории «потенциальное месторождение».

Далее по склонению форма поперечного сечения интрузивов постепенно изменяется до корытообразной с отношением ширины к мощности 7:1, в тыловой зоне интрузив переходит в дайкообразное тело оливинового габбро-долерита; одновременно снижается степень дифференциации, исчезают пикритовый горизонт, кумулятивные минералы и сульфидные руды.

Рассмотренные особенности геологической позиции и внутреннего строения рудных узлов и месторождений — главные элементы их геологических моделей. Каждый элемент в этих моделях определенным образом отражается в вещественном составе, физических свойствах пород и руд, а следовательно, в физических полях. На любой стадии геологоразведочного процесса — от региональных геологических и геофизических исследований до крупномасштабного картирования, детальных поисков, оценочных и различного рода специализированных тематических работ — решается задача выявления того или иного элемента типовой модели комплексом различных поисковых методов и локализации перспективной территории до размеров эталонного рудного узла и месторождения.

Площади первоочередных поисковых работ. По совокупности геолого-геофизической информации, результатов прогнозных исследований и изложенных выше генетических представлений к перспективным площадям первой очереди в НЭР отнесены Норильский и Талнахский (Хараелахский) рудные районы, в которых сосредоточены все апробированные и утвержденные МПР России прогнозные ресурсы Cu и Ni Таймырского АО.

Норильский рудный район (НРР) выделяется в границах структур южной части позд-непермско-раннетриасового Норильско-Хара-

елахского вулканогенного прогиба от оз. Пясино на севере до р. Хантайки на юге. В пределах НРР установлено три рудных узла — Норильский, Вологодчанский и Южно-Норильский.

Норильский рудный узел (НРУ) с месторождениями Норильск-I, Норильск-II и Черногорское охарактеризован выше. До 2005 г. в пределах НРУ предусмотрено доизучение вкрапленных руд основного и малосульфидного верхнего горизонтов месторождений Норильск-I и Черногорское. Планируются исследования для уточнения оценки месторождения Норильск-II, а также дальнейшее изучение строения и технологических свойств сырья техногенных месторождений в черте г. Норильска.

Вологодчанский рудный узел (ВРУ) — система структурно связанных дифференцированных никеленосных интрузивов преимущественно зубовского типа (ИЗТ) (Южно-Пясинский, Вологодчанский, горы Зуб-Маркшейдерская — Горозубовское месторождение госрезерва — и др.), имеющих единый глубинный источник, расположенный в юго-восточной части Вологодчанской мульды (см. рис. 1). К этой системе, по-видимому, относятся дифференцированный Верхнебыстринский интрузив и ряд тел ИНТТ, вскрытых бурением на юго-востоке Вологодчанской мульды в районе Кайерканской антиклинали.

Все интрузивы ВРУ в плане представляют собой лентовидные корытообразные тела шириной 1–4 км; залегают преимущественно в отложениях курейской и разведочнинской свит нижнего девона. Интрузивы полого, согласно с падением восточного борта мульды, погружаются на запад к ее центру. Бурением прослежены по склонению на 15–18 км до глубины 1500–1600 м. Мощность интрузивов 100–200 м. От интрузива Норильск-I их отличают менее четкая дифференциация, невыдержанность пикритового и такситового горизонтов, повышенное содержание плагиоклаза в пикритовых габбро-долеритах, более высокое содержание TiO_2 как в отдельных дифференциатах, так и по интрузиву в целом. В кровле интрузивов часто развиты гибридные гранодиориты и граносиениты; обычны верхние такситовые габбро-долериты, типичные для ИНТ. В придонной части интрузивов распространены вкрапленные руды, редко — массивные. Горизонты малосульфидного оруденения проявлены плохо и слабо изучены.

В последнее время детально исследовано

строение и минералого-технологические свойства вкрапленных руд Южно-Пясинского интрузива (рис. 4). Горизонт, обогащенный оливином, сложен чередованием троктолитовых и пикритовых габбро- и норит-долеритов, в нижнем эндоконтакте развиты такситовые разности с протокристаллами оливина и хромита.

Бурением на Южно-Пясинском интрузиве установлено [1], что в западном направлении от скв. АС-1, 3 и 6 к скв. НВ-12 и 13 усиливается дифференциация интрузива и возрастает до 42 м мощность вкрапленных руд; содержания полезных компонентов достигают — 0,55% Ni, 1,02% Cu, 7,8 г/т Pt+Pd. Мощность балансовых руд (по кондициям месторождения Норильск-I) по скв. НВ-12 составила 11,2 м (0,34% Ni, 0,57% Cu), а по скв. НВ-13 — 15,8 м (0,32% Ni, 0,62% Cu).

Во вкрапленных рудах нижней части интрузива (скв. НВ-12) выявлено 15 минералов МПГ. В этой же скважине МПГ-минерализация, ассоциирующая с убогой вкрапленностью халькопирит-пирит-пентландитового ($\pm$ миллерит) состава с примесью сульфоарсенидов и арсенидов Ni, Co и Fe, обнаружена и в породах верхнего эндоконтакта интрузива. Найдено девять минералов Pd, Pt, Rh, Au и выявлена примесная форма Pd (в герсдорфите, никелине и кобальтине). Данные о наличии минералов МПГ в основном и малосульфидном горизонтах служат важным критерием перспективности на МПГ-Cu-Ni руды как самого Южно-Пясинского интрузива, так и других интрузивных тел Вологодчанской площади.

Такие же особенности изменения состава и характера распределения руд установлены для Вологодчанского интрузива. По скв. НВ-9 при мощности интрузива 91,2 м мощность вкрапленных руд составляет 23,4 м, в том числе кондиционных — 13,1 м (0,33% Ni, 0,63% Cu).

Прогнозные ресурсы Ni и Cu до глубины 2 км по Южно-Пясинскому и Вологодчанскому интрузивам, апробированные геологической секцией НТС ЗФ ОАО «ГМК «НН», сопоставимы с Норильско-Харалахской металлогенической зоной.

Для прослеживания и оценки глубоких горизонтов этих интрузивов предусмотрены соответствующие работы. В южном борту Вологодчанской мульды, где вскрыты ИНТТ и ИЗТ (ИНТ?), выделены гидрогеохимические и геофизические аномалии предположительно рудной природы. Для их опосредованного целе-

нения по соотношению Ni/Cu и относительной обогащенности халькопиритом и кубанитом близок к вкрапленным рудам ИНТ. Это позволяет предполагать существование в этом районе зоны перехода ИНТТ в ИНТ.

С ИКТ (гора Буркан, скв. Ф-40, 32, 38, 18 и др.) связано вкрапленное оруденение, близкое по составу к рудам норильского типа. В скв. Ф-38 (интервал 126,2–126,5 м) содержание Ni составляет 0,59% при 0,76% Cu, а в оливиновых габбро-долеритах устья р. Серебряная — 0,1–0,4% Ni, 0,32–0,84% Cu и 0,55–1,6 г/т МПГ.

К краевой части ИНТ отнесено маломощное (23 м) пересечение (скв. Ф-230) слабодифференцированных пород (кварц-оливинсодержащие, оливиновые и таситовые габбро-долериты) среди нижне-среднедевонских отложений. В таситовых габбро-долеритах найдены хромшпинель-оливиновые обособления, обычные для подобных пород рудоносных интрузивов. С таситовыми разностями связан горизонт мощностью 2–4 м с вкрапленным сульфидным оруденением, содержащим до 0,21% Ni, от 0,18 до 0,65% Cu и 0,84 г/т МПГ. На перспективы предполагаемого продолжения интрузива ука-

зывает широкий (14 видов) спектр минералов МПГ и примесь Pd в кубаните и маухерите.

К числу признаков перспективности ЮНРУ следует отнести скопления рудных валунов, обнаруженных в 2000 г. на Среднефокинской площади. Установлено (институт «Гипрони-кель»), что валуны представлены таситовыми габбро-долеритами с обособлениями протокристаллизационных минералов, а сульфидное вкрапленное оруденение сходно с таковым ИНТ и содержит 15 минералов МПГ.

Анализ и сопоставление с моделью материала, полученного в пределах ЮНРУ, позволили выделить перспективную Среднефокинскую площадь (см. рис. 1), где на глубинах до 1500 м весьма вероятно выявление ИНТ с богатыми рудами. В северном направлении (скв. Ф-237) ИНТТ обогащается медью. Данная тенденция косвенно указывает на возможность перехода в этом районе ее тыловой части во фронтальную зону ИНТ (рис. 5).

Таким образом, весь комплекс рассмотренных признаков подтверждает высокие перспективы юга Норильского плато и необходимость целенаправленных буровых поисков

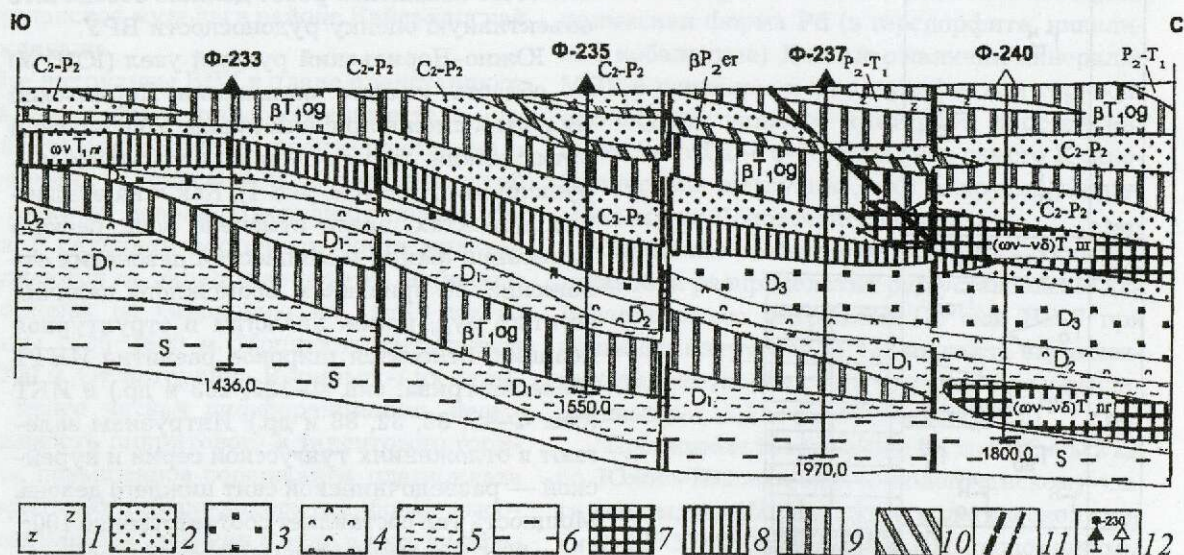


Рис. 5. Разрез рудоносных интрузивов Южно-Норильского рудного узла:

1 — вулканогенные образования верхней перми-нижнего триаса; 2 — углито-терригенные отложения (тунгусская серия); мергели, доломиты, известняки, ангидриты; 3 — верхне-, 4 — средне-, 5 — нижнедевонские; 6 — доломиты, известняки, мергели силура; 7 — дифференцированные интрузивы норильского комплекса; 8 — норильский; 9 — недифференцированные интрузивы оганерского комплекса; 10 — титан-авгитовые долериты и трахидолериты ергалахского комплекса; 11 — разрывные нарушения; 12 — пробуренные и проектные поисковые скважины

в контуре предполагаемого рудоносного интрузива на Среднефокинской площади.

Хараелахский рудный район (ХРР) включает Хараелахскую и Иконскую (Мастах-Салинскую) мульды (см. рис. 1). На юге ХРР ограничен Южно-Пясинской антиклиналью, на севере — Кыстыхтахой. С юго-запада на северо-восток его пересекает НХР, который выражен сбросами, флексурой и зоной изменения фаций и мощностей девонских отложений. В юго-западном замыкании мульды, одновременно являющимся северо-восточным крылом Южно-Пясинской антиклинали, на участке пересечения их зоной НХР расположен уникальный Талнахский рудный узел (ТалиРУ). На северо-восточном замыкании Хараелахской мульды, где она отделяется от Иконской мульды Тальминской антиклиналью, в зоне НХР, пересекающей здесь эти структуры, расположен Тальминский рудный узел (ТальРУ).

Прогнозные ресурсы по ХРР, утвержденные МПР РФ, не привязаны к конкретным рудным узлам. Предполагается, что в обоих рудных узлах глубины локализации ресурсов 1300–2500 м.

Талнахский рудный узел включает Талнахское и Октябрьское месторождения, связанные с Северо-Восточной, Северо-Западной и Хараелахской ветвями Талнахского интрузива. В 60–80-х годах месторождения детально разведаны. Фланги ТалиРУ опробованы редкой сетью скважин до глубины 2–3 км. По данным поискового бурения наибольшие перспективы выявления новых залежей богатых руд связываются с восточными флангами узла (Восточно-Талнахская и Олорская площади). Здесь предполагается наличие новых ветвей Талнахского интрузива, залегающих в отложениях тунгусской серии или нижнего девона на глубинах 1300–2500 м. На западных и северных флангах рудные объекты ожидаются на глубине более 3 км. Исключение составляет лишь Томулахская площадь.

О возможном нахождении на Восточно-Талнахской площади ИНТ свидетельствует присутствие дифференцированных ИКТ (скв. ВТ-2, 4, 6 и 11). Интрузивы мощностью 20–60 м залегают в отложениях тунгусской серии; дифференцированы от оливиновых до безоливиновых габбро-долеритов и лейкократового габбро. В оливиновых габбро-долеритах нижней части интрузивов и роговиках нижнего экзоконтакта выявлены горизонты вкрапленных и прожил-

ково-вкрапленных руд, мощностью до 9 м. В отдельных пересечениях содержания $\text{Cu} > 2\%$, $\text{Ni} \sim 1,5\%$, $\text{МПП} > 3$ г/т. Интрузивы не оконтурены. По аналогии с НРУ, где в восточном крыле НХР локализованы месторождения Черногорское и Норильск-II, есть основания ожидать подобные им в связи с Восточно-Талнахской интрузивной ветвью. По косвенным данным можно предполагать восточное направление простирания (удлинения) прогнозируемой интрузивной ветви (аналогия с Хараелахской и Талнахской ветвями Талнахского интрузива, ориентировка гидросети и даек долеритов далдыканского комплекса). Возможный горизонт локализации прогнозируемой ветви — отложения тунгусской серии. По имеющимся материалам невозможно установить, на каком конкретном участке интрузивная пластина, фиксируемая скв. ВТ-2, 4, 6, 11, перейдет в хонолит. Оптимальным способом решения этого вопроса может быть проведение на данной площади электроразведочных работ АМТЗ с последующим бурением скважин по сети, исключающей пропуск ожидаемого хонолита.

К северу от линии устье р. Скалистая — скв. ВХ-7 (Олорская площадь) меняется горизонт локализации ответвлений ИКТ и Нижне-талнахского. Последний на этом участке переходит из девона в отложения тунгусской серии, залегая, таким образом, стратиграфически и гипсометрически выше Верхнеталнахского. Интрузивная пластина Олорского ИКТ вскрывается скв. ВХ-7, 4, 5, ОП-5, 7 и др. в отложениях зубовской свиты на глубинах 2000–2500 м. Имея мощность около 20 м, интрузив нацело сложен оливиновыми, реже — такситовыми габбро-долеритами с лейкогаббро. К низам интрузива приурочен горизонт вкрапленных руд мощностью 0,9–3,8 м при содержаниях $\text{Ni} 0,2\text{--}0,9\%$, $\text{Cu} 0,5\text{--}2,7\%$. Руды в отдельных скважинах на Олорской площади богаче, чем на Восточно-Талнахской, но глубины залегания рудных тел (~2500 м) предельны для поисков даже богатых руд.

Однако, учитывая прямые поисковые признаки, есть все основания прогнозировать в бассейне рек Олор-Скалистая новую ветвь рудоносного интрузива с богатыми рудами во фронтальной (восточной) части. Положение ветви в плане, как и предполагаемого хонолита на Восточно-Талнахской площади, определить трудно. О ее местоположении можно судить по косвенным признакам: структурная ступень в районе р. Скалистая, где силл ИКТ переходит

из одного горизонта локализации в другой; восточное простираие северного продолжения Нижнеталнахского интрузива вдоль р. Олор; предполагаемое положение тыловой зоны Талнахского интрузива между устьями рек Скалистая и Олор.

Здесь целесообразно предусмотреть опережающие работы методами МОГТ и АМТЗ и последующее поисковое бурение на восточных флангах ТалнРУ (Восточно-Талнахская и Олорская площади) с целью поиска в отложениях тунгусской серии и нижнего девона на глубинах 1300–2500 м новых рудоносных ветвей (хонолитов) ИНТ с богатыми рудами.

Томулахская площадь расположена на северо-западном фланге ТалнРУ (верховья р. Томулах). Это субмеридиональная зона метасоматитов, сходных с метасоматитами Октябрьского месторождения. Длина зоны 1700 м при ширине 750 м и мощности более 300 м. Вмещает маломощные ($n \sim 10$ м) интрузивы с убогой вкрапленностью сульфидов. Источником метасоматизирующих агентов может быть рудоносный интрузив, подобный Хараелахскому, апофизы которого фиксируются среди метасоматитов. Результаты ММЗ позволяют прогнозировать рудный объект на глубинах до 2500 м. Один из вариантов модельных построений предполагает положение корневой части ветви Талнахского интрузива в верховьях руч. Каменистый, фронтальной — в верховьях руч. Томулах.

Тальминский рудный узел находится на севере Хараелахского плато; приурочен к Тальминской антиклинали и бортам смежных с ней Хараелахской и Иконской мульд на участке пересечения с НХР (см. рис. 1). Тальминская антиклиналь — симметричная складка с северо-западной ориентировкой оси, углы падения крыльев не превышают 3° . Крылья антиклинали осложнены разрывами северо-западного простираия (наиболее крупный — Кумгинский разлом). В пределах рудного узла из района Талнаха трассируются разрывные нарушения и предтунгусская флексурная зона НХР. На выходе рек Тальми и Кумга в Енисей-Хатангский прогиб бурением вскрыты Тальминский интрузив (ИЗТ?), Клюквенный (ИНТТ) и ряд маломощных пластовых ИКТ с горизонтами вкрапленных руд мощностью 0,1–1,4 м (Ni 0,34–1,08%, Cu 0,54–2,17%). Интрузив Клюквенный залегает в отложениях тунгусской серии, Тальминский

и маломощные ИКТ — в отложениях тунгусской серии и девона.

Таким образом, на территории ТальРУ проявлены все элементы типовой модели рудного объекта норильского типа. Анализ материалов проведенных здесь ГСР-50 с глубинным геологическим картированием позволяет прогнозировать на Кумгинском участке в нижне-среднедевонских отложениях (глубины 1500–2000 м) рудоносный ИНТ с богатыми рудами. Рекомендуются проведение электро-разведочных работ АМТЗ с последующим бурением. В настоящее время на Северо-Хараелахской площади, примыкающей к ТальРУ с запада, ведутся ГСР-50 с общими поисками, а на восточном крыле Хараелахской мульды — комплексные геофизические работы и ГСР-50 с геологическим картированием.

Выводы. Приведенные материалы позволяют оценить состояние минерально-сырьевой базы Норильского геолого-экономического района.

1. Предпочтительная отработка залежей богатых руд привела к изменению структуры запасов и ухудшению их качества.

2. Восполнение запасов может быть обеспечено, во-первых, путем вовлечения в производство месторождений госрезерва, техногенных месторождений и горизонтов малосульфидных руд с МПГ, во-вторых, поисков новых месторождений богатых МПГ-Cu-Ni руд.

3. При выборе объектов поисков может использоваться модель рудного узла и месторождения норильско-талнахского типа, разработанная на базе идей М.Н. Годлевского.

4. Анализ геологических материалов по НЭР с позиций этой модели позволяет выделить ряд перспективных участков для первоочередных поисковых работ: Восточно-Талнахскую, Олорскую и Томулахскую площади флангов ТалнРУ; Вологочанский и Южно-Пясинский интрузивы и Южно-Вологочанскую площадь ВРУ; Среднефокинскую площадь ЮНРУ; целиком ТальРУ. На всех перечисленных площадях выявлены признаки существования на доступных для отработки глубинах продуктивных рудоносных интрузивов с богатыми МПГ-Cu-Ni рудами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амосов Ю.Н., Вилинский С.А., Матвеев И.А. О поисковых работах на медь и никель на юге Норильской и востоке Вологочанской мульды

- // Направление геологоразведочных работ на никель, медь и платиноиды в Таймырском автономном округе в 2000–2005 гг.: Тез. докл. Норильск, 1999. С. 42–44.
2. *Архипова А.И., Наторхин И.А.* Некоторые черты геохимии Талнахских дифференцированных интрузий // Петрология и рудоносность Талнахских и Норильских дифференцированных интрузий. Л., 1971 (Тр. НИИГА, т. 167).
 3. *Валетов А.В., Бадтиев Б.П., Рябикин В.А., Олешкевич О.И.* Современное состояние минерально-сырьевой базы ОАО «Норильская горная компания» // Цветные металлы. 2000. № 6. С. 10–14.
 4. *Годлевский М.Н.* К геохимии благородных металлов в месторождении Норильск-I // Бюл. технической информации. Норильск, 1958. С. 69–70.
 5. *Годлевский М.Н.* Траппы и рудоносные интрузии Норильского района. – М.: Госгеолтехиздат, 1959.
 6. *Годлевский М.Н.* Источники оруденения, связанного с траппами Сибирской платформы // Тр. НИИГА. 1967. Т. 151. С. 173–188.
 7. *Годлевский М.Н.* Соотношение сульфидной и силикатной частей в ходе эволюции основной магмы // 1-й Международный геохимический конгресс: Тез. докл. 1971. Т. 1. С. 65–77.
 8. *Годлевский М.Н., Лихачев А.П.* Условия зарождения и кристаллизации рудоносных магм, формирующих медно-никелевые месторождения // Основные параметры процессов эндогенного рудообразования. Новосибирск, 1979. Т. 1. С. 109–118.
 9. *Додин Д.А., Додина Т.С.* Сульфидные платиноидно-медно-никелевые месторождения Норильского промышленного района — главный объект платинодобывающей отрасли России второй половины XX в. и первой четверти XXI в. // Платина России. М., 1999. Т. III. Кн. 1.
 10. *Иванкин П.Ф., Люлько В.А., Ремпель Г.Г.* Морфогенетические особенности рудных полей Норильского района // ДАН СССР. 1971. Т. 199. № 3.
 11. *Комарова М.З., Козырев С.М., Люлько В.А., Вилинский С.А.* Благороднометалльная минерализация вкрапленных руд Норильского рудного узла // Недра Таймыра. Норильск, 2000. Вып. 4. С. 122–136.
 12. *Кунилов В.Е., Рябикин В.А., Люлько В.А., Каргинов К.Г.* Минерально-сырьевая база РАО «Норильский никель» // Цветные металлы. 1996. С. 35–38.
 13. *Лихачев А.П.* Роль лейкократового габбро в формировании Норильских дифференцированных интрузий // Изв. АН СССР, сер. геол. 1965. № 10.
 14. *Лихачев А.П.* Об условиях образования рудоносных и безрудных магм базальт-гипербазитового состава // ДАН СССР. 1978. Т. 238. № 2.
 15. *Лихачев А.П.* Трапповый магматизм и платино-медно-никелевое рудообразование в Норильском районе // Отечественная геология. 1997. № 10.
 16. *Лихачев А.П.* Структура распределения и условия накопления металлов платиновой группы и других рудных компонентов в Талнахских интрузиях // Платина России. М., 1999. Т. IV. С. 86–100.
 17. *Люлько В.А.* Принципы прогнозной оценки территории Норильского района на богатые медно-никелевые руды и направление первоочередных поисковых работ // Направление геологоразведочных работ на никель, медь и платиноиды в Таймырском автономном округе в 2000–2005 гг.: Тез. докл. Норильск, 1999. С. 35–36.
 18. *Малосульфидное платиновое оруденение в норильских дифференцированных интрузивах / С.Ф.Служеникин, В.В.Дистлер, О.А.Дюжиков и др.* // Геология рудных месторождений. 1994. Т. 36. № 3. С. 195–217.
 19. *Олешкевич О.И., Стехин А.И., Благодатин Ю.В.* Закономерности строения, состава и перспективы освоения техногенных месторождений в Норильском районе // Направление геологоразведочных работ на никель, медь и платиноиды в Таймырском автономном округе в 2000–2005 гг.: Тез. докл. Норильск, 1999.
 20. *Платиновые руды норильских расслоенных интрузивов: соотношение магматического и флюидного концентрирования благородных металлов / В.В.Дистлер, С.Ф.Служеникин, Л.Дж.Кабри и др.* // ГРМ. 1999. Т. 41. № 3. С. 241–265.
 21. *Самойлов Ю.А., Симонов О.Н., Афанасенков А.П., Сидоров И.И.* Перспективы освоения минерально-сырьевых ресурсов Таймырского автономного округа // Недра Таймыра. Норильск, 1997. Вып. 2. С. 141–159.
 22. *Сибиль Ю.А., Лазуренко В.И.* Вовлечение в промышленную переработку хвостотвалов Норильской обогатительной фабрики // Направление геологоразведочных работ на никель, медь и платиноиды в Таймырском автономном округе в 2000–2005 гг.: Тез. докл. Норильск, 1999.
 23. *Смирнов М.Ф.* Строение норильских никеленосных интрузий и их сульфидные руды. – М.: Недра, 1966.
 24. *Степанов В.К.* Динамическая модель внедрения, кристаллизации и рудоотложения рудо-

- носных интрузий Норильска // Тр. ЦНИГРИ. 1981. Вып. 162. 1981. С. 13–19.
25. *Стежин А.И., Кунилов В.Е., Олешкевич О.И.* Техногенные месторождения благородных и цветных металлов в Норильском районе // Недра Таймыра. Норильск, 1995. Вып. 1.
26. *Сульфидные медно-никелевые руды Нориль-*
- ских месторождений / А.Д.Генкин, В.В.Дистлер, Г.Д.Гладышев и др. – М.: Наука, 1981.*
27. *Яценко А.А., Галанцева Т.В., Захаров Б.А.* Разработка технологии обогащения нового вида платиносодержащего сырья — малосульфидных руд // Цветные металлы. 2000. № 6. С. 25–26.

УДК 552.11:552.32:553.491:549.2 (470.32)

© Н.М.Чернышов, С.П.Молотков, В.В.Буковшин, 2002

РАЗВИТИЕ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ ЦВЕТНЫХ И БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЗОНЫ РОССИИ В СВЕТЕ ИДЕЙ М.Н.ГОДЛЕВСКОГО

Н.М.Чернышов, С.П.Молотков, В.В.Буковшин (Воронежский государственный университет)

Рассмотрены перспективы Воронежского кристаллического массива (ВКМ) в наращивании минерально-сырьевой базы цветных и благородных металлов, в исследования которой важный вклад внесен М.Н.Годлевским. Охарактеризованы главнейшие типы платиноидно-медно-никелевого и золото-платинометалльного оруденения, ассоциирующего с докембрийскими мафит-ультрамафитовыми магматитами. Освещены также перспективы малосульфидного платинометалльного оруденения в крупных расслоенных плутонах мамонского и новогольского комплексов, приведены данные по новому нетрадиционному источнику золото-платинометалльного оруденения в черносланцевых формациях региона.

Геолого-геофизическими и научно-исследовательскими работами второй половины 20-го столетия в центральной части Восточно-Европейской платформы выделена Воронежская металлогеническая провинция [4], в пределах которой сосредоточены многочисленные месторождения и рудопроявления платиноидно-медно-никелевых и благороднометалльных (ЭПГ и Au) руд, ассоциирующих с ультрамафит-мафитовыми комплексами, высокоуглеродистыми вулканогенно-осадочными образованиями, а также с железистыми кварцитами докембрийского фундамента ВКМ (рис. 1). По запасам и ресурсам цветных (Cu, Ni, Co) и благородных металлов (ЭПГ, Au) в обнаруженных месторождениях, рудопроявлениях и потенциально рудоносных объектах этот регион является одним из ведущих в наращивании минерально-сырьевого потенциала России и обеспечении ее устойчивого социально-экономического развития в XXI в.

Одним из первых, кто обратил самое серьезное внимание на перспективность данной

территории, необходимость ее планомерного и целенаправленного геологического изучения и возможность выявления в ее пределах широкого комплекса полезных ископаемых и, в первую очередь, сульфидных медно-никелевых руд был доктор геолого-минералогических наук, профессор Михаил Николаевич Годлевский, являвшийся в то время куратором Министерства геологии СССР по цветным металлам. Высказанные этим выдающимся ученым фундаментальные положения-предпосылки, прогнозные оценки и планы по направлению изучения докембрия ВКМ, реализованные в дальнейшем его соратниками и учениками, привели к выявлению ряда месторождений и рудопроявлений медно-никелевых руд.

Первое полевое знакомство М.Н.Годлевского с геологией и геологами Воронежского региона состоялось летом 1961 г. Это событие отразилось в его архивном документе «Краткая информация о командировке в Воронежскую и Липецкую области в связи с постановкой поисковых работ на никелевые руды» (1962 г.): «...Пентлан-

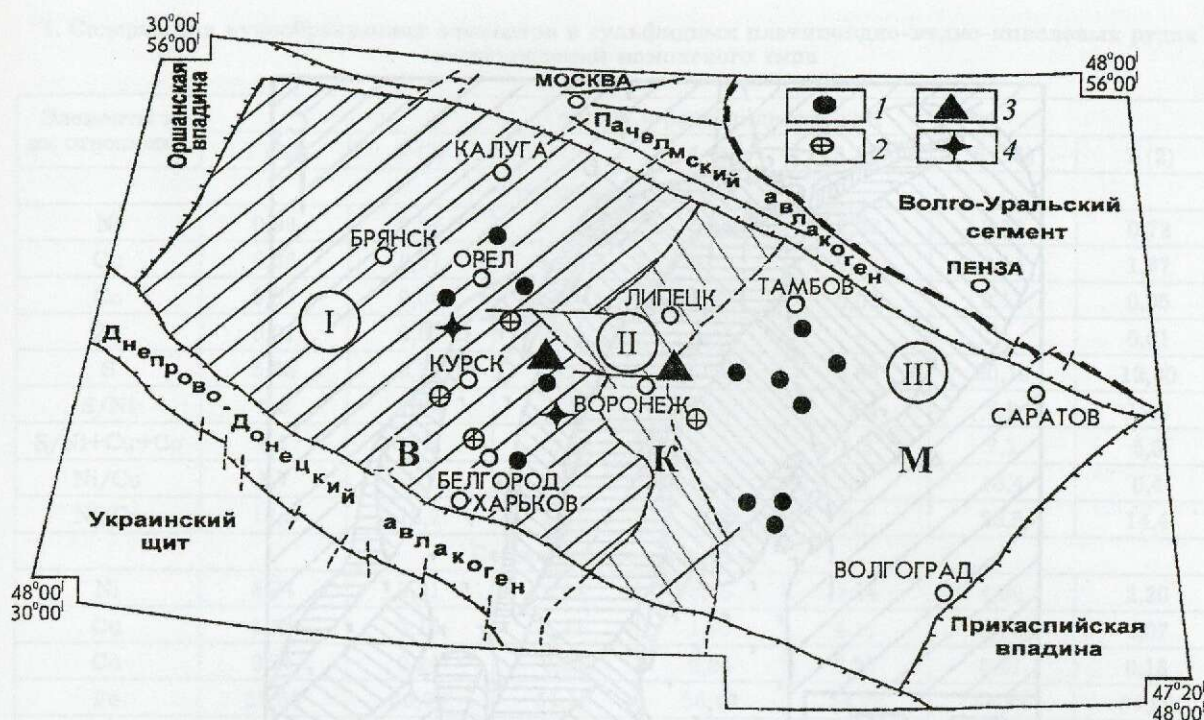


Рис. 1. Размещение месторождений, проявлений и потенциально рудоносных объектов на благородные (платиноиды и золото) и цветные металлы в докембрийском фундаменте Воронежского кристаллического массива (в рамках ЦЧР):

I — геоблок КМА; II — Лосевская шовная зона; III — Хоперский геоблок; 1 — магматогенные сульфидные платиноидно-медно-никелевые, малосульфидные платинометалльные и платиносодержащие титаномангнетитовые месторождения, проявления и потенциально рудоносные объекты; 2 — полигенные золоторудные и золото-платинометалльные месторождения и проявления в углеродистых стратифицированных толщах докембрия и метасоматитах; 3 — экзогенные (литифицированные россыпные) золото- и золото-платинометалльные проявления; 4 — золото-палладийсодержащие железорудные месторождения и их техногенные продукты (хвостоотвалы) с благородными металлами

дит в перидотитовых массивах Воронежского района был определен нами в процессе обработки летних сборов 1961 года. Тогда же была найдена в них платина. Эти находки значительно повышают интерес к перидотитовым массивам Воронежского района и заставляют форсировать там поисковые работы на никель».

М.Н.Годлевский впервые указал, после практического определения в минерализованных породах основного никелевого минерала — пентландита, на возможность значительных концентраций цветных (Ni, Co, Cu) и благородных (ЭПГ, Au) металлов в ультрамафитовых интрузивах мамонского комплекса дунит-перидотит-габбро-норитовой формации ВКМ. Планомерные геолого-геофизические исследования, поисково-разведочные работы и минералого-петрографическое изучение этой группы рудоносных магматитов привели к открытию трех месторождений

(Нижнемамонского, Подколдновского, Юбилейного) и более 20 разномасштабных рудопроявлений, которые располагаются преимущественно на юге Воронежской области.

Мамонский тип месторождений. В пределах месторождений и рудопроявлений данного типа, залегающих на глубине 40–150 м от дневной поверхности под осадочными отложениями фанерозоя, выявлено несколько крутопадающих различных по мощности (от 1–2 до 40–85 м) и протяженности (150–2200 м) зон платиноидно-медно-никелевого оруденения, целиком находящихся в ультрамафитах различных частей дифференцированных интрузивов и наследующих элементы их внутреннего строения (рис. 2).

Количественно в составе рудных тел преобладают, %: бедные вкрапленные (Ni 0,21–0,75, Cu 0,12–0,71, Co 0,04) и более богатые густовкрапленные (Ni 0,30–3,14, Cu 0,10–1,30, Co до 0,05) руды, среди которых

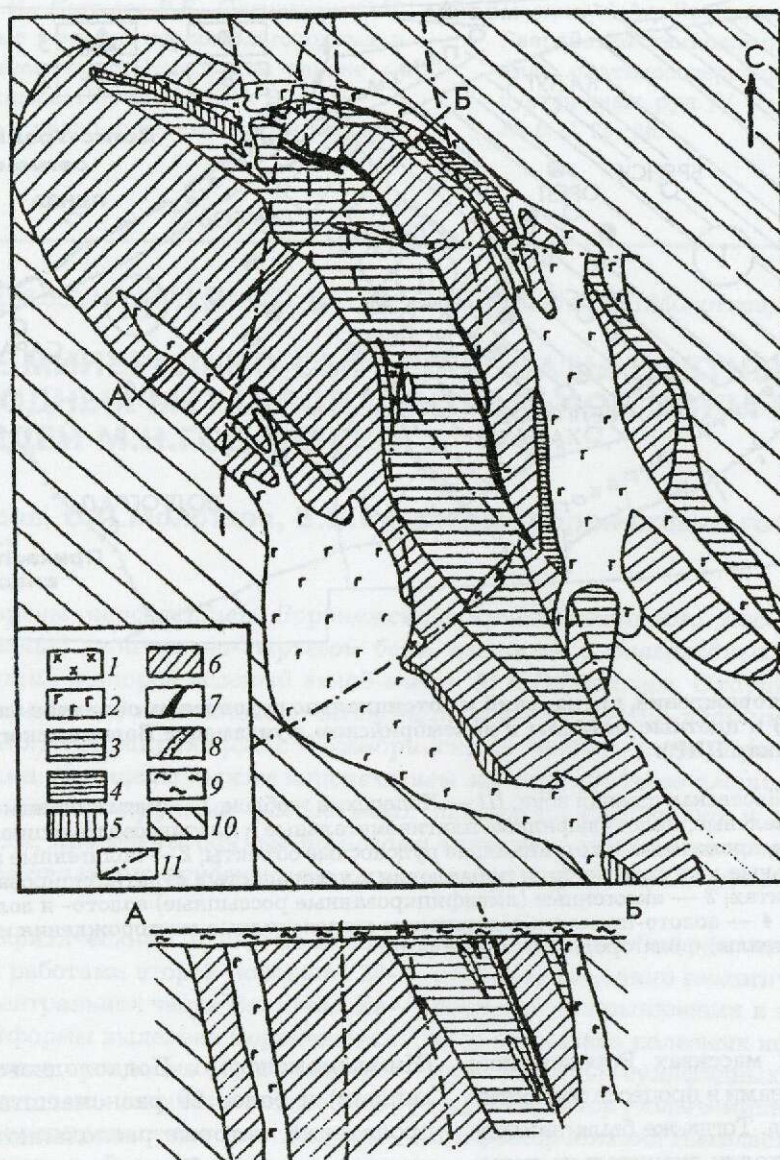


Рис. 2. Схематическая геологическая карта и разрез Нижнемамонского месторождения сульфидных платиноидно-медно-никелевых руд:

1 — диориты; 2 — габбро-нориты; 3 — перидотиты; 4 — плагиоперидотиты; 5 — оливковые пироксениты; 6 — серпентиниты (апоперидотитовые); 7 — аподунитовые серпентиниты (рудные); 8 — рудные тела; 9 — породы осадочного чехла; 10 — вмещающие породы воронцовской серии; 11 — тектонические нарушения

присутствуют жильные тела массивных и брекчиевидных руд [7, 9, 10] с высокими содержаниями рудообразующих (Ni 1,67–5,93, Cu 0,15–4,01, Co 0,44; ЭПГ около 0,5 г/т) элементов (табл. 1).

Месторождения и рудопроявления этого типа характеризуются в целом близким минеральным составом. В них найдено более 30 минералов. На-

ряду с широко распространенными (до 80–90% рудной массы) минералами — моноклинными и гексагональными пирротинами, троилитом, пентландитом, халькопиритом, хромшпинелидами — в рудах мамонского типа установлены маккинавит, валлериит, кобальтин, никелин, молибденит, точилинит, пирит, миллерит, бравоит, самородное золото и др. [7, 10].

1. Содержания рудообразующих элементов в сульфидных платиноидно-медно-никелевых рудах месторождений мамонского типа

Элементы и их отношения	Группы и разновидности руд						
	1 (22)	2 (7)	3 (3)	4 (5)	5 (8)	6 (11)	7 (2)
Содержание в рудах							
Ni	0,96	0,76	0,91	0,69	0,29	2,58	0,72
Cu	0,26	0,67	1,29	0,50	0,42	0,14	1,67
Co	0,07	0,06	0,06	0,06	0,03	0,11	0,05
Zn	0,01	0,01	0,01	0,01	—	—	0,01
S	5,33	6,72	7,91	10,64	3,88	20,19	12,30
S/Ni	5,6	10,0	8,6	15,4	13,4	7,8	17,0
S/Ni+Cu+Co	4,1	4,5	3,5	8,0	5,3	7,1	5,0
Ni/Cu	3,7	1,1	0,8	1,14	0,7	18,4	0,4
Ni/Co	13,3	12,7	15,1	11,5	9,7	23,5	14,4
Состав сульфидной фазы							
Ni	6,84	3,71	3,94	3,36	2,84	4,90	2,20
Cu	1,85	3,16	5,77	1,95	4,11	0,26	5,07
Co	0,51	0,24	0,21	0,24	0,27	0,21	0,13
Fe	52,80	55,03	51,19	56,48	54,78	56,63	54,60
S	38,00	37,84	38,89	37,97	38,00	38,00	37,90
Сумма	100,0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Содержание ЭПГ в рудах							
Pt	0,271	0,217	0,190	0,205	0,218	0,016	—
Pd	0,239	0,270	0,305	0,290	0,413	0,423	—
Rh	0,017	0,010	0,013	0,012	0,050	0,072	—
Сумма ЭПГ	0,527	0,497	0,508	0,507	0,681	0,511	—
Pd/Pt	0,9	1,2	1,6	1,4	1,9	26,4	—

Примечание. 1 — вкрапленные руды в серпентинизированных дунитах Нижнемамонского и Подколотновского месторождений; 2 — вкрапленные руды в серпентинизированных перидотитах Нижнемамонского месторождения; 3 — вкрапленные руды в роговообманковых перидотитах Юбилейного месторождения и Астаховского рудопроявления; 4 — вкрапленные руды в гарцбургитах Юбилейного месторождения; 5 — вкрапленные руды в оливиновых пироксенитах Нижнемамонского месторождения; 6, 7 — массивные и брекчиевидные руды Нижнемамонского и Подколотновского месторождений. Содержание Ni, Cu, Co в %; Pt, Pd, Rh — в ‰ (г/т); в скобках — число анализов.

На основании комплекса структурно-геологических и петролого-геохимических признаков разработана генетическая модель формирования рудно-магматической системы мамонского типа, в соответствии с которой собственно магматический этап является главным, определяющим в истории сульфидного платиноидно-медно-никелевого рудообразования и с ним связаны наиболее важные в промышленном отношении руды. На последующих этапах происходил лишь незначительный метаморфизм пород и руд с частичным изменением их минерального состава и перераспределением рудообразующих элементов, не оказавшим, однако, существенного влияния на общую продуктивность дли-

тельно развивающейся рудно-магматической системы.

Уже на ранних этапах изучения платиноидно-медно-никелевых месторождений и рудопроявлений мамонского типа М.Н.Годлевский в записке «Об очередных задачах поисков на никель и другие металлы на юго-востоке Воронежского кристаллического массива» (1969 г.) подчеркивал, что эти руды характеризуются относительно низкими средними содержаниями промышленно важных металлов (Ni 0,5%) и ставил задачу поисков богатых (Ni >1%) руд, что было осуществлено в дальнейшем с выявлением своеобразного золото-платиноидно-медно-никелевого оруденения еланского типа.

«В настоящее время можно считать уста-

новленной устойчивую никеленосность этого района и задача сейчас заключается в том, чтобы найти богатые руды. Эта задача должна быть решена в кратчайший срок.» (18 июля 1969 г. М.Н.Годлевский).

К началу 80-х годов геофизическая изученность и заверочно-поисковое бурение скважин на сульфидное никелевое оруденение мамонского типа ограничивалось восточным бортом Павловского выступа докембрийского фундамента с осадочным чехлом от 50–100 до 200 м. Детальные гравимагнитные съемки и электроразведочные работы в восточной зоне ВКМ на крупных камерно-дифференцированных массивах с глубинами осадочного чехла до 250 м и более стали отставать, финансирование поисковых работ с бурением скважин с 1974 по 1979 гг. было остановлено полностью. Продолжение работ по предварительной и детальной разведке Нижнемамонского месторождения с проходной разведочно-эксплуатационной шахты глубиной 120 м, предложенной А.В.Сидоренко — министром геологии СССР и Экспертным Советом Мингео РСФСР с участием Н.М.Годлевского, было тщательно проработано руководством ГУЦР (П.В.Вилюнов) и не принято к реализации по ряду экономических, организационных и других причин и, прежде всего, по конкурентным обстоятельствам, связанным с открытием и освоением крупных Талнахского и Октябрьского месторождений. С 1980 г. на юго-востоке ВКМ проводились работы м-ба 1:500 000 по глубинному геологическому картированию территорий, включающих крупные (Елань-Коленовский и Вязовский) расслоенные интрузивы. Результатом было последовательное открытие в пределах Елань-Коленовского массива Центрального (1975 г.) и Еланского (1976 г.) месторождений богатых существенно никелевых руд [11].

Еланский тип месторождений. Еланская группа месторождений (Еланское и Елkinsкое) и рудопроявлений (Центральное, Троицкое, Новопокровское и др.) относятся к новому, ранее неизвестному в России и за рубежом высоконикелистому платиноидно-медно-кобальтовому типу рудно-магматических систем [8, 11, 12], ассоциирующих с ортопироксенит-норит (2065±15 млн. лет)-диоритовыми (2050±14 млн. лет) субвулканическими интрузивами.

В пределах Еланского месторождения (рис. 3) выявлены две рудные зоны протяженностью от 600 до 1300 м, залегающие под осадочным

чехлом в норитах, которые в свою очередь включают ряд крутопадающих (согласных с общей структурой вулканотрузивной колонны) прерывистых пласто-, ленто- и линзообразных рудных тел (мощностью от 2 до 110 м). Кроме того, достаточно протяженная (более 1000 м при ширине до 100 м) зона сульфидного оруденения установлена в норитах южной (фланговой) части месторождения. На Елkinsком месторождении, расположенном в 11 км южнее Еланского, сульфидное медно-никелевое оруденение сконцентрировано в протяженной (более 1000 м) зоне, в которой богатые руды образуют крупную (до 500 м при мощности 40 м) рудную залежь.

Рудоносные зоны и тела, наследующие крутопадающий характер и элементы внутреннего строения вулканотрузивных колонн, сложены преимущественно вкрапленными рудами с маломощными залежами массивных (от 0,2 до 1,5–2,5 м, иногда 3–5 м) и вкрапленно-агрегатных (от 0,2 до 1 м) руд и содержат разнообразные по составу (в том числе оруденелые) ксенолиты ультрамафитов. На Еланском и Елkinsком месторождениях резко преобладают вкрапленные руды (более 85%), прожилково-вкрапленные и массивные развиты ограниченно (10–15 и 2–3% соответственно). При относительно невысокой доле (около 10%) густовкрапленных, прожилково-вкрапленных и сплошных руд они вместе с тем концентрируют около половины полезных компонентов [10].

Руды еланского типа имеют специфический минеральный состав [8, 13], значительно отличающий их от руд медно-никелевых месторождений мамонского и других типов. При ведущей количественной роли троилита, монаклинного и гексагонального пирротина (Ni 0,17–2,49%), крайне ограниченном распространении (2,5%, иногда до 10–15%) халькопирита (Cu 33,9–35,5%, Ni 1,52–6,8%, иногда Co 0,07%) руды еланского типа характеризуются высокими содержаниями (до 30–55%) пентландита (Ni 28,3–43,9%, Co 0,2–5,0, реже 7,3%), постоянным присутствием (до 2–5%) хромшпинелидов, ассоциирующих как с силикатами, так и с сульфидами. Во всех разновидностях руд постоянно отмечаются аргентопентландит (Ni 18,1–23,0%, Fe 31,3–36,3%; Ag 11,7–15,1%), кубанит, титаномagnetит, иногда ильменит.

Особенностью руд еланского типа — тесное пространственно-временное совмещение ран-

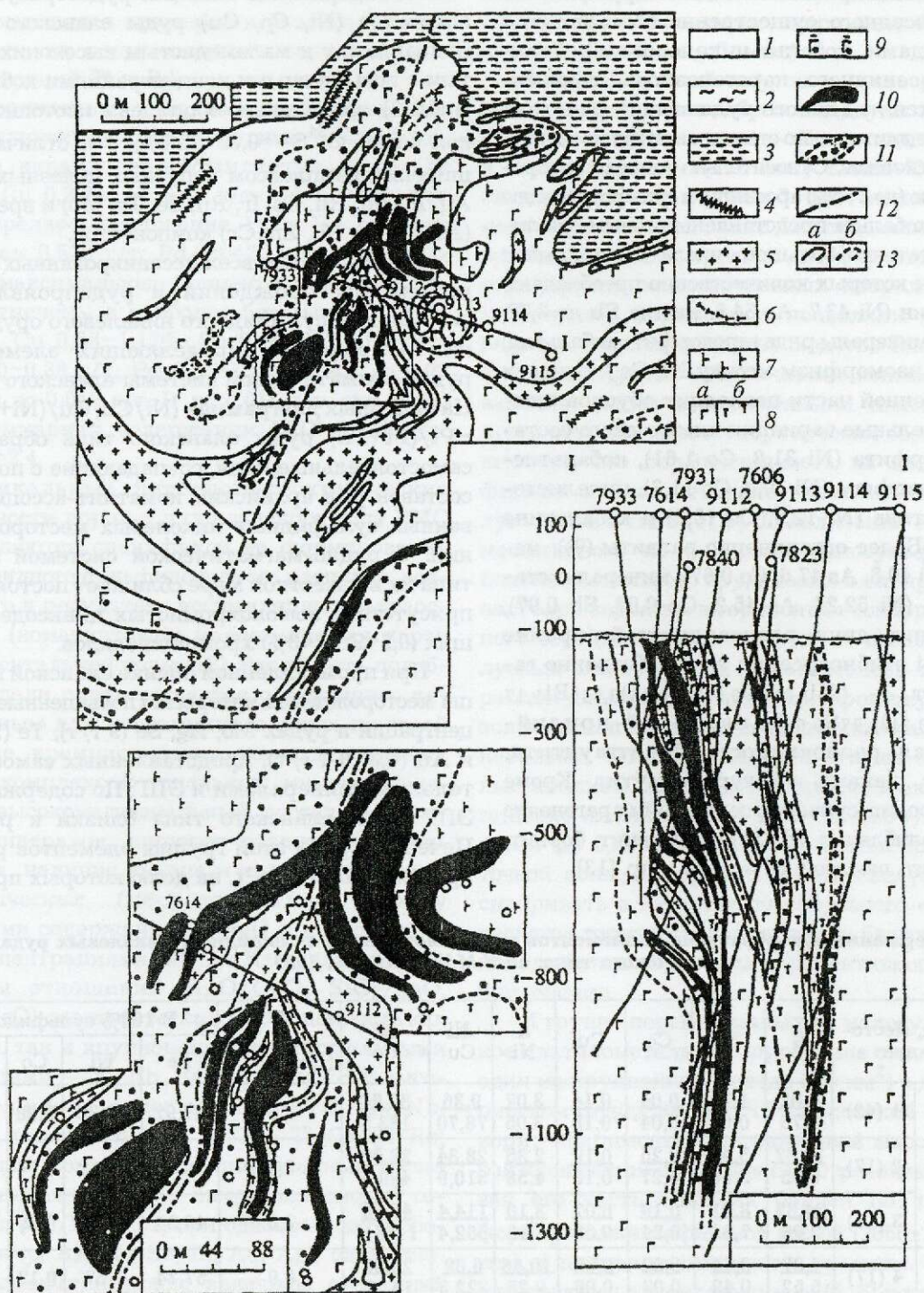


Рис. 3. Геологическая карта Еланского месторождения, по Н.М.Чернышовой:

1 — породы платформенного чехла (на разрезе); 2 — кора выветривания на кристаллическом фундаменте (на разрезе); 3 — песчаниково-сланцевые отложения воронцовской серии (PR_1^{-}); 4 — дайки порфиринов, лампрофиров; 5 — диориты второй интрузивной фазы еланского комплекса; 6 — норит-порфириды жильные; 7 — нориты тонкозернистые («фелизические»); 8 — нориты мелко-среднезернистые (а) и порфировидные (б); 9 — габбро-нориты оливиновые и безоливиновые мамонского комплекса; 10 — рудные тела; 11 — зоны бедной сульфидной вкрапленности; 12 — тектонические нарушения; 13 — геологические границы (а — установленные, б — предполагаемые)

него халькопирит-пентландит-пирротинового и более позднего существенно обогащенного платиноидами кобальт-никелевого арсенид-сульфоарсенидного парагенезисов, сформировавшихся из единого рудоносного расплава в процессе длительного становления рудно-магматической системы. Относительно широко распространенные (до 2–5%) арсениды и сульфоарсениды никеля и кобальта представлены тесным сростанием достаточно большого числа минеральных фаз, среди которых количественно преобладают (%) никелин (Ni 43,7, As 54,5, иногда Sb до 3,77, Co 0,49) и минералы ряда герсдорфит-кобальтин; широкий изоморфизм между Ni, Co и отчасти Fe в катионной части последних обуславливает значительные вариации химического состава герсдорфита (Ni 31,8, Co 1,61), кобальтислого герсдорфита (Ni 19,2, Co 11,3), никелистого кобальтина (Ni 12,6, Co 18,3) и кобальтина (Co 25,9). Более ограниченно развиты (%): маухерит (Ni 49,8, As 47,6, Co 0,67), минерал состава Ni_3As_2 (Ni 52,27, As 45,2, Co 0,07, Sb 0,97), гаухекорнит двух разновидностей (крайне бедный Bi стибииарсенид Ni и собственно гаухекорнит — $(Ni_{8,06}Fe_{0,55}Co_{0,13})_{8,74}(Bi_{1,17}Sb_{0,29}As_{0,31})_{1,77}S_{8,00}$), палладий-иридий-платиновая разновидность брейтгауптита, ульманит, данаит, теллуировисмутит. Кроме того, в арсенид-сульфоарсенидный парагенезис входят молибденит, сфалерит, галенит, борнит, маккинавит, самородное золото и др. [13].

По содержанию главных рудообразующих элементов (Ni, Co, Cu) руды еланского типа принадлежат к маломедистым высоконикелистым с повышенными концентрациями кобальта (табл. 2), значительно обогащены изотопно легкой серой ($\delta^{34}S = -0,3...-11,6\%$) и отличаются широким комплексом попутных полезных (Au, Ag, Pt, Pd, Rh, Os, Ir, Ru, Se, Te, Mo) и вредных (As, Sb, Bi, Pb, Zn, Cr) компонентов.

Эта общая для всех ассоциированных с норитами месторождений и рудопроявлений особенность сульфидного никелевого оруденения — одно из определяющих элементов рудно-магматической системы еланского типа. На бинарных диаграммах (Ni/Cu, Cu/(Ni+Cu))–Pt/(Pt+Pd) руды еланского типа образуют самостоятельные поля, совпадающие с полями составов руд архейских коматиит-ассоциированных сульфидных никелевых месторождений. С рудно-магматической системой этого типа их в известной мере сближает постоянное присутствие высокохромистых цинкодержащих ($0,2 < ZnO < 3\%$) хромшпинелидов.

При промышленной оценке еланской группы месторождений интересны повышенные концентрации в рудах Mo, Ag, Se (9 г/т), Te (2 г/т) и Au (0,3–0,4 г/т), представленных самостоятельными минералами и ЭПГ. По содержанию ЭПГ руды еланского типа близки к рудам Печенги. Среди этой группы элементов резко преобладают Pd и Pt, на долю которых прихо-

2. Содержание рудообразующих элементов и их отношения в сульфидных никелевых рудах еланского типа, по Н.М.Чернышову, 1995

Типы руд, место- рождение		S	Ni	Co	Cu	S Ni	Ni Cu	Ni Co	S	В 100% сульфидов			
									Ni+Co+Cu	Fe	Ni	Co	Cu
Еланское	1 (42)	<u>4,02</u> 3,78	<u>1,31</u> 0,97	<u>0,04</u> 0,04	<u>0,14</u> 0,18	<u>3,07</u> 3,05	<u>9,36</u> 78,70	<u>32,93</u> 133,5	2,7	47,92	12,36	0,38	1,32
	2 (17)	<u>12,87</u> 6,65	<u>5,48</u> 3,40	<u>0,25</u> 0,27	<u>0,19</u> 0,18	<u>2,35</u> 4,58	<u>28,84</u> 310,9	<u>23,92</u> 490,5	2,2	44,42	16,18	0,74	0,56
	3 (11)	<u>24,82</u> 2,98	<u>8,01</u> 7,32	<u>0,19</u> 0,24	<u>0,07</u> 0,08	<u>3,10</u> 4,13	<u>114,4</u> 562,4	<u>42,16</u> 1169,4	3,0	49,34	12,26	0,29	0,11
Елкинское	4 (17)	<u>4,37</u> 5,52	<u>0,41</u> 0,42	<u>0,02</u> 0,03	<u>0,06</u> 0,06	<u>10,66</u> 9,25	<u>6,89</u> 222,3	<u>20,50</u> 14,37	8,9	57,74	3,57	0,17	0,52
	5 (5)	<u>21,49</u> 2,74	<u>1,35</u> 0,31	<u>0,11</u> 0,05	<u>0,33</u> 0,16	<u>15,92</u> 3,23	<u>4,09</u> 3,86	<u>12,27</u> 25,54	12,0	58,84	2,39	0,19	0,58
	6 (4)	<u>24,39</u> 1,81	<u>2,56</u> 1,40	<u>0,09</u> 0,05	<u>0,07</u> 0,05	<u>9,53</u> 4,60	<u>36,57</u> 816,2	<u>28,44</u> 2550,6	9,0	57,76	3,99	0,14	0,11

Примечание. 1, 4 — вкрапленные, 2, 5 — гнездово-прожилковые, 3, 6 — массивные руды. В скобках число анализов; в дробях: числитель — среднее содержание, знаменатель — стандартное отклонение. Расчет состава сульфидной фазы произведен при S=38% по средним содержаниям.

дится около 95% от суммы платиноидов; Rh, Ru, Ir находятся примерно в равных количествах, но их содержание на порядок ниже концентраций Pt и Pd.

Сравнительно высокими концентрациями ЭПГ отличаются брекчиевидные и более медистые вкрапленно-прожилковые руды (Ni 6,66%, Cu 0,23%, Pt 0,68 г/т, Pd 1,3 г/т, скв. 7614; среднее содержание Pt и Pd по пяти анализам 0,530 г/т; Pd/Pt=2,1). В массивных рудах максимальные концентрации платиноидов отмечены в наиболее богатых (Ni 13,3–14,35%, Cu 0,28–1,17%, Co 0,25–0,30%) рудах (Pt 0,10–0,38 г/т, Pd 0,36–1,0 г/т, Rh до 0,03 г/т, Ru до 0,012 г/т, Ir до 0,014 г/т, скв. 8413) при суммарном содержании ЭПГ 0,495 г/т; Pd/Pt=2,4.

Уникальные петролого-геохимические особенности пород и руд еланского типа РМС определяются спецификой ее формирования из гибридного сульфидоносного расплава, возникшего в результате ассимиляции ультраосновной (коматиитовой) магмой кислых пород континентальной коры [12]. Реальность подобной модели подтверждается следующим, характерным для контаминированных по своей природе кремнистых высокомагнезиальных серий, комплексом признаков: *минералогических* (высокомагнезиальный состав фемических минералов, широкое развитие ортопироксена, наличие кварца и калишпата); *петрохимических* (несоответствие между высокими содержаниями MgO и повышенными концентрациями SiO₂ и K₂O; высокие величины отношений MgO/CaO, SiO₂/CaO, MgO/FeO); *геохимических* (обогащенность как Cr и Ni, так и крупноионными литофильными элементами — K, Rb, Ba, легкими РЗЭ; высокие величины отношений Ce/Yb, Ce/Nb, Ba/Zr, повышенные — Zr/Rb, Ti/Cr, Ti/Rb; присущий коматиит-ассоциированным сульфидно-никелевым РМС высоконикелистый состав руд (Cu/Ni < 0,01) при одновременном обогащении их As, Mo, Sb, Bi, Au, Ag); *изотопно-геохимических* (высокие величины отношений ¹⁸O/¹⁶O δ¹⁸O > 6‰; ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr; ΣSr > 1; низкие — ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd, ΣNd < 0).

Малосульфидные платинометалльные рудопрооявления. В наращивании платинометалльного минерально-сырьевого потенциала ВКМ значительный интерес представляют дифференцированные плутоны. Наиболее крупные из них — Елань-Вязовский сложнодифференцированный ультрамафит-мафито-

вый (Воронежская область) и Ольховский кольцевой габбро-норит-кварцмонзонит-гранитный (Липецкая область).

Елань-Вязовский плутон в срезе докембрийского фундамента образован двумя самостоятельными интрузивами — Вязовским (71 км²) и более крупным (120 км²) Елань-Коленовским, которые на глубине 3–5 км имеют общее магматическое основание. Исследования внутреннего строения, трендов дифференциации и ряда других количественных петролого-геохимических параметров позволили установить значительные черты сходства Елань-Вязовского плутона с типичными контаминированными ритмично-расслоенными платиноносными петротипами и теоретически обосновать высокую его перспективность на малосульфидное платинометалльное оруденение стиллуотерского типа [5, 6]. Локализация крупномасштабного по ресурсам малосульфидного платинометалльного оруденения в его пределах наиболее вероятна в горизонтах тонкоритмичного чередования и контрастной смены кумулусных минеральных парагенезисов нижней расслоенной и в большей мере промежуточной зоны, обогащенной флюидонасыщенными минералами. Об этом свидетельствуют единичные анализы, показавшие существенное обогащение платиноидами (Pd+Pt > 0,90 г/т) и золотом (до 0,57 г/т) ортопироксенитов промежуточной зоны, которую в целом следует рассматривать в качестве своеобразного «критического» горизонта локализации благородных металлов нового, весьма перспективного, типа оруденения.

К группе перспективных на малосульфидное платинометалльное оруденение относится и один из крупнейших (около 300 км²) в докембрийском фундаменте ЦЧР Ольховский габбро-норит-кварцмонзонит-гранитный массив, характеризующийся кольцевым строением. Краевая его часть сложена ранней по времени формирования мафитовой фазой (2050 ± 23 млн. лет), в центре размещаются граниты. Петрологическими исследованиями [5, 6] установлено, что мафитовая составляющая породной ассоциации Ольховского плутона обладает признаками, присущими платиноносным комплексам. Наличие сходных черт с известными платиноносными комплексами по ряду петрогенных компонентов в системе координат (Mg+Fe+Mn+Ca^{Px}+Cr+Ti)–Si–(Na+K+Ca^{Pt}+Al), характеру распределения редкоземельных элементов, а также повышенные содержания ЭПГ

(особенно Pd) по единичным пробам позволяют предположить возможность обнаружения в Ольховском плутоне платинометалльного оруденения.

Новогольский тип сульфидных медно-никелевых и малосульфидных платинометалльных потенциальных месторождений. В оценке перспектив потенциальной продуктивности на цветные и благородные металлы особый интерес представляет группа габбро-долеритовых интрузий новогольского комплекса (1805 ± 14 млн. лет) в пределах Жердевско-Борисоглебского узла на северо-восточном борту ВКМ (рис. 4). Крупные (до $200-400 \text{ км}^2$ и более) кольцеобразные в плане тела интрузивов лополитоподобной формы, часто с пологими ($15-30^\circ$) углами падения прорывают метаморфические породы (включая углеродистые сланцы воронцовской серии) раннего протерозоя. По характеру расслоенности (от микродолеритов и долеритов к оливиновым габбро-долеритам и троктолитовым габбро-долеритам и иногда долерит-пегматитам), петрохимическим параметрам и металлогенический специализации интрузии отнесены к трапповой формации, с которой в других регионах (Норильско-Талнахский, Инсизва — ЮАР) ассоциируют уникальные месторождения сульфидных медно-никелевых и малосульфидных платинометалльных руд. Химический состав пород новогольского комплекса близок к интрузивам трапповой формации смородинского комплекса КМА, в такситовом горизонте которых установлены повышенные концентрации платиноидов ($\text{Pd} + \text{Pt} = 1,8 \text{ г/т}$) и Au ($0,38 \text{ г/т}$). Повышенные концентрации ЭПГ, Ni, Co и Cu предполагаются в практически не вскрытых бурением нижних (MgO до $22,77\%$, S от $0,10$ до $1,38\%$ по единичным анализам) дифференциатах массивов этого комплекса.

Золото-платинометалльное оруденение в высокоуглеродистых стратифицированных комплексах и метасоматитах. Помимо широко известных сульфидных платиноидно-медно-никелевых рудопоявлений и месторождений, особое значение приобретает выявленный в последние годы новый нетрадиционный и весьма крупный по ресурсам источник благородных металлов — высокоуглеродистые стратифицированные докембрийские толщи и их метасоматиты. Проявления этого типа, широко развитые в пределах Курской и юго-востока Воронежской областей, представлены тремя группами [5, 6]: золото-платинометалльной

среди метаморфизованных (сланцы, гнейсы) углеродистых сульфидизированных вулканогенно-осадочных (тимской тип) и терригенных (сухоярский тип) пород; платиноидно-золоторудной в средне-низкотемпературных высокоуглеродистых метасоматитах зон объемного катаклаза среди нижнепротерозойских вулканогенно-осадочных отложений оскольской серии (кшенский тип); платиноидно-золото-серебряной в углеродистых тектонических брекчиях и метасоматитах контактовых зон черных сланцев воронцовской серии и мафитовых интрузий (южное обрамление Большемартыновского массива, Каменки и др.).

Золото-платинометалльное оруденение первого типа, наиболее широко развитое в крупной ($120 \times 30 \text{ км}$) Тим-Ястребовской структуре КМА, характеризуется многоуровневым размещением (до $5-7$ горизонтов мощностью $2,5-32,5 \text{ м}$), высокими концентрациями платиноидов и золота, крупномасштабными ресурсами, отчетливой корреляционной связью ЭПГ и Au с C, S и рядом петрогенных и малых (Ni, Cu, Co, Zn, Cr, Ti, V, Ba и др.) элементов, высокой (в $5-16$ раз превышающей содержания в оруденелых породах) степенью накопления благородных металлов в наиболее тонкозернистой ($< 0,06 \text{ мм}$) сульфидно-углеродистой фракции.

Кшенский тип, выявленный в пределах Тим-Ястребовской и Вологовской структур КМА [5, 6], представлен достаточно протяженными невыдержанными по морфологии и мощности ($0,5-40 \text{ м}$), разнообразными по составу метасоматитами с золото-сульфидно-вкрапленной и золото-кварцевой минерализацией, отличающейся высокими концентрациями Au (до $4,3-14,6$, иногда до 21 г/т) и пониженными ЭПГ (Pd до $0,96 \text{ г/т}$). Палладий-ртутно-золото-серебряный тип оруденения, открытый в Хоперском (Воронежском) геоблоке, отличается повышенными содержаниями Au до $1,7 \text{ г/т}$ и Pd $0,36 \text{ г/т}$.

Золото-платинометалльное оруденение в раннепротерозойских углеродистых сланцах, их метасоматитах, тектонических и эруптивных брекчиях ВКМ характеризуется полиминеральным, многокомпонентным составом и многообразием форм концентрирования благородных металлов. В их составе установлено 60 рудных минералов, в том числе 18 собственных минеральных фаз ЭПГ и Au.

Значительные концентрации ЭПГ и Au выявлены в составе некоторых сульфидов —

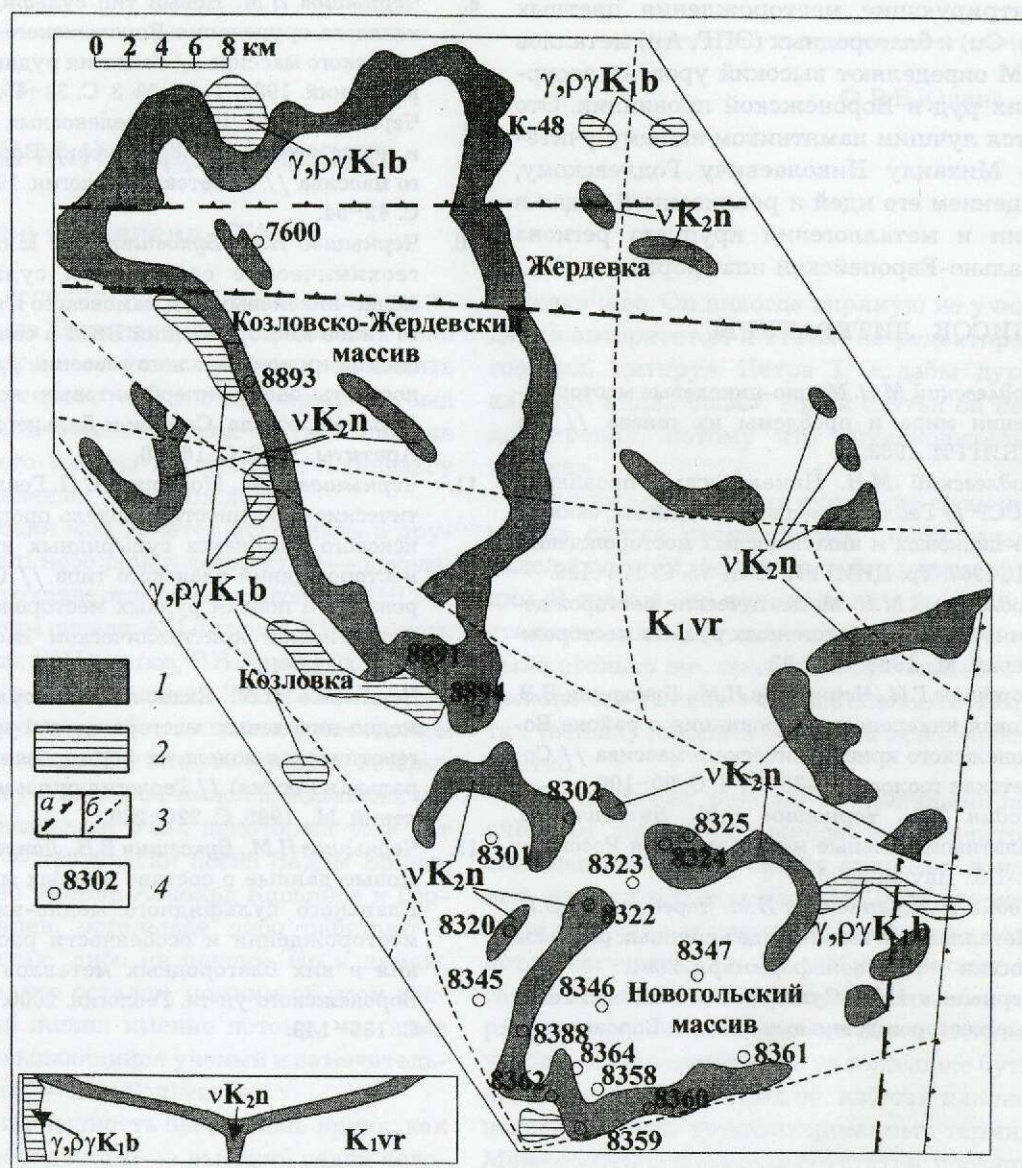


Рис. 4. Схема расположения Новогольского и Козловско-Жердевского массивов, по С.П.Молоткову, Н.М.Чернышову, 1990:

1 — интрузии новогольского комплекса; 2 — интрузии бобровского гранит-плагиогранитного комплекса; 3 — тектонические разломы (а — первого порядка, б — другие); 4 — скважины и их номера; на врезке условная схема строения габбро-долеритового кольцевого массива новогольского комплекса

пирите и пирротине, на долю которых приходится 90–95% объема рудного вещества. Наиболее высокими концентрациями Pd характеризуются малоникелистые пирротины (Pd 120–1300 г/т) и пириты (Pd до 300 г/т, Au до 1700 г/т), в меньшей степени — высоконикелистые пирротины

(среднее содержание Pd 60 г/т) и халькопирит (33 г/т), а также редко встречающийся в рудах кобальтсодержащий пентландит (ЭПГ до 200 г/т), который в совокупности с собственно золото- и платинометальными фазами является основным концентратом благородных металлов.

Выделенные новые потенциально перспективные рудно-магматические системы, концентрирующие месторождения цветных (Ni, Co, Cu) и благородных (ЭПГ, Au) металлов на ВКМ определяют высокий уровень ресурсов этих руд в Воронежской провинции. Это является лучшим памятником нашему учителю — Михаилу Николаевичу Годлевскому, воплощением его идей и реализацией задач в геологии и металлогении крупного региона Центрально-Европейской платформы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Годлевский М.Н. Медно-никелевые месторождения мира и проблемы их генеза // Тр. ЦНИГРИ. 1963.
2. Годлевский М.Н. Никеленосные провинции СССР // Геология медноколчеданных, свинцово-цинковых и никеленосных месторождений. М., 1967. Тр. ЦНИГРИ. Вып. 75. С. 178–199.
3. Годлевский М.Н. Магматические месторождения // Генезис эндогенных рудных месторождений. М., 1968. С. 7–83.
4. Горбунов Г.И., Чернышов Н.М., Буковшин В.В. Новая никеленосная провинция в районе Воронежского кристаллического массива // Советская геология. 1970. № 4. С. 90–109.
5. Додин Д.А., Чернышов Н.М., Якуевич Б.А. Платинометалльные месторождения России. — С.-Пб.: Наука, 2000.
6. Додин Д.А., Чернышов Н.М., Чередникова О.И. Металлогения платиноидов крупных регионов России. — М.: Геоинформмарк, 2001.
7. Чернышов Н.М. Сульфидные медно-никелевые месторождения юго-востока Воронежского кристаллического массива. — Воронеж: ВГУ, 1971.
8. Чернышов Н.М. Новый тип сульфидного никелевого оруденения Воронежского кристаллического массива // Геология рудных месторождений. 1985. Т. 27. № 3. С. 34–45.
9. Чернышов Н.М. Типы никеленосных интрузий и медно-никелевого оруденения Воронежского массива // Советская геология. 1986. № 12. С. 42–54.
10. Чернышов Н.М., Буковшин В.В. Минералогическо-геохимические особенности сульфидных медно-никелевых руд мамонского и еланского типов месторождений ВКМ в связи с проблемой их комплексного освоения // Никеленосность базит-гипербазитовых комплексов Украины, Урала, Сибири и Дальнего Востока. Апатиты, 1988. С. 16–20.
11. Чернышов Н.М., Молотков С.П. Геолого-генетические особенности и модель прогнозно-поискового комплекса сульфидных никелевых месторождений еланского типа // Прогнозирование и поиски рудных месторождений на Воронежском кристаллическом массиве. М., 1992. С. 28–42.
12. Чернышов Н.М. Еланский тип сульфидных медно-никелевых месторождений и геолого-генетическая модель их формирования (Центральная Россия) // Геология руд и месторождений. М., 1995. С. 220–236.
13. Чернышов Н.М., Буковшин В.В., Лапутина И.П. Новые данные о составе рудных минералов Еланского сульфидного медно-никелевого месторождения и особенности распределения в них благородных металлов // Вест. Воронежского ун-та. Геология. 2000. № 5 (10). С. 136–148.

ВОСПОМИНАНИЯ О М.Н.ГОДЛЕВСКОМ

УДК 55 (092)

© В.В.Юдина, 2002

ПАМЯТИ М.Н.ГОДЛЕВСКОГО

В.В.Юдина (Кливленд, США)

Скоро исполняется 100 лет со дня рождения Михаила Николаевича Годлевского. Уже почти 18 лет как он ушел из жизни, но память о нем не тускнеет — уж очень яркой он был личностью. В геологических кругах широко известны его работы по геологии и генезису медно-никелевых месторождений.

Но сегодня мне хочется вспомнить о другом: как наш небольшой коллектив — никелевая группа в составе отдела минералогии ЦНИГРИ, а затем сектора никеля: А.П.Лихачев, В.К.Степанов, А.В.Касьянов, Е.В.Баташов, В.В.Ершов, Г.Б.Попова, Д.М.Туровцев, Г.С.Румянцев, Л.В.Разин, Л.Н.Гриненко, я и другие — работали под его руководством в 60-е и 70-е годы XX века, во времена, которые современному поколению геологов, возможно, кажутся легендарными. Увы, некоторых уже нет среди нас — трагически погиб Вадим Ершов, безвременно умерли Аскольд Касьянов и Герман Румянцев, остальные либо работают в других местах, либо на пенсии. Но я думаю, что мы все, кто остался, помним об этом времени нашей жизни именно потому, что нами руководил выдающийся ученый и замечательный человек — М.Н.Годлевский.

У него и внешность была очень яркая, как говорят, «породистая» — высокий седой человек с удивительно яркими большими голубыми глазами под кустистыми бровями, спокойная и мягкая манера общения — этакая «дорогая простота», за которой чувствовались что-то очень значительное и истинная воспитанность. Он вставал, когда в комнату входила женщина. В нем не было никакой рисовки, никакого желания «казаться», а не быть.

А был он куратором Мингео СССР, членом редколлегий журналов «Записки ВМО» и «Геология рудных месторождений», членом ВАК. Его стол всегда был завален статьями, которые присылали на отзыв эти журналы. Приходили геологи за консультацией, просили оппонировать диссертации. Он охотно консультировал и давал советы, но делал это

ненавязчиво. Он никогда напрямую не учил, не давил авторитетом и статьи не редактировал, говорил, цитируя Петра I, «...дабы дурость каждого видна была». Наши статьи он не редактировал, потому что «руководитель не нянька».

Окружала его некая аура — за спокойным, иногда слегка насмешливым тоном чувствовался глубокий, ясный ум и бездонная эрудиция. Я думаю это чувствовали все, кто с ним сталкивался. Поэтому поклонников у него было столько же, сколько и противников. Поражало его умение о самых сложных предметах (вещах) говорить и писать ясно, просто и кратко.

Он не любил занятия бесконечными пересчетами привноса-выноса компонентов в сложных многофакторных системах и называл это «метасоматической бухгалтерией». Свои статьи он полностью обдумывал и только потом записывал их. Не любил длинных описаний и называл себя импрессионистом, говоря, что для описания лунного света достаточно указать на его отражение на горлышке бутылки, как у Чехова. Писал он, избегая длиннот и нагромождения труднопонимаемых терминов. Меня особенно поразила его статья, посвященная статистическому методу дискриминантного анализа магматических комплексов. Абстрактные цифры уравнений дискриминантной функции получили реальное воплощение в виде куполов с частичным перекрытием — областью неопределенности. Таким же удивительным был его учебник по кристаллографии — это пугало студентов — изданный еще до войны. А его Руководство по расчету физико-химических диаграмм было настольной книгой студентов и специалистов.

Михаил Николаевич стремился помочь исследователям, у которых находил стремление к познанию природы медно-никелевых месторождений, новые факты и наблюдения, и старался продвинуть их работы, даже если выво-

ды не согласовывались с его собственными взглядами. Он не считал себя владеющим «истиной в последней инстанции». Сколько людей обязаны ему успехом своих диссертационных работ, публикаций статей и т.п. Надеюсь, что они этого не забыли.

Как куратор Михаил Николаевич много лет опекал Н.М.Чернышова — профессора Воронежского университета, изучавшего своеобразные медно-никелевые месторождения на Воронежском кристаллическом массиве, а также группу И.В.Ляхницкой из ВСЕГЕИ, работавшую на месторождениях Печенги.

Силами наших сотрудников А.В.Касьянова и Е.В.Баташова были закартированы и детально изучены расслоенные гипербазитовые массивы — Чайский и Довыренский в Северном Прибайкалье. Несмотря на малочисленность нашей группы, Михаил Николаевич старался охватывать различные стороны проблемы медно-никелевых месторождений. Так, В.В.Ершов и Г.Б.Попова изучили условия устойчивости пентландита, синтезировав его в лаборатории Института кристаллографии АН СССР под руководством Н.Ю.Икорниковой. А.П.Лихачев также экспериментировал, изучая условия образования никеленосных силикатных расплавов при высоких температурах и давлениях. При этом работал он не в специально оборудованном помещении, а в соседней с нами комнате на третьем этаже (что по технике безопасности делать не полагалось, но Саша был изобретателем!).

У Михаила Николаевича никогда не было отдельного кабинета, он сидел в общей комнате, где стояло еще несколько столов (В.К.Степанова, Д.М.Туровцева, мой). Касьянов и Баташов размещались в комнате напротив — в лаборатории Павла Самойловича Бернштейна. Однажды в Сашиной комнате все-таки произошел взрыв, трубчатую печь разнесло, а ее керамическая пробка, пробив оконное стекло, упала во двор соседнего Института твердых сплавов. Когда мы вбежали в комнату, из-под лабораторного стола вылез Сашин лаборант Леша Андронов, волосы его были белые и стояли дыбом. Белая асбестовая пыль густо покрывала все предметы и носилась в воздухе. Надо было срочно ликвидировать последствия — этаж был директорский (Саша в это время был на обеде). Наша лаборантка Лиза Чистова бегала с ведром и тряпкой чуть ли не на цыпочках. Этот случай долго потом вспоминали со смехом.

Михаил Николаевич всегда приходил на работу вовремя и просил сотрудников соблюдать трудовую дисциплину. Он никогда никого не распекал и не повышал голоса, только нахмурится и поведет бровями — этого было достаточно.

Михаил Николаевич ежегодно ездил на полевые работы, просматривал материалы местных экспедиций, документировал керн скважин. На Талнах он попал в 1962 г., когда еще не было моста через реку Норилку и автодороги через широкую (около 10 км), низкую, местами заболоченную пойму, заросшую лиственницей. Летом 1962 г. нас перевезли через реку на лодках, а по пойме мы топали по вездеходной колее пешком в ботфортах, временами увязая по колено. Как добрался Михаил Николаевич из Норильска, не помню. На Талнах бурение еще только началось, и еще не утих первооткрывательский бум. Михаил Николаевич одобрил первую карту Талнахского месторождения, составленную Львом Коновичем Цывьяном. В его интерпретации Талнахский интрузив был разбит многочисленными разломами и представлял как бы систему клавишей. На последующих картах и разрезах, составленных на основе детального разбурирования, разломы в теле интрузива постепенно исчезали, оставаясь во вмещающих породах.

В отличие от Норильского интрузива, внедрившегося в покровы базальтов, Талнахский внедрился в осадочные толщи различного состава и оказал на них сильное метаморфизующее воздействие. Он был окружен мощным ореолом метаморфических и метасоматических пород. Михаил Николаевич поручил мне разобраться в этом с помощью теории метаморфической зональности и учения академика Д.С.Коржинского об инертных и вполне подвижных компонентах. Впоследствии мы делали эту работу с Д.М.Туровцевым, перешедшим из Норильской экспедиции к нам в сектор никеля ЦНИГРИ.

В 1963 г. мост через реку был уже построен, но настила еще не было, были только узкие доски по краям около перил. И вот по такой доске Валя Степанов переводил Михаила Николаевича через мост, а у него не действовали ахилловы сухожилия, поврежденные еще в период заключения.

Михаил Николаевич чрезвычайно высоко оценивал труды академика Д.С.Коржинского и впервые применил его метод анализа парате-

незисов минералов к системам медно-никелевых руд. Он показал смену основных рудных минералов — пирротина, пентландита и халькопирита — в зависимости от изменения активности и фугитивности серы. Все диаграммы рассчитывал В.К.Степанов, который был его ближайшим помощником и, наверное, лучше всех понимал его.

В начале 70-х годов Михаил Николаевич заинтересовался вопросами образования медно-никелевых месторождений в докембрийских структурах, в областях регионального метаморфизма. Главный вопрос, касающийся роли метаморфизма в процессе оруденения, решался по-разному. Н.А. и Э.Н.Елисеевы доказывали метаморфогенное (гидротермальное) происхождение руд месторождений Печенги, находящихся в зеленосланцевой фации метаморфизма. В.И.Кочнев-Первухов, С.И.Зак и В.В.Проскуряков аргументировали магматическое происхождение руд Аллареченского месторождения, расположенного в области амфиболитовой фации метаморфизма. Михаил Николаевич и здесь применил метод анализа парагенезисов. Им и Е.В.Баташовым была рассчитана область устойчивости пентландита в парагенезисе с минералами различных степеней окисления железа в зависимости от изменения парциальных давлений (активностей) серы, кислорода и температуры. Эта трехмерная диаграмма позволяла проанализировать возможность сохранения первичного магматогенного пентландита в условиях различных фаций метаморфизма, отличающихся не только температурой, но и режимом кислорода. К сожалению, эта работа не была доведена до конца из-за тяжелой болезни Михаила Николаевича.

Кроме геологии, Михаил Николаевич обладал огромной эрудицией во многих областях человеческой культуры. Интересы его были обширны — история, философия, литература. Себя он считал последователем Канта, неоднократно повторяя: «Кант показал, как человек мыслит». Очень хорошо знал поэзию, любил Тютчева и Бунина. Его чувство юмора проявлялось в любви к творчеству Бабеля. Как сейчас помню, принесся томик «Одесских рассказов», он с удовольствием читал вслух, как Бенья Крик поджег помещичий участок: «Бенья, мне сдается, что у нас горит сажа — Паша, закусывайте и выпивайте — и пусть Вас не волнуют этих глупостей!» Он с энтузиазмом встретил опубликование (наконец!) в 1969 г.

великого романа Булгакова «Мастер и Маргарита». А однажды пришел на работу сияющий, держа в руках свежий номер «Нового мира», и сказал мне: «Наконец, у нас, сидельцев, появился свой писатель!» — в номере был опубликован рассказ А.И.Солженицына «Один день Ивана Денисовича».

Хотя многие знали о его нелегкой судьбе, полностью трагические обстоятельства его жизни стали известны позже. Во время войны 1941–1945 гг. вместе со многими он попал в окружение под Лугой, был в плену, работал на шахтах, сначала в Судетах, потом в Намюре в Бельгии, освобожден англичанами в 1944 г., потом еще год воевал в армии генерала Рыбалко в Чехословакии. После Победы он был назначен военпредом по приему оборудования цейсовских оптических заводов (по репарациям). Все, казалось бы, складывалось удачно — но тут его ближайший друг и соученик, академик С.С.Смирнов, которого в СССР назначили руководителем минералогической части атомного проекта, вспомнил о нем — хорошем минералоге — и уговорил начальство демобилизовать и вызвать Михаила Николаевича в Ленинград. И здесь его в первый же день по дороге во ВСЕГЕИ арестовали, обвинив в шпионаже в пользу Германии, и держали целый год в Крестах («Отчего ты, сволочь, вместе с танком не сторел?»). Но он ничего не подписал. Тогда его отправили в Норильск. В Горном лагере в те дни было избранное общество: астрофизик Козырев, Л.Н.Гумилев, геологи Г.Б.Роговер и Ю.М.Шейнман, открывший Гулинский массив, и многие другие представители интеллигенции.

Михаил Николаевич говорил, что его спасла любовь к познанию, к науке. Уголовники считали его «чокнутым» и не трогали. Один из начальников, Савва, когда к нему пришел оборванный зэк с картой сбросов угольного пласта на месторождении Кайеркан, понял, что этого человека надо освободить от общих работ. С тех пор Михаил Николаевич начал изучать медно-никелевые месторождения, хотя и был подконвойным. Много лет спустя, уже после ликвидации норильских лагерей, норильский геолог Эдуард Авксентьевич Кулагов обнаружил в архиве геологического управления отчет Михаила Николаевича «Месторождение Медвежий ручей», написанный на разномастных клочках бумаги, без имени автора. Также безымянными печатались многочисленные выдержки из подобных отчетов в изданиях

Норильского горно-металлургического комбината под редакцией главного геолога Г.Г.Моора. В конце концов Михаила Николаевича расконвоировали, потом он стал заведовать петрографической лабораторией. Накопившийся материал послужил основой докторской диссертации, которую он защитил уже после отъезда из Норильска в 1959 г.

Все эти ужасные передрыги не сломили его, не озлобили. Он говорил, что не считает случившееся с ним персональной обидой — плен, аресты, ссылки, расстрелы были участью миллионов людей в те времена в СССР. Просто он попал в этот гигантский черпак наряду со многими другими.

Однако это не могло не отразиться на его мироощущении. Он был внутренне религиозен, но всякие внешние формы церковности отвергал. Он был «как Уленшпигель» (его слова) крещен дважды: по католическому (отец был поляк) и по православному (мать — русская) обрядам. В лагере с ним сидел мулла, который говорил: «Вера много, а Бог один».

Михаил Николаевич очень хорошо разбирался в людях и говорил, что прагматически

выгоднее хорошо относиться к людям, чем плохо. Но в нем жил сарказм, который иногда проявлялся. Так, на одном трапезном совещании, слушая оратора, вдохновенно объяснявшего пользу каких-то статистических методов, он вдруг тихо сказал мне: «Дураки опасны тем, что не понимают что к чему».

Всякие торжественные чествования он называл «юбилейчиками», а свой юбилей категорически запретил: «Кому какое дело, сколько мне лет?» Также он не одобрял пышных похорон, речей, поминок. Он говорил: «Надо помогать человеку, пока он жив. А потом надо как можно быстрее убрать труп». Но на его похороны пришло очень много народа, приехали из других городов. Умер он 4 июня 1984 года от второго инфаркта. Он знал, что умирает и сказал Нине Юрьевне: «...но я не боюсь...» По иронии судьбы его отпевали дважды — в православной церкви, а потом в католическом соборе св. Людовика на малой Лубянке. Похоронен Михаил Николаевич на Котляковском кладбище, в тихом месте. У ограды разросся куст шиповника.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ М.Н.ГОДЛЕВСКОГО**1932 г.**

1. Материалы по минералогии бурых железняков Холперского района // Тр. ВГРО. Вып. 199. 48 с.

2. Окислы и гидроокислы. Глава в «Рабочей книге по минералогии». — М.: Госгеолиздат.

3. Краткий курс кристаллографии. — М.: Госгеолиздат. 60 с.

4. О методе измерения максимального двупреломления двусосных минералов с помощью федоровского столика (по поводу работы A. De-benedetti) // ЗМО. Ч. 61. Вып. 1. С. 179–181.

5. Успехи минералогии в Союзе за 15 лет. Очерк 1 // ЗМО. Ч. 61. Вып. 2. С. 205–226.

1933 г.

6. Раздел кристаллографии в кн. «Словарь по геолого-разведочному делу». — М.: Госгеолиздат.

7. Новое месторождение пирофиллита на Урале // Мат-лы ЦНИГРИ, петрогр. и минер. Сб. 2. С. 30–39.

8. Успехи минералогии в Союзе за последние 15 лет. Очерк 2 // ЗМО. Ч. 62. Вып. 2. С. 269–298.

1934 г.

9. Авантюрин Большого Тагана // ЗМО. Ч. 63. Вып. 1. С. 58–66.

10. Айдырлит — новый минерал // ЗМО. Ч. 63. Вып. 2. С. 338–345.

1935 г.

11. Галлуазит из Айдырлинского месторождения никелевых руд // ЗМО. Ч. 64. Вып. 1. С. 108–117 (с В.П.Ивановой).

12. Литература по кристаллографии и минералогии за 1934 г. (СССР) // ЗМО. Ч. 64. Вып. 1. С. 265–271 (с Д.П.Григорьевым).

13. Краткий курс кристаллографии. 2-е изд. (перераб.). — М.: Госгеолиздат. 110 с.

1936 г.

14. О работе минералогического кабинета ЦНИГРИ в 1934 г. // Мат-лы Первой Всесоюзной научно-производственной геологической конференции. 1935. ОНТИ. С. 22–25, 131–132.

15. Литература по кристаллографии и минералогии за 1935 г. (СССР) // ЗМО. Ч. 65. Вып. 1. С. 193–212 (с А.В.Немиловой).

16. Окислы и гидроокислы. Глава в кн. «Курс минералогии». — М.: Госгеолиздат.

17. Дополнение к описанию групп «Никелевые силикаты»; глава «Силикаты» // Курс минералогии. М.

18. Ашарит из Индерского месторождения боратов // ЗМО. Ч. 65. Вып. 2. С. 379–384 (с Е.Н.Егоровой).

1937 г.

19. Уточнение понятия о минерале // ЗМО. Ч. 66. Вып. 1. С. 107–111.

20. Рентгенометрическое изучение гидросиликатов никеля // ЗМО. Ч. 66. Вып. 1. С. 51–106 (с Е.Ф.Алексеевой).

21. Предварительные результаты минералогического изучения боратов Индерского района // Большая Эмба (нефть, бор и другие ископаемые ресурсы Урало-Эмбенской нефтеносной области). М. С. 467–488 (с А.И.Болдыревой).

22. Дополнение к описанию и редакция Ni-соединений в переводе книги Э.С.Дана «Курс минералогии». — М.: ОНТИ.

23. Очерки по минералогии боратовых месторождений Индерского района // ЗМО. Ч. 66. Вып. 2. С. 316–368.

24. Об одной закономерности в гидратогенных процессах минералообразования // ЗМО. Ч. 66. Вып. 3. С. 468–488.

25. Литература по кристаллографии и минералогии за 1936 г. (СССР) // ЗМО. Ч. 66. Вып. 3. С. 580–610 (с А.В.Немиловой).

26. Успехи минералогии в СССР за двадцатилетие. 1917–1937 гг. // ЗМО. Ч. 66. Вып. 4. С. 625–647.

27. Указатель литературы по бору (1122 назв.) // Большая Эмба. М.: Изд. АН СССР. 71 с. То же отд. изд. (Редактор).

28. Геологическая литература СССР. Библиографический ежегодник за 1934 г. — М.: Госгеолиздат. 199 с. (Редактор).

1938 г.

29. Анализ парагенезисов, наблюдаемых в Индерских месторождениях боратов // ЗМО. Ч. 67. Вып. 1. С. 18–30.

30. Открытие калиборита в Индерском месторождении боратов // Советская геология. Т. 8. № 5. С. 115–116 (с А.А.Ивановым).

31. Результаты минералогических исследова-

дований в Индерском районе // Индерские бораты. М. С. 182-219.

32. Находка калиборита в соляной толще Индерского поднятия // ЗМО. Ч. 67. Вып. 2. С. 258-261.

33. Краткий курс кристаллографии. 3-е изд. (перераб.). - М.: Госгеолиздат. 106 с.

34. Литература по кристаллографии, минералогии и геохимии за 1937 г. (СССР) // ЗМО. Ч. 67. Вып. 3. С. 549-581 (с А.В.Немиловой).

1939 г.

35. Глауберит из соляной толщи Ишимбаево и из озера Туз-Кыр // ЗМО. Ч. 68. Вып. 4. С. 576-579.

36. Еще о галлуазите из Айдырлинского месторождения // ЗМО. Ч. 68. Вып. 3. С. 383-385.

37. Литература по кристаллографии, минералогии и геохимии за 1938 год (СССР) // ЗМО. Ч. 68. Вып. 3. С. 506-527 (с А.В.Немиловой).

38. Геологическая литература СССР // Библиографический ежегодник за 1937 год. М. 227 с. (Редактор).

1940 г.

39. Изоколлоидные смеси // ЗМО. Ч. 69. Вып. 2-3. С. 221-222.

40. Курнаковит — новый борат // Докл. АН СССР. Т. 218. № 7. С. 639-641.

41. Ломоносов как минералог // ЗМО. Ч. 69. Вып. 4. С. 447-457.

42. Литература по кристаллографии, минералогии и геохимии за 1939 г. (СССР) // ЗМО. Ч. 69. Вып. 4. С. 573-602 (с А.В.Немиловой).

1941 г.

43. Новый борат метагидроборатит // Докл. АН СССР. Т. 33. № 3. С. 257 (с Н.Ю.Икорниковой).

44. Люнебургит из Стебниковского месторождения калийных солей // Докл. АН СССР. Т. 32. № 5. С. 351-353 (с А.А.Ивановым).

1947 г.

45. Никель. Месторождения комплексных железо-никелевых и силикатных никелевых руд Урала // Геология СССР. Т. XII. Ч. 2. Полезные ископаемые. М. С. 703-735 (с К.Е.Кожевниковым и А.А.Прониным).

1949 г.

46. Материалы по петрографии Норильска // Бюл. технической информации Норильско-

го горнометаллургического комбината. № 3-4 (40-41). С. 53-59 (публикация без указания автора).

1957 г.

47. О содержании силикатного никеля в сульфидных медно-никелевых рудах Норильского района // Бюл. технической информации Норильского горнометаллургического комбината. № 3-4 (66-67). С. 44-49.

1958 г.

48. К геохимии благородных металлов в месторождении Норильск-I // Бюл. технической информации Норильского горнометаллургического комбината. № 2-3 (69-70). С. 5-11.

49. Об особенностях развития траппового магматизма на северо-западе Сибирской платформы // ДАН СССР. Т. 123. № 2. С. 339-342.

50. Геология и рудные месторождения Норильского района // Горный журнал. № 6. С. 9-14.

51. К вопросу о составлении металлогенической прогнозной карты северо-запада Сибирской платформы (тезисы) // Мат-лы научн. сессии по металлогеническим и прогнозным картам. Алма-Ата. С. 199-202.

52. Фемические минералы дифференцированных трапповых интрузий Норильского района // Минер. сб. Львовск. геол. общ. № 12. С. 196-224 (с А.Д.Баталиевым).

53. Поиски слепых рудных тел в пределах северо-западной окраины Сибирской платформы // Мат-лы к Всесоюзн. совещ. по разработке научных основ поисков слепых рудных тел (с В.Н.Егоровым, П.И.Касаткиным, Т.Н.Сироткиной).

1959 г.

54. Траппы и рудоносные интрузии Норильского района. - М.: Госгеолтехиздат. 68 с.

55. К вопросу о генезисе медно-никелевых сульфидных месторождений на Сибирской платформе // Геология рудных месторождений. № 2. С. 17-30.

56. К вопросу о составлении металлогенической прогнозной карты северо-запада Сибирской платформы (Связь рудных и магматических комплексов) // Металлогенические и прогнозные карты. (Тр. Объед. научн. совещ.). Алма-Ата. С. 159-178.

57. Траппы и сульфидно-никелевые месторождения Норильского района (докт. дис.). 1150 с.

1960 г.

58. Кристаллизационная дифференциация сульфидного расплава на примере сульфидных медно-никелевых месторождений // Мат-лы по геологии и полезным ископаемым Сибирской платформы. ВСЕГЕИ. Нов. сер. Вып. 31. С. 95–99.

59. Халькопирит-миллеритовые руды месторождения Норильск-1 // Геология рудных месторождений. № 6. С. 61–72 (с Н.И.Шушековой).

60. Связь эндогенной минерализации с траппами Сибирской платформы // Мат-лы годичн. сессии Ученого Совета ВСЕГЕИ по результатам работ 1958 года. Тр. ВСЕГЕИ. С. 41–42.

61. Получение синтетических алмазов // Геология рудных месторождений. № 5. С. 125–128.

1961 г.

62. Металлогенические провинции медно-никелевого оруденения // Советская геология. № 3. С. 7–22.

63. Обзор гипотез происхождения сульфидных медно-никелевых месторождений // Мат-лы ВСЕГЕИ. Нов. сер. Вып. 45. С. 71–82.

64. Роль магматических комплексов в металлогении западной части Сибирской платформы // Бюл. ВСЕГЕИ. № 3. С. 32–42.

65. Олег Дмитриевич Левицкий // ЗМО. Ч. 90. Вып. 3. С. 357–359.

66. Справочник «Минералы» // Геология рудных месторождений. № 3. С. 120–123.

67. М.В.Ломоносов и наука о рудных месторождениях // Геология рудных месторождений. № 6. С. 6–24 (с А.Г.Бетехтиным).

1962 г.

68. Вопросы теплообмена интрузива и вмещающих пород и контактовый термометаморфизм углей вблизи трапповых интрузивов // Геология и геофизика. № 2. С. 6–24 (с Г.С.Кравцовым и В.И.Сливко).

1963 г.

69. Некоторые данные об изотопном составе серы сульфидов Норильского месторождения // Геохимия. № 1. С. 35–40 (с Л.Н.Гриненко).

70. Медно-никелевые месторождения мира и проблемы их генезиса // Тр. ЦНИГРИ. 21 с.

71. Фазовые равновесия в некоторых бинарных системах и их значение в теории рудообразования // Геология рудных месторождений. № 3. С. 3–33.

72. Поиски закрытых никеленосных интрузий габбро-долеритов в Норильском районе // Вопросы изучения и методы поисков скрытого оруденения. М. С. 106–118 (с В.Н.Егоровым, П.И. Касаткиным, Т.Н.Сироткиной).

1964 г.

73. Научная конференция, посвященная столетию со дня рождения Н.К.Высоцкого в г. Свердловске // Геология рудных месторождений. № 5. С. 101–103.

74. Проблемы дифференцированных интрузий и их рудоносность // Научная конференция, посвященная столетию со дня рождения Н.К.Высоцкого. Свердловск. С. 5–9.

1965 г.

75. Методика составления физико-химических диаграмм. – М.: Недра. 89 с.

76. Источники оруденения, связанного с траппами Сибирской платформы // Тез. докл. к конференции по петрологии траппов и связанному с ними оруденению. НИИГА. С. 54–56.

77. Илья Исаакович Гинзбург // ЗВМО. Ч. 94. С. 621–622 (с Е.А.Зверевой и Г.В.Писемским).

1966 г.

78. Соотношение между оруденением, связанным с траппами Сибирской платформы и постмагматическими процессами // Мат-лы ко II конференции по околорудному метасоматозу. Л. С. 305–307.

1967 г.

79. О дифференциальной подвижности компонентов при формировании сульфидных медно-никелевых руд // Геология рудных месторождений. № 2. С. 17–31.

80. Источники оруденения, связанного с траппами Сибирской платформы // Петрология траппов Сибирской платформы // Тр. НИИГА. Т. 151. С. 173–188.

81. Поведение арсенидов и сульфидов никеля и кобальта при послемагматических процессах // Проблемы кристаллизации минералов и эндогенного минералообразования. Л. С. 211–220.

82. Никеленосные провинции СССР // ЦНИГРИ. Вып. 75. С. 178–199.

83. Подготовка сырьевой базы никелевой промышленности и связанные с этим геологические проблемы // Разведка и охрана недр. № 10–11. С. 48–54.

84. Контактные ореолы дифференцированных трапповых интрузий и их поисковое значение // Тр. ЦНИГРИ. Вып. 75. С. 200–216 (с В.В.Юдиной).

85. К вопросу о происхождении никеленосных членов толеитовой формации (физико-химическое исследование) // Тр. ЦНИГРИ. Вып. 80. С. 5–8 (с В.К.Степановым).

1968 г.

86. Магматические месторождения // Генезис эндогенных рудных месторождений. М. С. 7–83.

87. Проблемы формирования медно-никелевых месторождений // Докл. сов. геол. на XXIII сессии Геол. конгресса. Проблема 7. М. С. 7–14.

88. Базальтоидные никеленосные интрузии и условия их формирования // Тез. докл. «Петрология и металлогения базитов». ИГЕМ. С. 86–87.

1969 г.

89. Дифференциация базальтоидных интрузий в зависимости от подвижности FeO и SiO₂ // Очерки физико-химической петрологии. М. С. 22–36 (с В.К.Степановым).

90. Рецензия на книгу Ф.К.Шипулина // Геология рудных месторождений. № 5. С. 132–138.

91. Проблемы базитов // Мат-лы IV Всесоюз. петрограф. совещ. Баку. С. 80–84.

1970 г.

92. Статистическая обработка петрохимических диаграмм А.Н.Заварицкого для эффузивных горных пород // ЗВМО. № 2.

93. Современные проблемы изучения базитового магматизма // Изв. АН СССР. Сер. геол. № 1 (с О.А.Богатиковым и В.П.Петровым).

94. Бадделеит из габбро-долеритов интрузии Норильск-I (Сибирская платформа) // Минералы базитов в связи с вопросами петрогенезиса. М. С. 177–181 (с Е.Д.Надеждиной).

95. Золотоносность дифференцированных интрузивов норильского типа // Тр. ЦНИГРИ. Вып. 87. С. 42–57 (с Л.В.Разиным и О.М.Конкиной).

1971 г.

96. Связь образования никеленосных интрузий с процессами в земной коре и верхней мантии // Петрология базитов. М.

97. Основные задачи исследования базитов

// Петрология и металлогения базитов. М. (с О.А.Богатиковым и В.П.Петровым).

98. Медное оруденение реки Сухарихи (с В.И.Драгуновым и Н.И.Шумской).

99. Гидротермальный синтез пентландита // ДАН СССР. Т. 186. № 5 (с А.П.Лихачевым, Н.Г.Чувикиной, А.Д.Андроновым).

100. Моноклинные пироксены Талнахской дифференцированной интрузии // ЗВМО. Ч. 100. Вып. 5. С. 545–557 (с А.П.Полушкиной и В.К.Степановым).

101. На семинаре по кинетике и динамике геохимических процессов // Геология рудных месторождений. № 4. С. 123–126.

102. Соотношение сульфидной и силикатной частей в ходе эволюции основной магмы // Тез. докл. Международ. геохим. конгр. М. С. 75–77.

103. Физико-химический аспект условий образования медно-никелевых руд Норильского района // Траппы Сибирской платформы и их металлогения. Иркутск. С. 75–77.

104. Физико-химические условия образования сульфидных руд Норильского месторождения // Геология полезных ископаемых Норильского района. Норильск. Мат-лы 2-й Норильской конференции. С. 239–242 (с А.П.Лихачевым).

1972 г.

105. Проблемы базитов // Магматизм, формации кристаллических пород и глубины Земли. Тр. IV Всесоюз. петрограф. совещ. Ч. 1. С. 89–93.

106. О значении коэффициентов распределения никеля при поисках медно-никелевых руд // Научные основы геохимических методов поисков месторождений полезных ископаемых и оценки потенциальной рудности магматических и метаморфических комплексов докембрия. Апатиты (с А.В.Касьяновым, В.И.Кочневым-Первуховым, Л.И.Кравцовой).

107. Диаграмма кристаллизации медно-никелевых руд на постмагматическом этапе их формирования // Тр. ЦНИГРИ. Вып. 109. С. 186–196.

108. О статье С.А.Гулина и Л.Г.Сухова «Некоторые замечания к ликвационно-магматической гипотезе образования медно-никелевых месторождений норильского типа» // Советская геология. № 2. С. 154.

109. Связь образования никеленосных интрузий с процессами в земной коре и верхней

мантии // Петрология и металлогения базитов. М. С. 25–29.

110. Физико-химические условия формирования «юных» золото-серебряных, ртутных и полиметаллических рудных формаций Закарпатья // Тектоника и полезные ископаемые запада УССР. Киев.

1974 г.

111. Пространственно-временная направленность в развитии гипербазитового магматизма на Южном Урале // Тез. докл. 3-го Уральского петрограф. совещ. «Магматизм, метаморфизм и оруденение в геологической истории Урала».

1975 г.

112. О характере связи сульфидного медно-никелевого оруденения с формациями базитов и гипербазитов // Магматизм и полезные ископаемые. М. С. 43–55.

1976 г.

113. Метаморфизм и метаморфогенное сульфидно-никелевое оруденение в гипербазитах Хаутаварской зоны (Карелия) // ЗВМО. Ч. 105. Вып. 2. С. 184–193 (с Е.В.Баташовым).

114. Распределение петрогенных компонентов в гипербазитах на Южном Урале // Геохимия рудообразующих элементов в основных и ультраосновных породах. М. (с И.И.Эдельштейном и др.).

1977 г.

115. Морфогенетический ряд октаэдрит-кубических кристаллов алмаза // ЗВМО. Вып. 6. С. 641–650 (с Л.А.Гуркиной).

116. О перспективах и направлениях исследований работ на никель в пределах Восточной Сибири // Тр. ЦНИГРИ. Вып. 124.

117. Типоморфизм алмаза // Новые данные о типоморфизме минералов и минеральных ассоциаций. М.

1978 г.

118. О принципах прогнозирования сульфидных медно-никелевых месторождений // Тез. симпозиума «Петрогенетические основы формирования сульфидных медно-никелевых месторождений и критерии их прогноза». Петрозаводск (с В.И.Кочневым-Первуховым и др.).

119. Экспериментальные и физико-химические данные о формировании медно-никеле-

вых месторождений // Там же (с А.П.Лихачевым).

1979 г.

120. Магматизм и медно-никелевое рудообразование // Проблемы петрогенеза и рудообразования, корреляция эндогенных процессов. Иркутск. С. 104 (с А.П.Лихачевым).

121. Условия зарождения и кристаллизации рудоносных магм, формирующих медно-никелевые месторождения // Основные параметры природных процессов природного рудообразования. Новосибирск. Т. 1. С. 109–118 (с А.П.Лихачевым).

122. Особенности прогнозирования медно-никелевых месторождений различных эпох развития земной коры // Тр. ЦНИГРИ. Вып. 144 (с Е.В.Баташовым и др.).

123. О книге И.И.Шафрановского и В.Ф.Алявдина «Анатолий Капитонович Болдырев» // ЗВМО. Ч. 108. С. 382–384.

1981 г.

124. Типоморфизм ряда октаэдр-куб кристаллов алмаза // Научные основы использования типоморфизма. М. (с Л.А.Гуркиной).

125. Некоторые методические вопросы изучения расслоенного вещества на примере продуктивной толщи печенгской серии // ЗВМО. Ч. 110. Вып. 1 (с С.О.Фирсовой и др.).

126. Условия образования ультраосновных магм // ЗВМО. Вып. 6 (с А.П.Лихачевым).

127. Морфологические и структурные особенности углеродистого вещества продуктивной толщи печенгской серии // Тез. 5-го Всесоюз. совещ. (с С.О.Фирсовой).

128. Медно-никелевое рудообразование в Норильском районе // Генетические модели эндогенных рудных формаций: Тез. докл. Новосибирск (с А.П.Лихачевым).

129. Магматизм и медно-никелевое рудообразование в докембрии // Металлогения докембрия: Тез. докл. Иркутск (с А.П.Лихачевым).

130. Петрологические особенности, рудоносность и условия формирования базит-гипербазитовых образований в истории развития земной коры // Петрология литосферы и рудоносность: Тез. докл. Ленинград. С. 276–277 (с А.П.Лихачевым).

131. Условия образования и эволюция рудоносных ультраосновных магм // ЗВМО. Вып. 6. С. 646–655 (с А.П.Лихачевым).

132. О принципах прогнозирования медно-никелевых месторождений // Проблемы пет-

рологии в связи с сульфидным медно-никелевым рудообразованием. М. С. 158-142 (с А.П.Лихачевым и др.).

133. Экспериментальные и физико-химические данные о формировании медно-никелевых месторождений // Там же. С. 138-147 (с А.П.Лихачевым).

1983 г.

134. Медно-никелевое рудообразование в Норильском районе // Геохимические модели эндогенных рудных формаций. Новосибирск. С. 47-54 (с А.П.Лихачевым).

1984 г.

135. Типы и особенности проявления рудоносных формаций, образующих медно-нике-

левые месторождения // Тез. докл. 27-й сессии МГК. М. (с А.П.Лихачевым).

1986 г.

136. Types and distinctive features of ore-bearing formations as hosts for copper-nickel deposits // *Geology and Metallogeny of Copper Deposits* (ed. by G.Friedrich et al.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. P. 124-134 (A.P.Likhachev).

1987 г.

137. Типы и особенности проявления рудоносных формаций, образующих медно-никелевые месторождения // Меднорудные месторождения — типы и условия образования. М. С. 4-12 (с А.П.Лихачевым).

ВНИМАНИЮ АВТОРОВ!

При оформлении статей необходимо руководствоваться следующими правилами.

Объем статьи не должен превышать 15 страниц машинописного текста, включая аннотацию (1/3 страницы), таблицы и список литературы. Текст печатается через два интервала, на одной стороне листа; оставляются поля — сверху (2 см), снизу (2 см), справа (1 см) и слева (3 см). Все страницы рукописи нумеруются. В редакцию представляются два экземпляра статьи — распечатка с принтера, а также дискета с текстом в форматах Text format (*.rtf) или 6,0/95 (*.doc) с использованием шрифта Times New Roman Cyr. (размер 12, двойной межстрочный интервал); для таблиц — такой же шрифт (размер 9—10, один межстрочный интервал). В отдельные файлы помещаются статья, список литературы, подписи к рисункам. По окончании работ дискеты по желанию автора возвращаются. Возможна передача статей по электронной почте: E-mail: tsnigri@pol.ru.

Рисунки и другие графические материалы (не более 4) прилагаются к статье в двух экземплярах. На обороте каждого рисунка карандашом указываются его порядковый номер, фамилия автора и название статьи. Размер оригиналов рисунков не должен превышать формат страницы журнала. **Рисунки принимаются на дискетах с распечаткой на бумаге.** Цифры и буквы в условных обозначениях, вынесенных за пределы рисунка, даются курсивом. Текстовые надписи на рисунках набираются на компьютере. Размер букв и цифр не менее 2 мм. Каждый рисунок помещается в отдельный файл в одном из следующих форматов: TIFF bitmap (*.tif), Paint Brush (*.pcx), Encapsulated Post Script (*.eps), Corel Draw (*.cdr), Диаграмма Microsoft Excel (*.xls). Графика должна быть связана с текстом и способствовать его сокращению. **Оформление и содержание иллюстративного материала должны обеспечивать его читаемость после возможного уменьшения (плакатный вариант).** Подрисовочные подписи печатаются на отдельной странице. Цветные рисунки, фотографии и ксерокопии не принимаются. Рисунки, не удовлетворяющие требованиям редакции, возвращаются автору.

Математические формулы и химические символы вписываются в текст четко от руки. Во избежание ошибок следует тщательно писать буквы, имеющие сходные как прописные (подчеркнуть двумя линиями снизу), так и строчные (подчеркнуть сверху) начертания (V, S, O, M, P, Z). Греческие буквы обводятся красным карандашом, латинские — синим (кроме символов химических элементов). Для набора математических формул и химических символов рекомендуется использовать Microsoft Equation 2.0.

Точность приведенных цитат должна быть заверена подписью автора на полях рукописи; обязательно указывается источник по списку литературы.

Список литературы (не более 15 названий) дается сквозной нумерацией в алфавитном порядке. Иностранная литература помещается после отечественной. Ссылки в тексте на источник из списка литературы приводятся соответствующим порядковым номером в квадратных скобках. В список не следует включать работы, на которые нет ссылок в тексте статьи, а также неопубликованные.

Статья подписывается автором (авторами), в конце ее приводятся фамилия, имя и отчество (полностью) автора, место работы, занимаемая должность, ученая степень, адрес, служебный и домашний телефоны.

Рукопись представляется с установленными сопровождающими документами руководством организации или лично автором (авторами).

ВНИМАНИЕ АВТОРОВ

1. Авторы должны представить рукопись в двух экземплярах, один из которых должен быть написан на чистом листе бумаги.

2. Рукопись должна быть написана на русском языке, с использованием кириллицы. Все термины и сокращения должны быть объяснены в начале статьи.

3. Статья должна быть написана в научном стиле, с использованием точных формулировок. Все утверждения должны быть подтверждены фактами или данными.

4. Авторы должны указать источники, использованные при написании статьи. Все ссылки должны быть оформлены в соответствии с требованиями.

5. Авторы должны указать, кто из них является автором статьи. Все авторы должны быть указаны в начале статьи.

