

УДК 553.0:555.261

В.И. Старостин¹, О.Г. Сорохтин²

НОВЫЕ ОСНОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОИСХОЖДЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НОРИЛЬСКОГО ТИПА

В статье рассмотрено происхождение сульфидных платиноидно-медно-никелевых месторождений Норильска и Талнаха, ассоциирующих с триасовыми базальтовыми траппами Сибири. Показано, что рудные элементы этих месторождений (за исключением, быть может, железа) имеют не мантийное, а коровое происхождение, они попали в базальты благодаря ремобилизации (рециклингу) рудных элементов из раннепротерозойских осадков и пород, развитых в фундаменте Сибирской платформы. Приводятся критерии поиска аналогичных месторождений.

Ключевые слова: сульфидные PGE–Cu–Ni месторождения, триасовые базальтовые траппы Сибири, раннепротерозойские породы, рециклинг рудных элементов.

Origin of sulfide PGE–Cu–Ni deposits of in Norilsk and Talnakh associated with Triassic basalt traps of Siberia are considered. It is shown that ore elements of these deposits (probably, except Fe) are derived from mantle rather than crust. They entered the basalts owing to the remobilization (recycling) of ore elements from Early Proterozoic sediments and rocks in the Siberian Platform basement. Criteria of prospecting for analogous deposits are presented.

Key words: sulfide PGE–Cu–Ni deposits, Triassic basalt traps of Siberia, Early Proterozoic rocks, recycling of ore elements.

Введение. Открытие Талнахских месторождений с богатыми сульфидными рудами, локализованными в подошве маломощных (средняя мощность 150 м) силлообразных тел раннетриасового возраста в пределах крупнейшей в мире Сибирской трапповой провинции, существенно повлияло на взгляды о происхождении магматических медно-никелевых руд. Пристальное внимание ведущих мировых исследователей к Норильским месторождениям связано с тремя факторами: гигантским масштабом рудных объектов; предполагаемой ассоциацией месторождений с мезозойскими траппами и тем фактом, что до их открытия все разрабатываемые крупные месторождения медно-никелевых и платиновых руд были связаны с гигантскими протерозойскими ультрабазит-базитовыми плутонами. Обнаружение нового типа руд не только изменило ситуацию на мировом сырьевом рынке, но и принципиально сказалось на развитии теории магматического рудообразования. Если гипотеза о генетической связи оруденения с траппами верна, то появляются грандиозные перспективы открытия подобных месторождений на всех континентах, учитывая масштабы мезозойского траппового магматизма. Однако разноплановые работы (региональные, детальные, тематические, геолого-разведочные и др.) последних 25 лет позволяют сделать вывод, что такой связи нет. Поэтому взгляды исследователей постепенно эволюционируют. Рассмотрим этапы этой эволюции.

Уникальные платиноидно-медно-никелевые месторождения Норильского района характеризуются длительной и многоэтапной историей формирования. Фундамент региона, состоящий из архейских кристаллических комплексов и нижне-среднепротерозойских вулканогенно-осадочных отложений, в последующей истории испытал многократные тектоно-магматические преобразования. В результате консолидации разновозрастных гетерогенных глыб археид и ранних карелид возникли протяженные долгоживущие линейменты раннепротерозойского заложения — рифтогенные структуры.

По мнению крупного специалиста в металлогении этого региона О.А. Дюжикова [Дюжиков, 2004], в позднюю фазу герцинского тектоногенеза в позднепалеозойское—раннемезозойское время произошел распад единой докембрийской Северо-Азиатской суперплатформы на ряд структур, прежде всего на Западно-Сибирскую плиту и Сибирскую платформу, между которыми расположены Приенисейский перикратонный прогиб и Норильско-Таймырская система поднятий и впадин, фиксирующих высоко-мобильную в докембрии и палеозое субдукционную зону. Месторождения региона связаны с трехлучевой пермо-триасовой системой рифтов и расположены в зоне Енисейско-Хатангского глубинного разлома.

Относительно норильских месторождений существует несколько гипотез: ликвационно-магматическая [Котульский, 1946; Годлевский, 1959],

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, заведующий кафедрой геологии и геохимии полезных ископаемых, профессор, e-mail: star.@geol.msu.ru

² Это последняя статья с участием О.Г. Сорохтина. Рукопись просмотрена им 25 мая 2010 г., а 10 июня 2010 г. О.Г. Сорохтин ушел из жизни.

гидротермальная [Елисеев, 1958], инфильтрационно-метасоматическая [Золотухин, 1964] и регенерационная [Роговер, 1959]. В последней основным источником металлов предполагалось древнее пневматолиито-гидротермальное месторождение, поглощенное внедрившейся трапповой магмой.

Однако большинство исследователей рассматривали формирование норильских месторождений в условиях закрытой магматической системы из расплавов основного состава с повышенной магнезиальностью, обогащенных летучими компонентами. Становление рудоносных массивов предполагалось на заключительном этапе формирования трапповой формации в результате самостоятельного магматического цикла [Годлевский, 1959]. Существенно позже, исходя из близости геохимического состава интрузивов и лав, а также обедненности одной из свит — надеждинской — цветными и благородными металлами, появились представления об образовании норильских месторождений в условиях открытой проточной магматической системы из обычных толеитовых расплавов при движении их от источника к поверхности, формирование сульфидов происходило при этом за счет взаимодействия магм с вмещающими породами [Lightfoot, 1993; Naldrett, 2003].

Эта точка зрения получила широкое распространение. Такое происхождение предполагается для крупнейших медно-никелевых месторождений: Джиньчуань, Калатонгке (Китай), Войсис Бэй (Канада) и др. Несмотря на привлекательность предложенной модели, она имеет ряд недостатков, например отсутствуют доказательства связи интрузивных и эффузивных образований в Норильском районе. Эта проблема обусловлена двумя главными факторами: 1) залеганием большей части интрузивных тел норильского интрузивного комплекса, несущего оруденение, значительно ниже в стратиграфическом разрезе, чем вулканы, — среди терригенно-осадочных пород девона—перми; поэтому реальные взаимоотношения между лавами и интрузивами отсутствуют; 2) близостью абсолютного возраста всех магматических образований района, сформированных в течение короткого промежутка времени (0,3 млн лет), так что любые геохронологические методы не дают истинных представлений о возрастных соотношениях различных пород и образуемых ими комплексов. Ряд исследователей надеются решить эту проблему, применяя прецизионные методы исследования пород и минералов, в частности данные по распределению редких элементов в породах [Кривошукская, 2010].

Д.А. Додин, Н.М. Чернышев, Д.В. Полферов и Л.Л. Тарновецкий [1994] разработали шестиэтапную петролого-геодинамическую модель формирования Норильских месторождений. В основу модели положена длительная история развития Таймыро-Норильской рудномагматической системы, которая включает и дорудный этапы (PR–P₂) (рис. 1). Важную роль авторы придают коллизии Таймыро-Се-

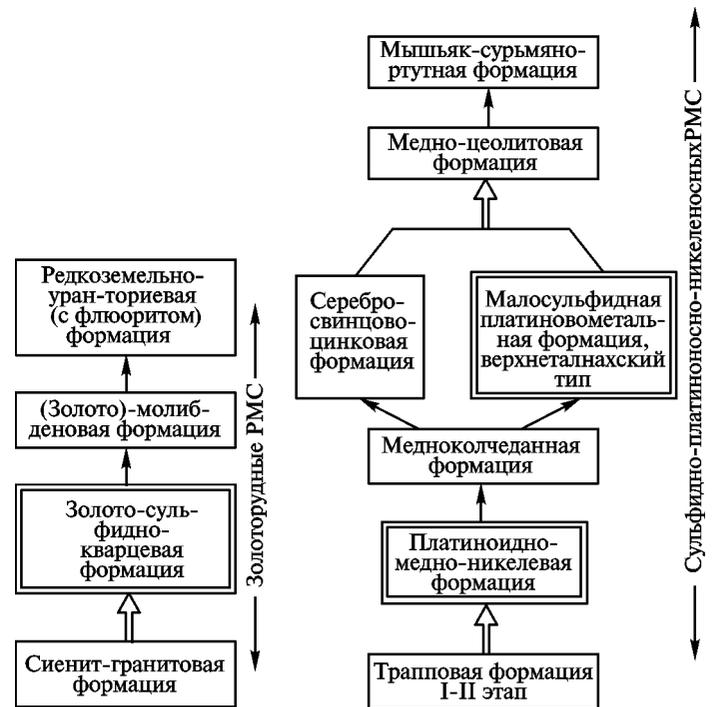


Рис. 1. Предполагаемые пространственно-временные сопряженные ряды рудных формаций — элементов развития рудномагматических систем, связанных с трапповым и гранитоидным магматизмом Таймыро-Норильской провинции, по [Додин и др., 1994]

роземельской области с Сибирской платформой в ранней перми, когда в результате субдукции океанической коры морские отложения, погруженные в подошву платформы стали основным источником воды, серы, хлора, фтора и галогенидов для мощных флюидных потоков. В вершинах мантийного диапира

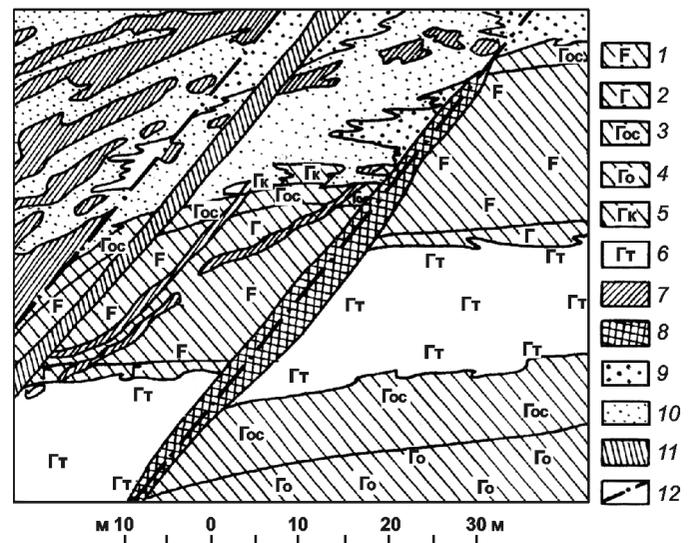


Рис. 2. Соотношение интрузивных пород в одном из пересечений Верхней Талнахской интрузии, по [Сухов, Борисов, 1982]: 1 — 5, 7 — горизонты интрузии (1 — лейкогаббро; 2, 3, 4, 7 — долериты безоливиновые, оливиновые, контактовые, такситовые); 6 — долериты постинтрузивного этапа; 8 — хромшпинелид-оливиновые породы — шпинелевые троктолиты; 9, 10 — скарноиды и кальциферы (9 — оруденелые, 10 — безрудные); 11 — микродолерит послерудного этапа; 12 — разрывные нарушения

при парциальном плавлении истощенной мантии формировались мафитовые магмы с максимумом потока водного флюида. Производные флюидизированных магм стали родоначальными расплавами интрузий норильско-талнахского и неконгдоконского типов.

Исключительно важный вклад в изучение Талнахских месторождений внесли исследования Д.М. Туровцева [2002], посвященные контактовому метаморфизму интрузивных комплексов региона. Он показал, что магматические тела норильского типа сопровождаются наиболее мощными ареалами контактово-метасоматических образований по сравнению с безрудными интрузивами, почти вдвое превосходящими размеры рудоносных массивов. Экзоконтактовые прожилково-вкрапленные и брекчиевидные сульфидные руды содержат значительную

долю запасов металлов месторождения и локализованы в ареалах развития апоскарновых гидрогранат-серпентиновых метасоматитов и брусититов, которые замещают монтичеллитовые и форстеритовые скарны. (рис. 2, 3).

В серии работ Д.А. Додина [1994, 2002] и О.А. Дюжикова [2004] сделан фундаментальный для металлогении Норильского района вывод: наличие флюидной фазы под высоким давлением и в большом объеме контролировало пространственно-временное перемещение силикатного, сульфидного и малосульфидного платиноидного расплавы, это определяющий фактор металлонасыщенности всей рудно-магматической системы. Ремобилизация перегретыми расплавами, флюидами и рециклинговыми нагретыми водами служила эффективным механизмом поставки металлов из вмещающих пород в рудные тела и причиной

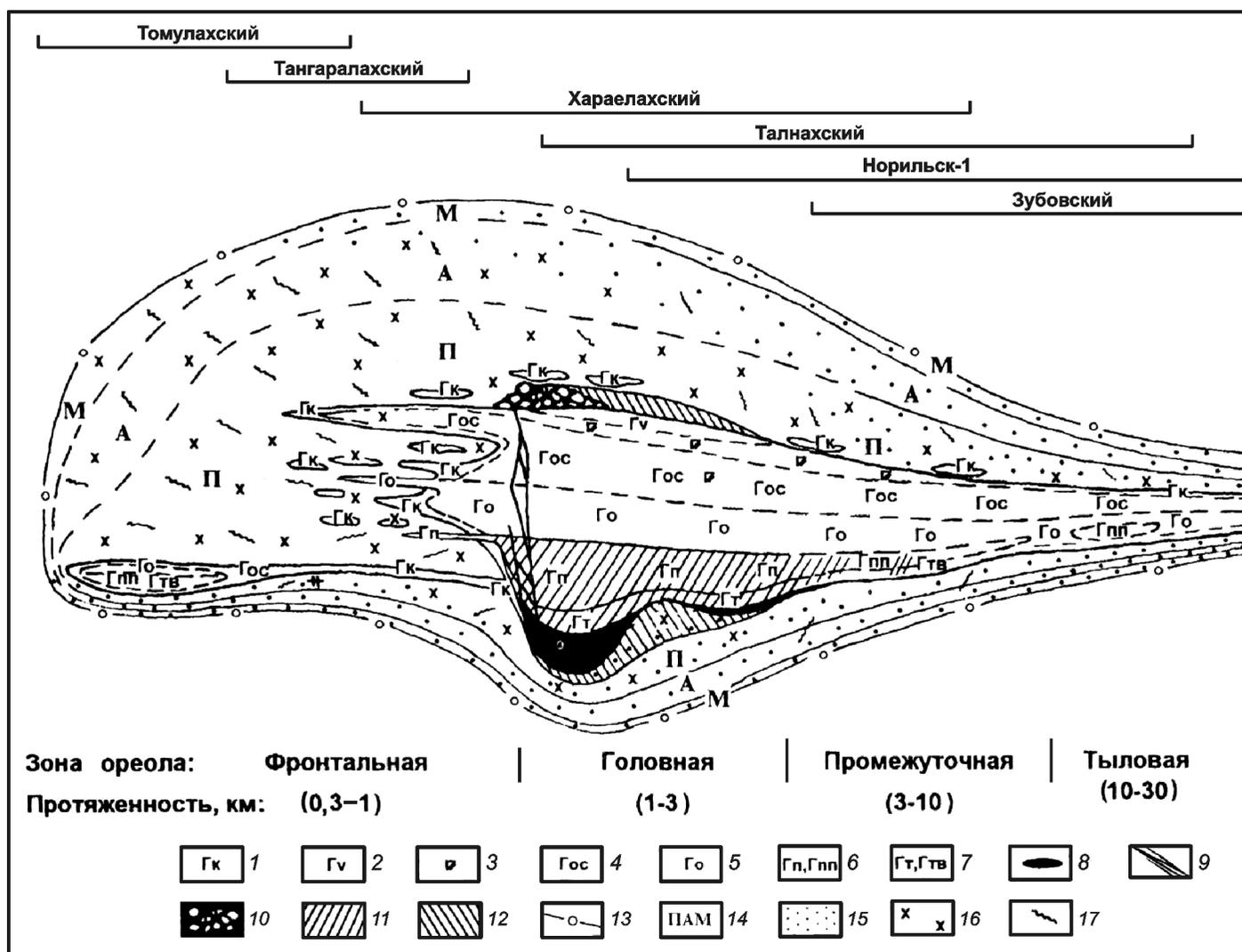


Рис. 3. Модель латеральной и вертикальной зональности контактово-метаморфических ореолов дифференцированных гипербазит-базитовых интрузивов Норильского района, по [Туровцев, 2002] : 1-7 — интрузивные породы: 1 — краевые контактовые габбродолериты, 2 — гибридно-метасоматические породы, 3 — габбро-диориты, 4-7 — габбродолериты (4 — безоливиновые, оливиносодержащие, 5 — оливиновые, 6 — пикритовые, пикритоподобные, 7 — такситовые, такситовидные); 8-12 — руды сульфидные: 8 — массивные, 9 — прожилковые, 10 — брекчиевидные, 11 — вкрапленные в интрузиве, 12 — экзоконтактовые; 13 — внешний контур ореола; 14 — метаморфические фации роговиков и мраморов (П — пироксен-роговиковая, А — амфибол-роговиковая, М — мусковит-роговиковая); 15 — метаморфиты; 16 — метасоматиты; 17 — гидротермалиты. Вверху — соответствие реальных околоинтрузивных ореолов зонам модели

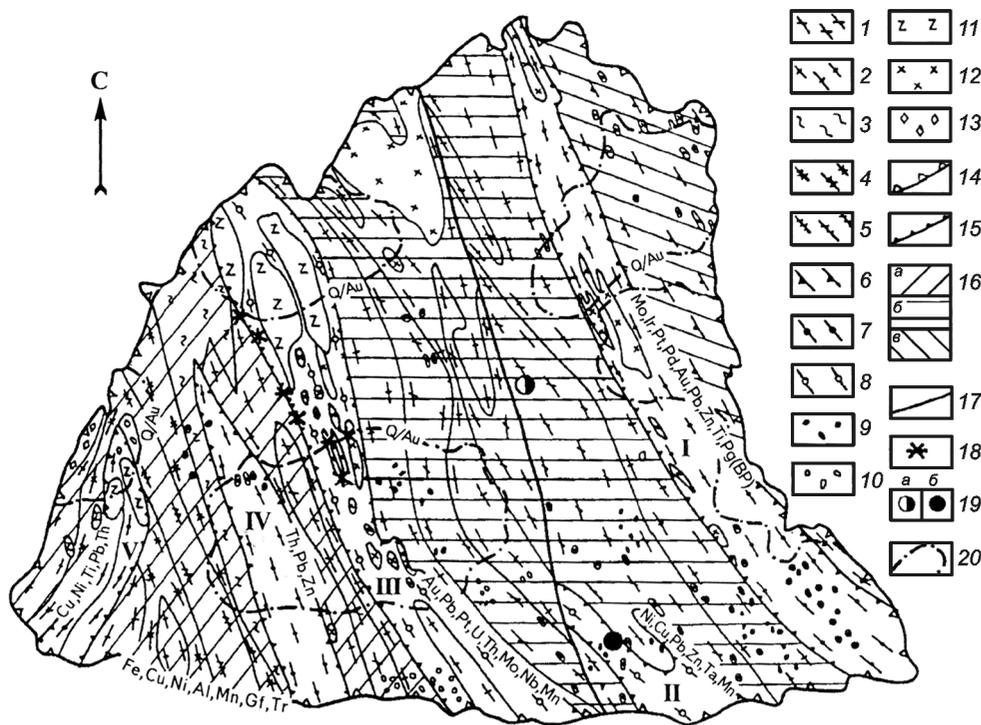


Рис. 4. Схема минерагенического районирования Анабарского щита, по А.Н. Вишневному из [Додин и др., 2001]. Формации гранулитовых раннеархейских метаморфических комплексов: Анабарский комплекс: 1 — кварцит-эндербитовая, хемогенно-вулканогенная (базальтовая); 2 — эндербитовая (вулканогенная — андезитовая); 3 — чарнокитовая (вулканогенная — андезито-риолитовая); 4 — гнейсоэндербитовая (карбонатно-терригенная); 5 — мрамор-гнейсоэндербитовая (карбонатно-терригенно-вулканогенная — андезитовая); Хапчанский комплекс: 6 — мрамор-гнейсовая (карбонатно-терригенная). Формации позднеархейских—раннепротерозойских диафоритов по раннеархейским гранулитовым комплексам: 7 — гранито-гнейсовая (высокотемпературная амфиболитовая фация); 8 — гнейсосланцевая (средне-низкотемпературная эпидот-амфиболитовая фация). Магматические формации: 9 — метаультрабазит-базитовая (раннеархейская); 10 — мигматит-гранитовая, в том числе чарнокитовая (раннеархейская—позднеархейская); 11 — анортозит-габбро-норитовая (позднеархейская); 12 — гранодиорит-гранит-сиенитовая (позднеархейско—раннепротерозойская); 13 — гранитовая, в том числе пегматитовая (раннепротерозойская). Границы: 14 — Анабарской минерагенической провинции; 15 — структурно-металлогенических зон: Билляхской (I), Харапской (II), Монхоолинской (III), Ламуйской (IV), Чурбукулахской (V); 16 — минерагенические области Анабарской провинции (а — Центрально-Анабарская, б — Маганская, в — Хапчанская); 17 — Анабарский глубинный разлом; 18 — проявления урана; 19 — проявления золота (а — россыпного, б — коренного); 20 — ореолы рассеяния

возникновения уникальных, не имеющих аналогов по набору полезных компонентов норильских руд. Произошло добавление к мантийному магматическому рудному веществу значительной массы Cu, Au, Ag и минералов платиновой группы (МПГ), извлеченных из медистых песчаников игарского типа, возможных древних медно-молибденовых месторождений, черносланцевых толщ или пород зеленокаменного пояса.

На возможный регенеративный механизм возникновения наиболее поздней гидротермальной Co—Ni—Sb—As минерализации в Норильском рудном поле указали в детальной монографии Э.М. Спиридонов и Ю.Д. Гриценко [2009]. Основным источником рудных элементов в этой ассоциации были метаморфизируемые Ag—Au—Pt—Pd—Co—Ni—Cu сульфидные руды региона. Авторы делают исключительно важное для теории эндогенного рудообразования предположение: «Норильская регенеративная метаморфогенно-гидротермальная модель — одна из возможных для

пятиметальной U—Ag—Bi—Ni—Co рудной формации» [Спиридонов, Гриценко, 2009, с. 217].

Континентально-коровое происхождение Норильских месторождений. Уникальные Норильское и Талнахское медно-никелевые месторождения, ассоциирующие с мезозойскими базальтовыми траппами на северо-западе Восточно-Сибирской платформы [Мусатов и др., 1990; Старостин, Игнатов, 2004; Старостин, 2004; Старостин, Сорохтин, 2004], — яркий пример вторичной мобилизации (рециклинга) более древних рудных образований, тогда как большая часть этих траппов, простирающихся далеко на юго-восток от Норильского района, почти полностью безрудна. Кроме того, в мезозое **благодаря многократному конвективному перемешиванию вещества мантии, ее состав уже был достаточно однороден без включения в него объемов, богатых рудными элементами** [Сорохтин, 2007]. Это позволяет предположить, что руды норильских месторождений, хотя и находятся в формации базальтовых траппов, но генетически с ними не связаны. Об этом же свидетельствуют и базальтовые траппы в других

регионах мира, например траппы Декана (Индия) и Эфиопии, составы которых близки к составам сибирских траппов вне районов Норильска и Талнаха; все они близки по составу, но безрудны. Аналогичная ситуация наблюдается и с базальтами срединно-океанических хребтов, протянувшихся по дну Мирового океана на 60 тыс. км. Везде эти базальты выплавились из мантии, обладают близким составом, но все они также безрудные.

Поэтому можно сделать вывод, что **медно-никелевые норильские и талнахские руды попали в базальтовые покровы Сибири не из мантии.** Об этом же говорит и концепция развития Земли, согласно которой после выделения земного ядра и установления режима развития геологических процессов по законам тектоники литосферных плит конвективные движения в мантии за 2,5 млрд лет хорошо перемешали ее вещество и сделали его однородным без каких-либо заметных

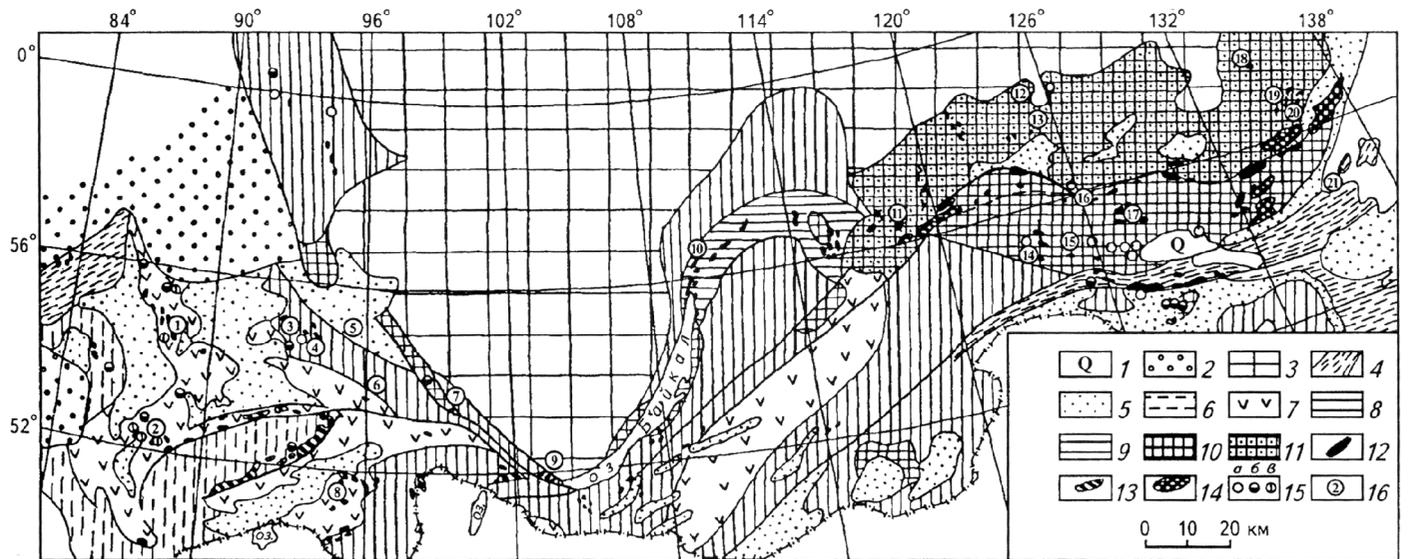


Рис. 5. Схема размещения ультрабазит-базитовых массивов в складчатых структурах Южно-Сибирского и Дальневосточного регионов [Платиноносность ..., 1995]: 1 — четвертичные отложения; 2 — мезозойско-кайнозойский чехол Западно-Сибирской плиты; 3 — чехол Сибирской платформы; 4–11 — складчатые комплексы: 4 — герцинский, 5 — среднепалеозойские и мезозойские комплексы межгорных прогибов, 6 — каледонский, 7 — салаирский, 8 — протерозойский, 9 — протерозойский эвгеосинклиальный Байкало-Муйской зоны, 10 — архейско-нижнепротерозойский, 11 — архейский; 12 — ультрабазит-базитовые массивы; 13 — альпинотипные гипербазиты; 14 — габбро-анортозитовые массивы; 15 — районы проявления различных типов платинометалльной минерализации в россыпях (а — сперрилитовой, б — рутениридосминовой, в — ферроплатиновой); 16 — проявления коренной платиновой минерализации в ультрабазит-базитовых массивах (цифры в кружках): 1 — Среднетерсинский, 2 — Аталыкский, 3 — Нижнедербинский, 4 — Аргыджеский, 5 — Кингашский, 6 — Запевахиинский, 7 — Тактыгойский, 8 — Куртугойский, 9 — Малозадойский, 10 — Йоко-Довыренский, 11 — Чинейский, 12 — Инагли, 13 — Таежное месторождение, 14 — Лукинда, 15 — Веселкинский, 16 — Тантрак, 17 — Лучанский, Ильдеус, 18 — Кондер, 19 — Сыбах, 20 — Чад, 21 — Феклистов

рудных аномалий. Откуда же тогда появились руды платины, никеля, меди и сульфидов железа?

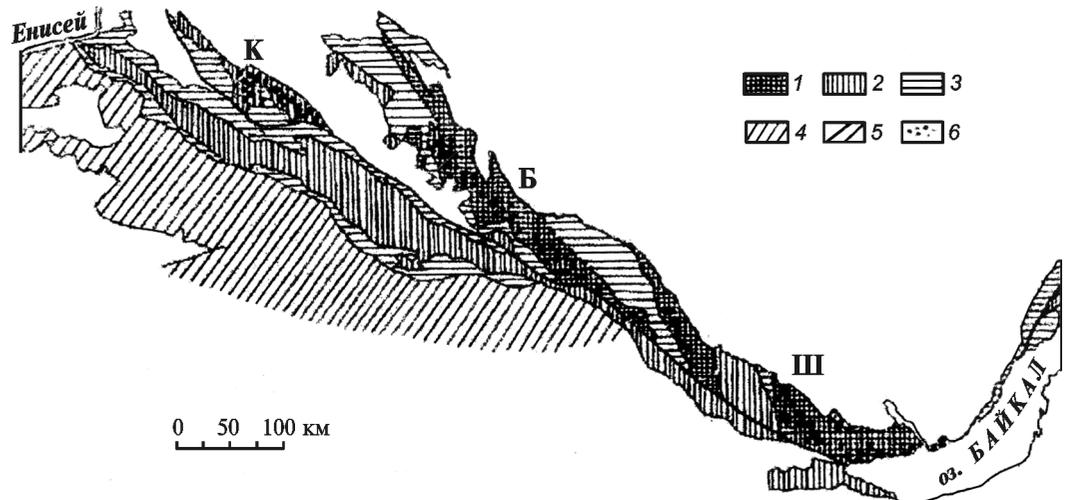
Единственное предположение, которое можно сделать, — считать, что **руды Норильского района поступают в базальты из континентальной коры благодаря мобилизации (рециклингу) находящихся в ней рудных элементов.** Но для рассмотрения этого предположения необходимо определить вероятный состав фундамента и отложений раннего протерозоя, строение и предполагаемый состав Тунгусской синеклизы и Талнахского прогиба.

По данным В.Е. Хаина [2001], основание Сибирской платформы сложено блоками архейского воз-

раста, однако их объединение в единую платформу и ее консолидация, по-видимому, произошли в конце раннего протерозоя. Тунгусский мегаблок обнажен на крайнем юго-западе, на западе он окаймлен Енисейским подвижным поясом с выходами нижнедокембрийских пород. Этот пояс отличается присутствием мощных нижнепротерозойских осадочных и магматических образований, возникших вероятнее всего в условиях активных континентальных окраин.

Поэтому следует ожидать, что в этих мощных осадочно-магматических толщах раннедокембрийского возраста может присутствовать и весь набор полезных ископаемых, столь характерных для этой

Рис. 6. Саянская никель-платиноносная провинция, по [Глазунов и др., 2003] в границах Канско(К)-Бирюсинско(Б)-Шарыжалгайского(Ш) террейна. Тектоническая основа по А.И. Сезько (1990): 1 — раннеархейские блоки, 2 — позднеархейские блоки, 3 — раннепротерозойские трюги и прогибы, 4 — область каледонской складчатости, 5 — разломы глубинные и региональные, 6 — тела ультрамафитов Саянской никель-платиноносной провинции. Выступы цоколя платформы: К — Канский, Б — Бирюсинский, Ш — Шарыжалгайский



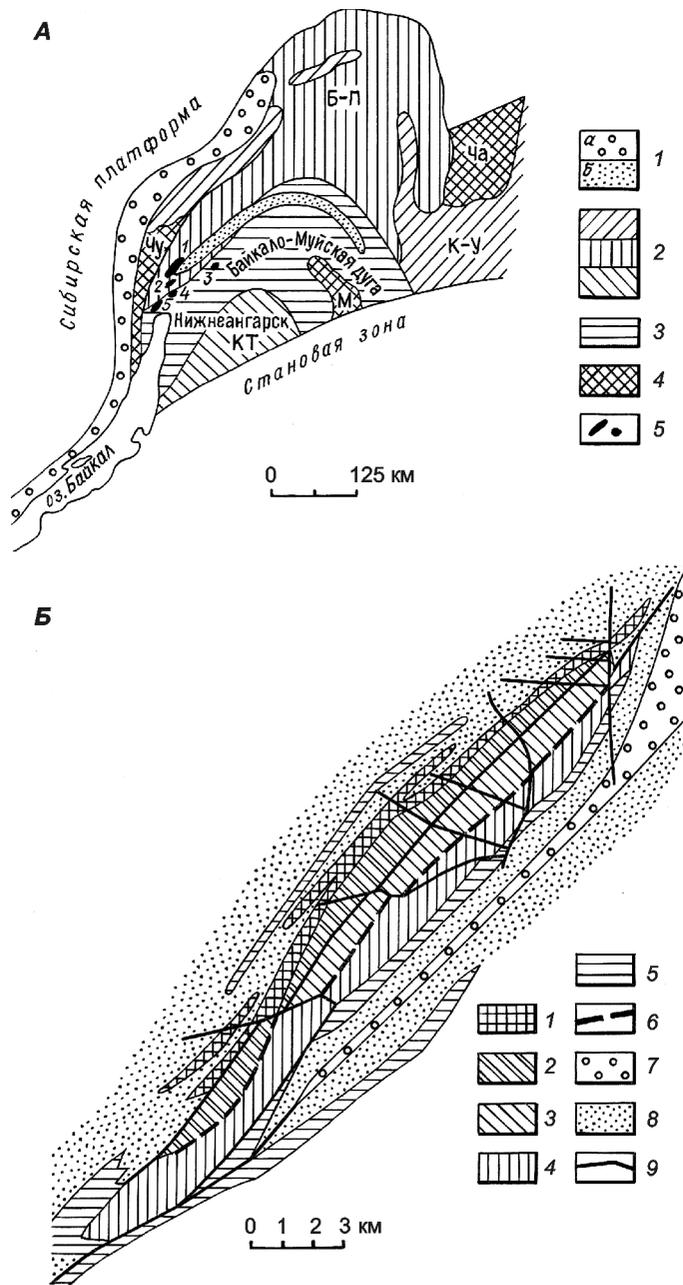


Рис. 7. Схема геологического строения Северо-Байкальской никеленосной провинции (А), по [Конников и др., 1994]: 1 — раннепротерозойская Аkitканская (а) и позднерифейская Сын-нырская (б) рифтогенные структуры; 2 — раннепротерозойский Кодаро-Удоканский (К-У), позднерифейские Байкало-Патомский (Б-П) и Котерский (КТ) периокеанические бассейны; 3 — позднерифейская Байкало-Муйская энсиматическая островная дуга; 4 — выходы архейского кристаллического фундамента (Чу — Чуйский, Ча — Чарский, М — Муйский); 5 — никеленосные ультрамафит-мафитовые плутоны: 1 — Йоко-Довыренский, 2 — Авкитский, 3 — Чайский, 4 — Гасан-Дякитский, 5 — Ньюндуканский, а также и схема геологического строения Йоко-Довыренского дунит-троктолит-габбрового массива (Б): 1 — плагиоклазовые перидотиты; 2 — плагиоклазовые дуниты, верлиты; 3 — ритмическое чередование плагиоклазовых дунитов, троктолитов, оливиновых габбро; 4 — оливиновые габбро и габбро-нориты; 5 — силы гранофировых габбро-норитов; 6 — положение критической зоны с платиновым горизонтом (Риф 1); 7 — эффузивы (трахилипартиты, трахидациты, андезиты); 8 — кварциты, известняки, сланцы, песчаники; 9 — разрывные нарушения

уникальной металлогенической эпохи. Так, в западной части Анабарского щита А.А. Кузнецов [2001] выделил Котуйканскую никеленосную зону в Котуйкан-Харапской структурно-фациально-формационной зоне, вмещающую медно-никелевое оруденение в ультрамафитах и габбро-норитах аллареченского типа. В пределах Западно-Анабарской субпровинции Ламуйская и Монхоолинская зоны характеризуются Au-Pd-Pt специализацией с Cu, Ni, U, Th, Mo, Mn (рис. 4).

В выходящих на поверхность структурах фундамента южной части Сибирской платформы также широко развит весь набор типичных для раннего докембрия рудных образований, в том числе и Cu-Ni с платиноидами минерализация (рис. 5-8).

На Алданском щите выделены ранне- и позднеархейские метадунит-гарцбургитовые формации с проявлениями хрома, никеля и платиноидов; метакоматиит-базальтовые с медью, никелем и платиноидами; раннепротерозойская метаанортозитовая формация с титаном, железом, фосфором и платиноидами и ряд других [Жижин и др., 2001].

На южной окраине Северо-Азиатского кратона в пределах Енисейско-Шарыжалгайской архейской гранито-гнейсовой области в 60-е гг. XX в. выделена вторая по масштабам на Сибирской платформе Саянская никель-платиноносная провинция [Глазунов и др., 2003] (рис. 6). В ее пределах описаны Канский и Бирюсинский зеленокаменные пояса с многочисленными (более 100) телами ультрабазитов, характеризующихся аномально высокой сульфидно-никелевой и платиноидной минерализацией. В наиболее рудоносном Канском поясе открыто и разведано уникальное по запасам и содержанию рудных компонентов (Pt, Pd до 17 г/т; Ni >1%) Кингашское месторождение, локализованное в пикрит-коматиитовом комплексе, выполняющем линейный трог. Тренды распределения сульфидов и платиноидов в породах и рудах месторождения аналогичны подобным характеристикам месторождений Сёдбери, Печенги и Мончетундры.

К докембрийским расслоенным ультрабазит-базитовым массивам в рифтогенных структурах на юге Сибирской платформы, с которыми связан широкий спектр рудной минерализации, относятся Чинейский и Йоко-Довыренский плутоны [Гангальский, 2010; Гангальский и др., 2006; Толстых и др., 2008]. Уникальные по масштабам Чинейское и пространственно с ним ассоциирующее медное Удоканское, а также редкометальное Катугинское месторождения формировались в раннепротерозойский металлогенический этап развития Земли. С массивами чинейского комплекса ассоциируют руды ранне- и позднемагматические железо-титан-ванадиевые; позднемагматические медные с элементами платиновой группы (ЭПГ); пневматолито-гидротермальные (Fe-Cu-Au-Ag); гидротермально-метасоматические уран-редкометальные и гидротермальные полиметаллические жильные.

Йоко-довыренский расслоенный дунит-трактолит-габбровый массив образовался в Олоkitской рифейской полеорифтовой структуре, приуроченной к границе Байкало-Патомского палеобассейна и Байкало-Муйской энсиматической островной дуги (рис. 5, 7). Все эти структуры развиты в мощных карбонатно-терригенных толщах раннего протерозоя и рифея, метаморфизованных в зеленосланцевой и амфиболитовой фациях [Толстых и др., 2008]. С плагиоклазовыми лерцолитами краевой зоны массива и их силлоподобными апофизами связано Байкальское медно-никелевое сульфидное месторождение.

Выделяют сингенетический и эпигенетический типы руд. Для первого характерны низкое содержание пентландита, повышенная концентрация халькопирита, ильменита и наличие сульфоарсенидной минерализации. Формирование эпигенетического типа, слагающего жилы и зоны дробления, связывают с наиболее молодым палеозойским этапом деформаций. Для него характерно в целом более высокое содержание кобальта, никеля и меди. В целом ЭПГ и золото связаны с сульфидными медно-никелевыми рудами и характеризуются низкими значениями концентрации. При этом максимальное содержание наблюдается в жильном типе, а минимальное — в сингенетическом.

Согласно многокомпонентной диаграмме хондрит-нормированных концентраций меди, никеля и благородных металлов в пересчете на 100%-ный сульфид руды Байкальского месторождения по спектрам распределения схожи, но жильные отличаются более низкой концентрацией ЭПГ и золота (рис. 8). По профилям ЭПГ и величине отношения $(Pt+Pd)/(Ru+Ir+Os)$ они близки рудам месторождения Войсис Вэй, занимая промежуточное положение между рудами Талнаха и Джинчуан.

Для Забайкальского региона установлена аномальная насыщенность не только уникальными и крупными рудными месторождениями, но и многочисленными более мелкими полигенными и полихронными минеральными образованиями. Именно для этой провинции характерны последовательные ступени регенерации и переотложения рудного вещества в масштабе всей геохронологической шкалы от позднеархейских до неоген-четвертичных. Это можно проиллюстрировать на примере Удокан-Чинейской рудномагматической системы, развитие которой, согласно [Гангальский, 2010], протекало в несколько тектоно-металлогенических этапов с последовательной регенерацией медного оруденения: 1) раннепротерозойский Кадаро-Удоканский прогиб (габброиды Чинейского комплекса); 2) венд-кембрийская Верхнекаларская впадина (габбро-диабазы Доросского комплекса); 3) мезозойские Верхнекаларская впадина и Чукчудинский грабен (базальты депрессий и дайки); 4) кайнозойская Верхнекаларская впадина (базальты Удоканского лавового

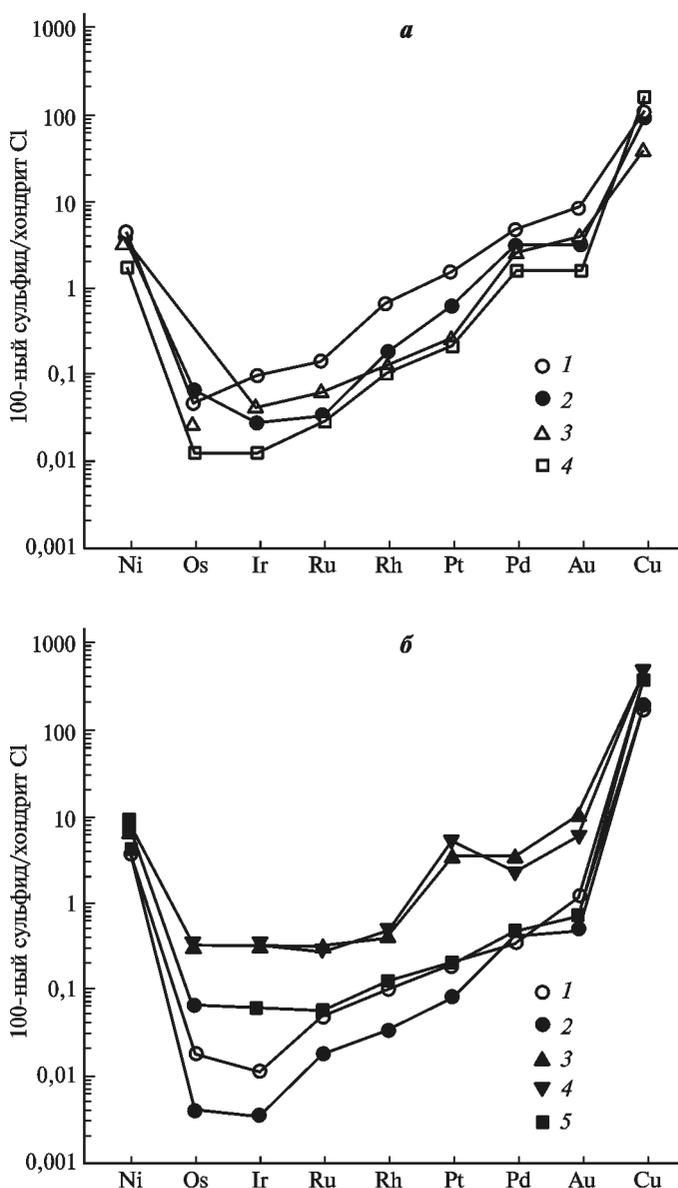


Рис. 8. Распределение нормированного по хондриту CI [Naldrett, Duke, 1980] содержания благородных металлов, никеля и меди, пересчитанных на 100%-ный сульфид, в сульфидных рудах медно-никелевых месторождений: а — Байкальское месторождение, по [Толстых и др., 2008]: 1 — рассеянно-вкрапленные (бедные) в плагиоклазовых перидотитах; 2 — густовкрапленные (богатые) в плагиоклазовых перидотитах; 3 — жильные (сплошные и брекчиевидные); 4 — вкрапленные в габбронорит-диабаззах; б — месторождение Войсис Вэй, по [Налдретт, 2003]: 1 — вкрапленные в такситовых троктолитах; 2 — массивные руды зоны Овоида. Вкрапленные руды месторождения Джинчуан, по [Налдретт, 2003]: 3 — рудное тело № 24; 4 — рудное тело № 1; 5 — рудное тело № 2

плато и дайки). С каждым из этих этапов связана разная генетическая медная минерализация от высокотемпературной магматогенной, ассоциирующей с основным—ультраосновным магматизмом, до средне-низкотемпературной гидротермальной и экзогенной осадочно-диагенетической.

Эти процессы развивались на базе архейско-протерозойской континентальной коры аномально обогащенной сидерофильными и халькофильными элементами. Поскольку процессам рециклинга бо-

лее активно подвержены мобильные халькофильные элементы, то масштаб их переотложения в более молодых структурно-вещественных комплексах значительно превосходит таковой сидерофильных новообразований. Развитие рудно-магматических систем во времени характеризовалось тесной связью трех факторов: эндогенного и экзогенного рудогенеза, а также масштаба гомогенизации состава мантии.

Таким образом, на всех территориях, где докембрийский фундамент Сибирской платформы доступен для исследования, широко представлена медно-никелевая с платиноидами минерализация.

Поэтому вполне естественно предположить, что именно ремобилизация (рециклинг) рудных элементов из позднеархейских—раннепротерозойских отложений и магматических пород и послужила источником насыщения безрудных базальтов сульфидами меди и никеля, платиноидами, частично железом. При этом железо в пирротины могло поступать непосредственно из базальтов. Характерно, что мезозойские базальты в тех рудных районах (в частности, в эпидотизированных базальтах позднего мезозоя в Чукчудинском грабене), где раннепротерозойский фундамент содержит медно-никелевую минерализацию, часто обогащены этими элементами (0,1% Cu и 0,06% Ni) [Гангальский, 2010; Ступак и др., 1987].

В последние 10–15 лет открыты крупные магматические медно-никелевые с платиноидами месторождения не в типичных для этого типа рудных объектах рифтовых платформенных обстановок, а в пределах мобильных орогенных поясов и островных дуг, например Войсис Бэй в Канаде и др. Формирование этих поясов протекало в три этапа: 1) образование активной окраины континента, 2) коллизия, 3) постколлизийный этап. Месторождения образовывались в постколлизийный этап в неоконтинентальных условиях в сдвиговых зонах, характеризующихся широкими проявлениями высококалийного известково-щелочного магматизма.

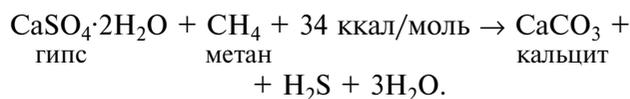
В качестве примера можно отметить ряд месторождений Центрально-Азиатского орогенического пояса, к которому приурочены месторождения Джиньчуан, Калатонгке (Китай) и др. [Дистанов, Оболенский, 1994; Xie-Yan Song et al., 2009; Xie-Yan Song, Xiang-Ren Li, 2009]. Возраст вмещающих их интрузий варьирует в широких пределах; для месторождения Джиньчуань — от 1508 до 827 млн лет; для месторождения Калатонгке — 287 млн лет, а для рудоносных интрузий, развитых в Хуангшанской металлогенической зоне, — от 285 до 216 млн лет.

По многим минералогическим и петролого-геохимическим характеристикам эти месторождения отличаются как между собой, так и от раннепротерозойских. Причины отличий связаны с влиянием щелочных флюидов на разных стадиях развития открытых рудномагматических систем. Особенно существенно метасоматическое воздействие флюидов

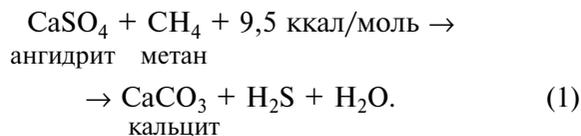
на масштаб ремобилизации платиноидов и редкоземельных элементов. По петролого-геохимическим характеристикам источником рудосных магм во всех изученных объектах была испытывавшая частичное плавление метасоматизированная мантия. Ее рудный потенциал определяется возрастом мантии. Наиболее богата медью, никелем и платиноидами раннепротерозойская мантия.

Современная (и мезозойская) мантия практически стерильна в отношении скоплений рудных элементов — все такие элементы в фанерозое уже были равномерно распределены («размазаны») по всей массе мантии и характеризовались сравнительно низким содержанием.

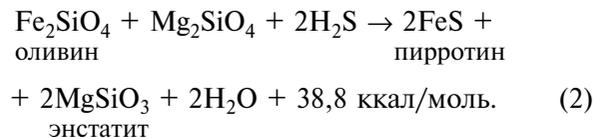
В таком варианте базальтовые расплавы, внедрившиеся в Норильский регион, могли насыщаться рудными элементами в заметном количестве, только прорывая раннепротерозойские рудоносные образования или продукты их последующей переработки, например в корях выветривания раннего рифея. При этом, по-видимому, важную роль играло то обстоятельство, что древние авлакогены, в которые внедрялись базальты, были заполнены сульфатными (гипсоносными) отложениями, содержащими в заметном количестве углеводороды. В результате оказались возможными важные эндотермические реакции освобождения исключительно активного минерализатора — сероводорода H_2S с привнесением тепла от горячих базальтов (для гипса $Q \approx 34$ ккал/моль):



Аналогично этому, преобразование ангидрита происходит по реакции

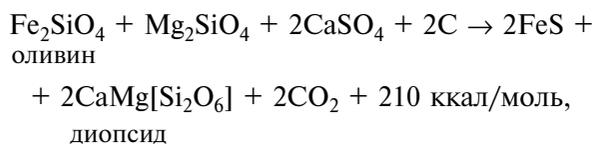


Образование сульфидов железа по силикатам происходит уже по экзотермической реакции с выделением тепла и разрушением исходных силикатов

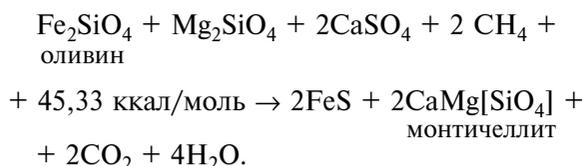


Напомним, что в этих реакциях выделяется вода в газообразном состоянии с $\Delta H_f^0 = 57,8$ ккал/моль, а не жидкая вода, для которой $\Delta H_f^0 = 68,3$ ккал/моль.

Внедрения базальтов в гипсо-угленосные толщи приводят к образованию диопсида также по экзотермической реакции с выделением тепла

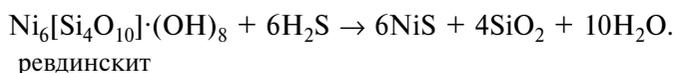


а при внедрении горячих базальтов в осадочные толщи, пропитанные углеводородами, образуется монтичеллит, но уже по эндотермической реакции с поглощением тепла:



Медь в расплавы могла поступать непосредственно из широко развитых на Сибирской платформе протерозойских и рифейских авлакогенов, заполненных терригенным материалом. Развитие в толщах таких отложений красноцветных кор выветривания обычно сопровождается образованием медистых песчаников и сланцев в основном сульфидного состава: халькозина (Cu_2S), борнита (Cu_5FeS_4) и халькопирита (CuFeS_2) [Наркелюн, и др., 1983].

Таким образом, проблема происхождения сульфидов железа и меди в Норильском рудном поясе в рамках нашей гипотезы о рециклинге рудных элементов решается относительно просто. Несколько сложнее выяснить происхождение сульфидов никеля. По-видимому, большая часть сульфидов никеля прямо захватывается из докембрийских сульфидных руд, например, из широко распространенных в рудных залежах раннего протерозоя миллерита (NiS) или пентландита ($(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$). Однако часть никеля может поступать из кор выветривания ультраосновных пород, особенно докембрийского возраста, в которых часто встречаются никелистые аналоги серпентинита — ревдинскит, гарниерит и непуит. Эти породы были найдены на Южном Урале, в Максюттовском комплексе, Халиловском и Аккермановском месторождениях, а также на о-ве Новая Каледония, причем **пентландит, ревдинскит и гарниерит являются важной никелевой рудой**. Для крайнего никелистого члена ревдинскита можно записать реакцию



Поднимающиеся снизу горячие базальты ассимилируют все образовавшиеся таким путем сульфиды металлов и выносят их в верхние этажи интрузии, где может происходить ликвация рудных расплавов с образованием даже слоев сливных руд.

Учитывая, что сульфиды металлов Норильского и Талнахского месторождений формировались за

счет сероводорода, в основном образующегося путем восстановления сульфатных минералов, следует ожидать, что и состав изотопов серы в сульфидах будет сохраняться сульфатным. На самом деле так оно и происходит. По данным В.А. и Л.Н. Гриненко [1974], а также А.И. Альмухамедова и Ф.Я. Медведева [1982], изотопный состав сульфидов Норильского медно-никелевого месторождения явно сдвинут в сторону изотопов сульфатной серы: до $^{34}\text{S} \approx +8$ и $+19\%$, при мантийных характеристиках от 0 до $+2\%$. Таким образом, **изотопный состав серы норильских сульфидов также подтверждает, что их большая часть является продуктом ремобилизации докембрийских участков континентальной коры внедрившимися базальтовыми магмами, т.е. что эти сульфиды сформировались в результате рециклинга.**

Заключение. Из проведенного анализа следует, что к необходимым условиям образования регенерированных сульфидных руд Норильского типа относятся:

1) наличие крупного авлакогена, заложившегося в раннепротерозойское время, вмещающего магматогенную сульфидную медно-никелевую минерализацию и позже заполненного терригенными, гипсоносными и угленосными осадками, пропитанными углеводородами. Обычно базальты над такими рудными залежами отличаются повышенной магнезиальностью (см. реакцию (2)) и включениями карбонатов, часто представленных в виде крупных кристаллов исландского шпата (реакция 1);

2) приуроченность перспективных территорий к системам трогов, ассоциирующих с зонами длительно (сотни миллионов лет) развивавшихся глубинных разломов, которые пересекают мощные континентальные плиты либо расположены на их границах;

3) мобильные орогенные пояса, островодужные системы и области тектоно-магматической активизации;

4) границы глобальных периодов, характеризующихся активными процессами раскола континентов и широкомасштабным трапповым магматизмом;

5) сочетание нескольких факторов (причем первый обязателен) способствует обнаружению более крупного рудного объекта.

Таким образом, из рассмотренного механизма образования сульфидных месторождений норильского типа следует, что к их внешним признакам относятся: повышенная магнезиальность базальтов; присутствие в них кальцита, часто образующего крупные кристаллы исландского шпата; широкое разнообразие часто несовместимых рудных минеральных ассоциаций; наличие мощных ореолов метасоматической переработки пород и широкий диапазон состава и термодинамических условий формирования рудных образований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Альмухамедов А.И., Медведев А.Я.* Геохимия серы в процессах эволюции основных магм. М.: Наука, 1982. 148 с.
- Глазунов О.М., Богнибов В.И., Еханин А.Г.* Кингашское платиноидно-медно-никелевое месторождение. Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2003. 192с.
- Гонгальский Б.И.* Сульфидные руды Удокан-Чинейского рудного района / Тр. XXI Междунар. науч. конф., Т. 2. М.: Макс-Пресс, 2010. С. 272–290.
- Гонгальский Б.И., Сафонов Ю.Г., Криволицкая Н.А.* и др. Уникальная Удокан-Чинейская рудно-магматическая система. Крупные и суперкрупные месторождения. Т. 2. М.: ИГЕМ, 2006. С. 483–507.
- Годлевский М.Н.* Траппы и рудоносные интрузии Норильского района. М.: Госгеолтехиздат, 1959. 61 с.
- Гриненко В.А., Гриненко Л.Н.* Геохимия изотопов серы. М.: Наука, 1974. 274 с.
- Дистанов Э.Г., Оболенский А.А.* Металлогеническое развитие Центрально-Азиатского подвижного пояса в связи с его геодинамической эволюцией // Геология и геофизика. 1994. № 7–8. С. 252–270.
- Додин Д.А.* Металлогения Таймыро-Норильского региона. СПб.: Наука, 2002. 822 с.
- Додин Д.А., Чернышов Н.М., Полферов Д.В., Тарновецкий Л.Л.* Платинометалльные месторождения мира. Т. 1. М.: Геоинформмарк, 1994. 279 с.
- Дюжиков О.А.* Норильско-Талнахский PGE–Cu–Ni гигант: геологическая позиция, глубинное строение, петролого-геодинамическая модель формирования // Изв. секции наук о Земле РАЕН. 2004. Вып. 12. С. 91–103.
- Жижин В.И., Никитин В.М., Третьяков М.Ф.* Закономерности сульфидного и платинового оруденения в докембрийских ультрабазит-базитовых формациях Алданского щита // Изв. вузов. Геология и разведка. 2000. № 4. С. 107–114.
- Конников Э.Г., Кислов Е.В., Орсов Д.А.* Йоко-Довыренский расслоенный плутон и связанное с ним оруденение (Северное Прибайкалье) // Геология рудных месторождений. 1994. Т. 36, № 6. С. 545–553.
- Котульский В.К.* К вопросу о происхождении магматических медно-никелевых месторождений // Докл. АН СССР. 1946. Т. 51. С. 814–817.
- Криволицкая Н.А.* Образование Pt–Cu–Ni месторождений в истории развития траппового магматизма в Норильском районе // Тр. Междунар. конф., посвященной 100-летию В.И. Смирнова. Т. 2. М.: Макс-Пресс, 2010. С. 62–78.
- Кузнецов А.А.* Геолого-минерогенетическая модель Анабарского щита. М.: ЗАО Геоинформмарк, 2001. 84 с.
- Лихачев А.П.* Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения. М.: Эслан, 2006. 496 с.
- Мусатов Д.И., Гусев Г.С., Сорохтин О.Г., Тарновецкий Л.Л.* Предварительная геодинамическая модель образования медно-никелевых месторождений Норильского района // Геология медно-никелевых месторождений СССР. Л.: Наука, 1990. С. 114–122.
- Надретт А.Дж.* Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых и платинометалльных руд. СПб.: СПбГУ, 2003. 487 с.
- Наркелюн Л.Ф., Салихов В.С., Трубочев А.И.* Медистые песчаники и сланцы мира. М.: Недра, 1983. 414 с.
- Платиноносность ультрабазит-базитовых комплексов юга Сибири / Отв. ред. Г.В. Поляков, В.И. Богнибов. Новосибирск: Наука, 1995. 326 с.
- Роговер Г.Б.* Месторождение Норильск-1. М.: Госгеолтехиздат, 1959. 168 с.
- Соболев А.В., Криволицкая Н.А.* Об образовании сибирских траппов и фундаментальных причинах зарождения сульфидных месторождений норильского типа. М.: ВИНТИ, 2009. С. 53–75.
- Сорохтин О.Г.* Жизнь Земли. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований; НИЦ Регулярная и хаотическая динамика, 2007. 452 с.
- Сорохтин О.Г., Старостин В.И., Сорохтин Н.О.* Эволюция Земли и происхождение полезных ископаемых // Изв. секции наук о Земле РАЕН. 2001. № 6. С. 5–27.
- Спирidonov Э.М., Гриценко Ю.Д.* Эпигенетический низкоградный метаморфизм и Co–Ni–Sb–As минерализация в Норильском рудном поле. М.: Научный мир, 2009. 218 с.
- Старостин В.И.* Металлогения. М.: Изд-во Моск. унта, 2004. 292 с.
- Старостин В.И., Игнатов П.А.* Геология полезных ископаемых. М.: Академический проект, 2004. 512 с.
- Старостин В.И., Сорохтин О.Г.* Эволюция Земли и металлогения // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2003. Т. 78, вып. 2. С. 3–12.
- Ступак Ф.М., Кренделев Ф.П., Криволицкая Н.А., Ступак Р.М.* Новый тип медного оруденения в хр. Удокан // Докл. АН СССР. 1987. Т. 297, № 4. С. 929–931.
- Сухов Л.Г., Борисов В.И.* Стадийность развития Талнахского интрузивного никеленосного комплекса // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1982. № 3. С. 27–35.
- Толстых Н.Д., Орсов Д.А., Кривенко А.П., Изох А.Э.* Благороднометалльная минерализация в расслоенных ультрабазит-базитовых массивах юга Сибирской платформы. Новосибирск: Параллель, 2008. 194 с.
- Туровцев Д.М.* Контактный метаморфизм Норильских интрузий. М.: Научный мир, 2002. 319 с.
- Хаин В.Е.* Тектоника континентов и океанов. М.: Научный мир, 2001. 604 с.
- Lightfoot P.C., Howkesworth C.J., Hergt J. et al.* Remobilisation of the continental lithosphere by a mantle plume: major-, trace-element, and Sr-, Nd-, and Pb-isotopic evidence from picritic and tholeiitic lavas of the Noril'sk District, Siberian Trap, Russia // Contrib. Mineral. and Petrology. 1993. Vol. 114. P. 171–188.
- Xie-Yan Song, Reid R. Keays, Mei-Fu Zhou et al.* Siderophile and chalcophile elemental constraints on the origin of the Jinchuan Ni–Cu–(PGE) sulfide deposit, NW China // Geochim. et Cosmochim. Acta. Sci. Direct. 2009. Vol. 73. P. 404–424.
- Xie-Yan Song, Xiang-Ren Li.* Geochemistry of the Kalatongke Ni–Cu–(PGE) sulfide deposit, NW China: implications for the formation of magmatic sulfide mineralization in a postcollisional environment // Miner Deposita. 2009. Vol. 44. P. 303–327.