

## Малосульфидные платиновые руды Норильского района — перспективные источники благородных металлов

С. Ф. Служеникин<sup>1</sup>, кандидат геолого-минералогических наук,

В. В. Дистлер<sup>2</sup>, доктор геолого-минералогических наук,

А. В. Григорьева<sup>3</sup>, кандидат геолого-минералогических наук

ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН

*Малосульфидные платиновые горизонты в разрезе гипербазит-базитовых интрузивов занимают совершенно обособленную позицию по отношению к основным рудным телам и располагаются в зонах верхних эндоконтактов этих массивов. Главными рудовмещающими породами являются хромитоносные такситовые габбро. Содержание Cu и Ni в малосульфидных рудах не превышает в сумме 0,20–0,40 мас. %. Концентрация элементов платиновой группы достигает 20–40 г/т, а в отдельных пересечениях и штуфах — 60–70 г/т. Главной формой нахождения данных элементов в этих рудах являются их собственные минералы — сперриллит, сульфиды платины и палладия, железо-платиновые сплавы, станниды, стибниды, арсениды, плюмбиды, висмута-теллуриды палладия.*

**Ключевые слова:** малосульфидные платиновые руды, хромитоносные такситовые габбро, элементы платиновой группы.

### Введение

Основу мировой сырьевой базы производства платиновых металлов составляют собственно платиновые месторождения малосульфидного (МС) генетического типа. Российская сырьевая база в основном представлена богатыми платиносодержащими медно-никелевыми сульфидными месторождениями, главными из которых являются рудные объекты Норильского рудного района. Последнее обстоятельство в определенной степени ставит отечественное производство платиновых металлов в зависимость от производства цветных металлов. Открытие и детальное изучение малосульфидных собственно платиновых месторождений в Норильском районе реально увеличивает отечественные запасы и ресурсы платиновых металлов. Важен тот факт, что малосульфидное оруденение установлено в рудном районе с высокоразвитой горно-металлургической инфраструктурой, позволяющей фактически без существенных капитальных затрат начать добычу и переработку высокоценного рудного сырья.

Термин «малосульфидные платиновые месторождения» предложен для того, чтобы выделить специальную группу месторождений, характеризующихся особой обогащенностью платиновыми металлами при относительно низком количестве сульфидного вещества и соответственно концентрации цветных металлов.

Можно выделить два типа месторождений, содержащих платиновые металлы:

- собственно сульфидные медно-никелевые месторождения (руды), в которых цветные металлы являются главными компонентами, а платиновые — типичными попутными компонентами;
- платиновые месторождения (руды), в которых благородные металлы являются главным методом разработки, а цветные — попутными компонентами.

Оба типа месторождений (руд) могут совмещаться в пределах единых рудных полей, но подходы к их оценке и переработке должны быть существенно различными.

К первому типу относятся наиболее известные крупные по запасам месторождения: Садбери (Канада), Камбалда и другие месторождения, связанные с коматиитами (Австралия, Зимбабве), Джинчунан и др. (Китай), трубка массивных сульфидных руд

<sup>1</sup> e-mail: sluzh@igem.ru.

<sup>2</sup> e-mail: distler@igem.ru.

<sup>3</sup> e-mail: grig@igem.ru.

Флакфонтейн в комплексе Бушвельд (ЮАР), донные массивные руды массива Стиллуотер (США), богатые (массивные) руды норильских месторождений.

Ко второму типу относятся следующие объекты: Бастард, Меренский UG 2 рифы (горизонты) и дунитовые трубки в интрузивном комплексе Бушвельд (ЮАР), J-М риф массива Стиллуотер (США), горизонт В-2 в расслоенном комплексе Великой Дайки (Зимбабве), золото-палладиевые горизонты комплекса Скаергард (Гренландия, Дания), платиноносные горизонты интрузивов Лак-дез-Иль (США), Мани-Мани и др. (Австралия), а также горизонты платиновых руд в Панско-Федоровском, Вуручайвенч, Южносопчинском интрузивах Кольского полуострова. К этому же типу следует относить и оруденение, локализованное в верхних эндоконтактных зонах норильских базит-гипербазитовых интрузивов.

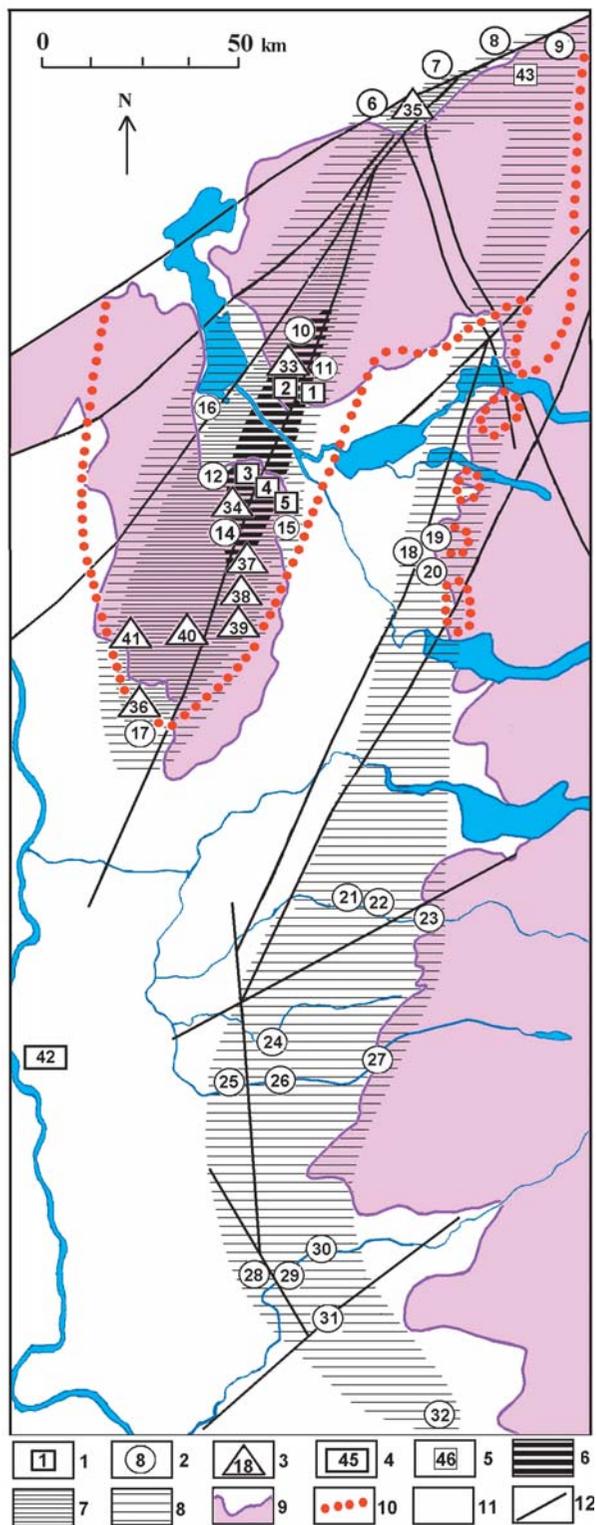
В соответствии с подобным подразделением находятся соотношение и пропорции основных мировых запасов элементов платиновой группы (ЭПГ), основная часть которых приходится именно на малосульфидные месторождения в расслоенных массивах Бушвельд, Великая Дайка, Стиллуотер.

### Базит-гипербазитовые интрузивы Норильского района

Среди гипербазит-базитовых расслоенных интрузивов выделяется несколько групп, отличных по составу, строению и степени рудоносности: 1) интрузивы Норильско-Талнахской группы; 2) дифференцированные лейкократовые интрузивы; 3) дифференцированные высокомагнезиальные меланократовые интрузивы нижнеталнахской группы (рис. 1).

Рис. 1. Схема размещения дифференцированных гипербазит-базитовых интрузивов в Норильском районе. 1–3 – дифференцированные гипербазит-базитовые интрузивы: 1 – мезократовая группа (рудноносные интрузивы): Талнахский (1), Хараелахский (2), Норильск-1 (3), Норильск-2 (4), Черногорский (5); 2 – лейкократовая группа (интрузивы с забалансовыми месторождениями): Тальминский (6), Иконский (7), Ыттахский (8), Арылахско-Мастахсалинский (9), Тангаралахский (10), Габбровый (11), Зубовский (12), Верхнеамбарнинский (13), Верхнебыстринский (14), Круглогорский (15), Пясинско-Вологочанский (16), Бурканский (17), Имангдинский (18), Мантуровский (19), Накохозский (20), Верхнеильтыкский (21), Силурийский (22), Кулюмбинский (23), Брусский (24), Нижнегорбиячинский (25), Джалтульский (26), Верхнегорбиячинский (27), Нижний (28), Светлогорский (29), Второго Порога реки Курейки (30), Окуневоозерский (31), Колыйский (32); 3 – меланократовая группа (безрудные интрузивы): Нижнеталнахский (33), Нижненорильский (34), Клюквенный (35), Зеленогровский (36), ручья Пикритового (37), Моронговский (38), ручья Магнитного (39), горы Пикритовой (40), Нижнефокинский (41); 4 – месторождения медистых песчаников: Сухарихинское (42); 5 – проявления самородной меди: Арылахское (43); 6–8 – площади развития групп интрузивных массивов: 6 – мезократовых, 7 – меланократовых, 8 – лейкократовых; 9 – вулканогенные формации пермо-триасового возраста нерасчлененные; 10 – площади лав гудчихинской свиты; 11 – терригенно-осадочные формации нерасчлененные; 12 – разломы (в массивах, выделенных полужирным шрифтом, выявлены МС платиновые руды и рудопроявления)

К группе дифференцированных мезократовых массивов принадлежат рудоносные интрузивы норильского типа (Талнахский, Хараелахский, Норильск I, Норильск II, Черногорский, Тальминский, Имангдинский). В разрезах этих массивов выделяются последовательные расслоенные серии петрографических разновидностей пород: Верхняя габбровая серия (эруптивные брекчи, гибридно-метасоматические



породы, контактовые габбродолериты, лейкократовое габбро, хромитоносное такситовое габбро, габбродиориты), Основная расслоенная серия (кварцосодержащие, безоливиновые, оливинсодержащие, оливинные, оливин-биотитовые габбродолериты, пикриты) и Нижняя габбровая серия (такситовые и контактовые габбродолериты). Основные закономерности скрытой расслоенности массивов норильского типа заключаются в сопряженном увеличении сверху вниз магнезиальности (от  $Fo_{60}$  до  $Fo_{79-85}$ ) и количества кумулузного оливина и основности кумулузного плагиоклаза (от  $An_{47-63}$  до  $An_{78-88}$ ), достигающих экстремальных значений в горизонте пикритов, а также в уменьшении в том же направлении железистости интеркумулузного клинопироксена (от  $Fs_{19-11}$  до  $Fs_{8-10}$ ). Другой, верхний экстремум значений количества и магнезиальности интеркумулузного оливина связан с верхним горизонтом пикритов, а пик количества и основности кумулузного плагиоклаза — с горизонтом лейкогаббро.

К группе лейкократовых дифференцированных массивов относятся интрузивы зубовского, круглогорского и курейского типов. Интрузивы зубовского типа (Тангаралахский, Зубовский, Верхнеамбарнинский, Верхнебыстринский, Накохозский, Иконский, Ыттахский, Бурканский) отличаются от интрузивов норильского типа незначительным распространением ультрабазитовых пород и такситовых габбродолеритов и широким распространением гибридных кварцев и кордиеритсодержащих норитов и габброноритов в контактах с алюмосиликатными толщами, а также лейкократовых гибриднометасоматических пород.

Для интрузивов круглогорского типа (Круглогорский, Габбровый, Арылахско-Мастахсалинский) характерно двучленное строение. Их верхние части слагают лейкогаббро, нижние — оливинные и оливинсодержащие габбродолериты. В лейкогаббро присутствует раннемагматическая ассоциация плагиоклаза ( $An_{46-47}$ ), клинопироксена ( $Fs_{20-26}$ ) и интеркумулузного оливина ( $Fo_{53-68}$ ). Курейский тип включает ряд массивов рек Курейки и Кулюмбе (Верхнеильтыкский, Силурийский, Кулюмбинский, Светлогорский, Второго порога, Нижний-1), близких по строению к лейкократовым не полностью расслоенным массивам Норильского района. Отличает их только еще большая лейкократовость. Содержание  $MgO$  достигает 21 мас. % в пикритах. Железистый оливин ( $Fo_{54-67}$ ) развит как в кумулусе, так и в интеркумулусе.

К группе дифференцированных меланократовых массивов принадлежат интрузивы нижнеталнахского, моронговского и фокинского типов. Интрузивы нижнеталнахского типа характеризуются значительным развитием ультрабазитов (троктолитов, оливинных и пикритовых габбродолеритов). Содержание  $MgO$  составляет 7—28 мас. %,  $Cr_2O_3$  — не более 0,03 мас. %.  $Fo$  в оливине 74—83 мол. %,  $An$  в плагиоклазе не ниже 84 мол. %,  $Fs$  в клинопироксене не более 10 мол. %.

К моронговскому типу интрузивов относится ряд массивов в центре Норильской мульды, в которых доля ультрабазитов (троктолитов и пикритов) снижается с юга на север (от 100% до 50%). В самом северном массиве весьма значительна доля крупнозернистых пегматоидов в верхней части его разреза.  $MgO$  — 5—23 мас. %,  $Cr_2O_3$  — 0,002—0,03 мас. %.  $Fo$  в оливине от 69 до 30 мол. %. Меланократовые расслоенные массивы фокинского типа сложены оливинными габбродолеритами, пикритами и троктолитами. Среднее содержание  $MgO$  16% (в пикритах до 33 мас. %),  $Cr_2O_3$  до 0,18 мас. %.

Кроме базит-гипербазитовых массивов в районе выделяются базитовые интрузивы — Ергалахский и Северо-Хараелахский (субщелочные высокотитанистые), Авамский (нормальной щелочности и средней титанистости), а также Ирбинский, Амбарнинский и Далдыканский (низкотитанистые, нормальной щелочности).

Крупные промышленные платино-медно-никелевые месторождения связаны со специфическими гипербазит-базитовыми дифференцированными мезократовыми интрузивами, выделяемыми в норильский (норильско-талнахский) тип. С лейкократовыми дифференцированными интрузивами связаны забалансовые платиноидно-медно-никелевые месторождения и рудопроявления (интрузивы зубовского и круглогорского типов). Меланократовые дифференцированные интрузивы (нижнеталнахский, моронговский типы) не несут промышленных концентраций цветных и благородных металлов.

### Петрографические и минералогические особенности пород Верхней габбровой серии базит-гипербазитовых интрузивов Норильского района

К настоящему времени проявления малосульфидных платиновых руд выявлены в ряде базит-гипербазитовых массивов Норильского района (см. рис. 1). В рудоносных интрузивах норильского типа они имеют повсеместное распространение. В массивах зубмаркшейдерского и круглогорского типа они располагаются спорадически.

Горизонт малосульфидного платинового оруденения локализуется в пределах Верхней габбровой серии (рис. 2). Она имеет повсеместное распространение в верхней эндоконтактной зоне интрузивов. В строении серии участвуют породы весьма пестрого петрографического состава, исключительно неоднородные по текстурам и структурам: эруптивные брекчии, гибридно-метасоматические породы, контактовые габбродолериты, габбро-диориты, лейкократовое габбро, хромитоносное такситовое габбро со шлирами и линзами, обогащенными оливинном и хромитом.

Контактные габбродолериты слагают часто краевые эндоконтактные зоны массива, но могут и отсутствовать. Тогда с вмещающими породами контактируют как эруптивные брекчии, так и габбродиориты.

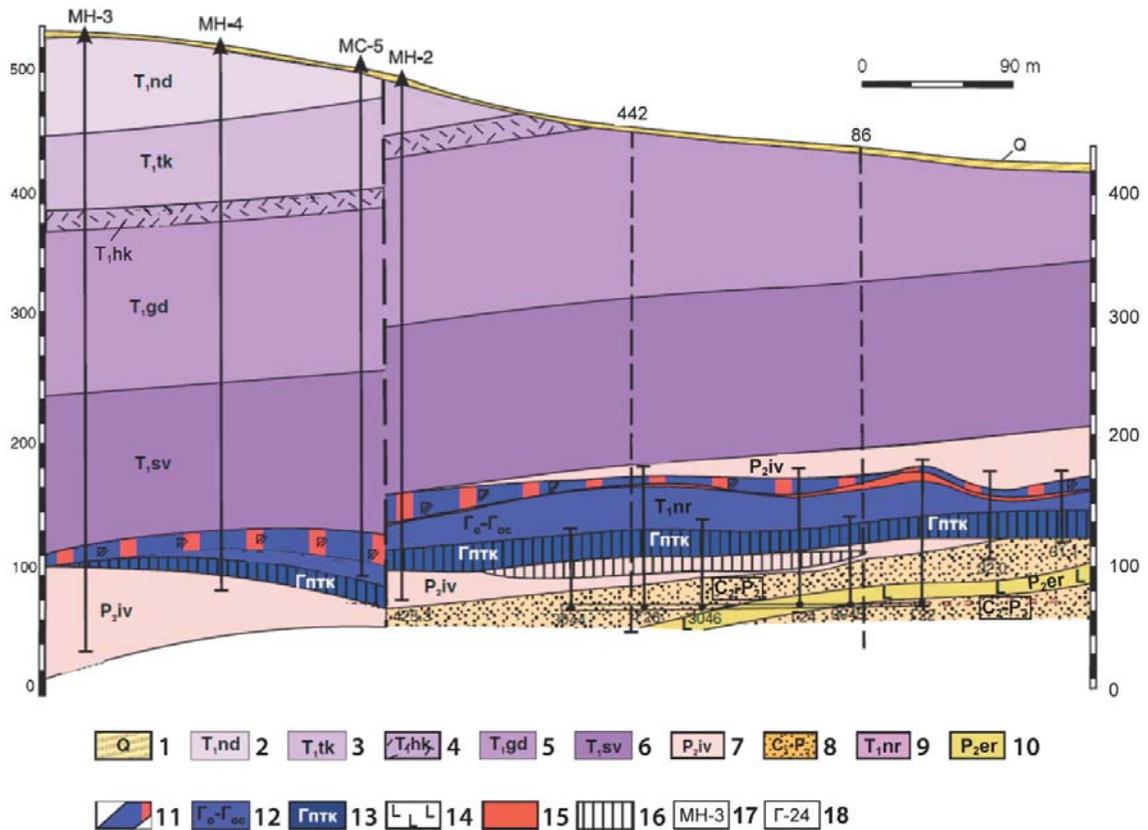


Рис. 2. Геологическое строение и позиция рудных горизонтов в интрузивном массиве Норильск I. Составлено геологами ОАО «Норильскгеология», линия разреза I—I – на рис. 3.

Условные обозначения: 1 – четвертичные отложения; туфоогенно-базальтовая толща: 2 – Надеждинская свита, порфировые туфы; 3 – Туклонская свита, базальты толеитовые, пойкилоофитовые; 4 – Хаканчанская свита, туффиты, туфы, туфобрекчии, единичные покровы пойкилоофитовых базальтов; 5 – Гудчихинская свита, базальты пикритовые, порфировые, гломеропорфировые; 6 – Сыверминская свита, базальты толеитовые, пойкилоофитовые; 7 – Ивакинская свита, базальты двуполевошпатовые, лабрадоритовые, титан-авгитовые, горизонты туфов; 8 – тунгусская серия нерасчлененная, аргиллиты, углистые аргиллиты, алевролиты, песчаники, конгломераты, пласты каменного угля. Интрузивные образования: 9 – Норильский тип – хонолитоподобные лентовидные тела, дифференцированные от лейкократового габбро и габбро-диоритов до такситовых пикритовых габбро-долеритов; 10 – Ергалахский интрузивный комплекс – недифференцированные и слабодифференцированные интрузии щелочноосновных пород. Пластовые и субпластовые тела, дайки, штоки, силы. Верхняя габбровая серия: 11 – эруптивные брекчии, гибридно-метасоматические породы, контактовые габбродолериты, габбро-диориты, лейкогаббро, такситовые габбро. Основная расслоенная серия: 12 – безоливиновые, оливинсодержащие, оливиновые габбродолериты; 13 – пикритовые, такситовые, нижние контактовые габбродолериты; 14 – долериты Ергалахского комплекса; 15 – малосульфидный платиновый горизонт; 16 – вкрапленные платино-медно-никелевые руды основного рудного горизонта; 17 – скважины детальной разведки; 18 – скважины из горной выработки

Контактные габбродолериты представляют собой массивные тонко- и мелкозернистые породы с микродолеритовой, офитовой, пойкилоофитовой структурой основной массы, включающей вкрапленники плагиоклаза An<sub>70</sub> и авгита. Состав пород (объем. %): плагиоклаз 50–60, клинопироксен 30–40, оливин 5–10, рудные минералы 5–15, второстепенные – роговая обманка, биотит, апатит, сфен. Контактные габбродолериты развиты в бортовых частях, а в головной зоне интрузивов могут выпадать из разреза, уступая гибридно-метасоматическим породам и габбро-диоритам.

Гибридно-метасоматические породы имеют розовую, светло- или зеленовато-серую окраску, массивную текстуру, мелко- или среднезернистое строение

и близки по облику к габбро-диоритам, за которые часто принимаются. Структуры пород разнообразны: бластопойкилоофитовая, бластоофитовая, гетерогранобластовая, гранобластовая, лепидогранобластовая, бластопорфировая и другие структуры метасоматических пород по магматическому субстрату.

Главными породообразующими минералами гибридно-метасоматических пород являются клинопироксен, амфибол, хлорит, биотит и полевой шпат. Второстепенные и акцессорные минералы – кварц, апатит, сфен, рутил. Наложенные скарновые и околоскарновые минералы – андрадит, гроссуляр, эпидот, кальцит, пренит, цеолиты (томсонит, натролит, анальцит). По количественно-минеральному составу и структурным особенностям выделяются

следующие основные петрографические разновидности гибридно-метасоматических пород: пироксен-, амфибол-, биотит-, хлорит-полевошпатовые и существенно полевошпатовые. Более редкими породами являются кварцевые монцитониты.

Эруптивные брекчи в кровле интрузивов Норильского района развиты довольно широко. Поле их распространения в интрузиве Норильск I протягивается на расстояние около 8 км (рис. 3). В Талнахском и Хараелахском интрузивах эруптивные брекчи развиты незначительно. Эруптивные брекчи слагают краевую, наиболее внешнюю часть Верхней габбровой серии, залегающую на контакте с вмещающими породами. При этом типичные краевые контактовые габбродолериты в разрезе Верхней габбровой серии часто отсутствуют и с вмещающими породами контактируют как эруптивные брекчи, так и призматически-зернистые габбродолериты и габбро-диориты. Важно подчеркнуть, что эруптивные брекчи и лейкогаббро пространственно не взаимосвязаны и в разрезе Верхней габбровой серии встречаются как совместно, так и порознь — или отсутствуют как те, так и другие. Эруптивные брекчи сложены обломками аргиллитов, графитизированных углей, ороговикованных и скарнированных песчаников и базальтов. Цементирующим материалом служат гибридно-метасоматические породы, но могут быть безоливиновые, оливинсодержащие, оливиновые габбродолериты и лейкогаббро.

Лейкогабброиды (лейкогаббро и такситовые габбро) в разрезе интрузивных массивов фиксируются как под краевыми габбродолеритами и эруптивными брекчиями, так и непосредственно на контакте с вмещающими породами. Они не образуют единого тела, а развиты в виде отдельных линз протяженностью от нескольких до сотен метров и мощностью до 25 м (рис. 3 и 4).

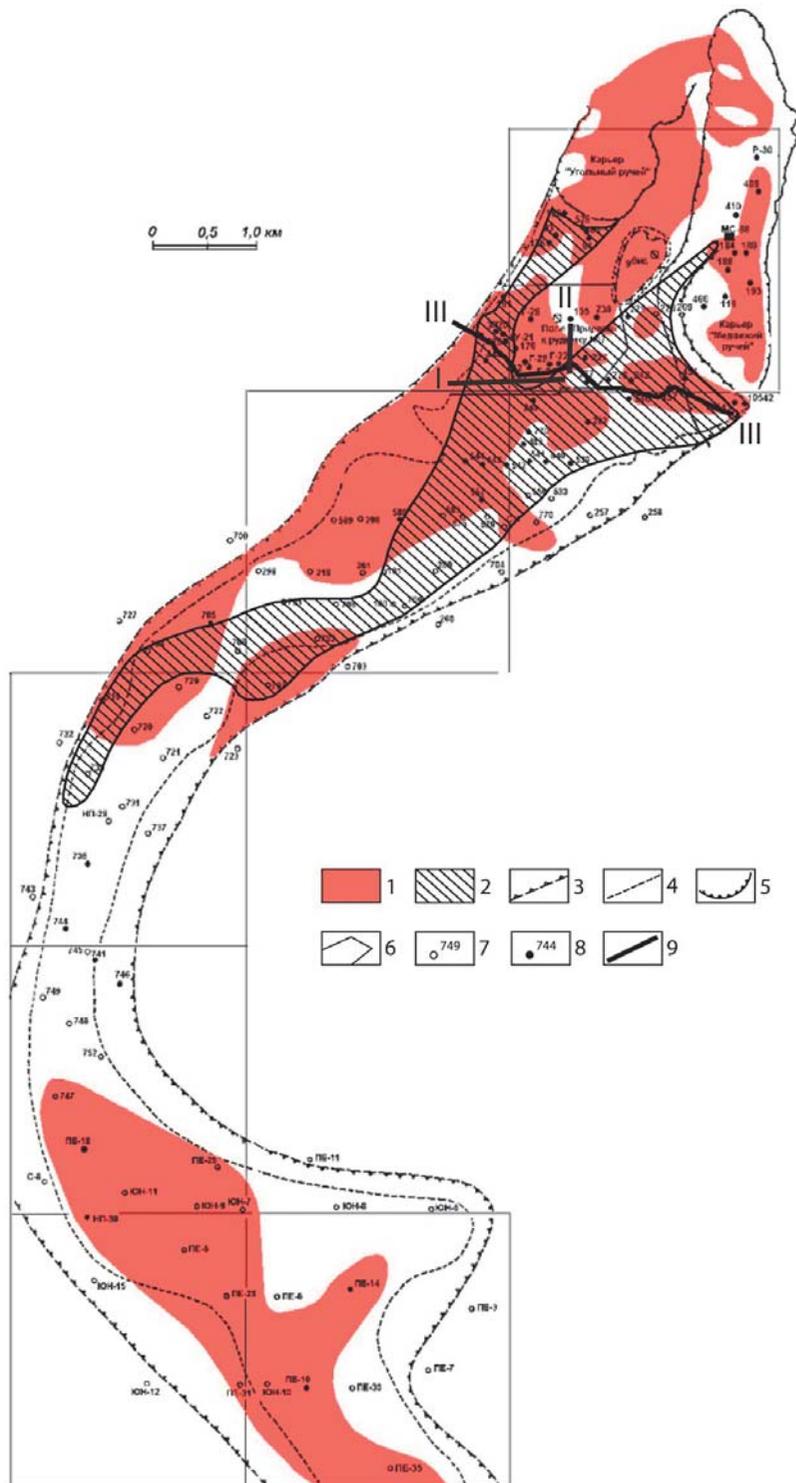


Рис. 3. Ореолы развития эруптивных брекчий и лейкогаббро в верхней эндоконтактной зоне интрузива Норильск I.

Условные обозначения: 1 – лейкогаббро, 2 – эруптивные брекчи, 3 – граница интрузива Норильск I, 4 – граница распространения вкрапленных руд основного горизонта, 5 – граница карьеров, 6 – граница отвода рудников, 7 – разведочные скважины, 8 – скважины с проявлением МС горизонта, 9 – линии разрезов

Лейкогаббро представляет собой крупнозернистую светло-серую пятнисто окрашенную породу. Текстура массивная. Структура габбровая, пойкилоофитовая. Состав (объем. %): плагиоклаз 60—90, клинопироксен 5—20, титаномагнетит до 5, сульфиды до 5—8.

Плагиоклаз кумулуса образует крупные (до 1—2 см) таблитчатые зональные зерна с полисинтетическими и простыми двойниками, состав которых отвечает  $Ap_{77-85}$ . Мелкопризматический плагиоклаз основной массы имеет состав  $Ap_{55}$ . Ксеноморфный интеркумулусный авгит ( $Fs_{10-13} Wo_{39-44} En_{44-50}$ ) имеет размеры 0,2—1,5 мм, но отдельные ойкокристаллы достигают 3—4 мм.

Изредка встречается ортопироксен состава  $Fs_{21} Wo_1 En_{77}$  и пластинки титанистого флогопита с магниальностью  $X_{Mg} = 80—81\%$ . Титаномагнетит ксеноморфен к плагиоклазу кумулуса и претерпел распад на магнетит и ильменит.

В лейкогаббро широко развиты процессы автотасоматического преобразования: плагиоклаз интенсивно соссюритизирован и замещен пренимом, клинопироксен амфиболизирован и биотитизирован.

Такситовые пегматоидные габбро — главные рудовмещающие породы, приурочены в основном к лейкогаббро. Такситовые габбро могут образовывать в едином горизонте лейкогабброидов несколько зон (рис. 5—7). Главные из них почти всегда локализируются в его подошве. Между лейкократовым и такситовым габбро нет четких границ, хотя переход осуществляется на протяжении первых сантиметров.

Такситовые габбро помимо массивной обладают также директивной текстурой, выражающей субполосчатую ориентировку таблиц плагиоклазов.

Такситовое пегматоидное габбро представляет собой крайне неравномернозернистую породу. Текстура атакситовая. Породы сложены (объем. %): плагиоклазом — 60—70, авгитом — 20—25, оливина — до 3—4, ортопироксеном, роговой обманкой, флогопитом, редкими зернами кварца, микропегматита, сфена, апатита.

Ранний кумулусный плагиоклаз представлен таблитчатыми идиоморфными зональными зернами размером 1—4 мм. По составу ( $Ap_{90-91}$ ) он близок к плагиоклазу лейкократового габбро. Поздняя генерация призматического плагиоклаза отвечает  $Ap_{54-61}$ . Клинопироксен образует ксеноморфные выделения и ойкокристаллы размером от 1 до 5 мм. Состав его в основном соответствует авгиту  $Fs_{10-11} Wo_{41-44} En_{46-47}$  при средних содержаниях хрома и титана, но встречаются авгиты и более железистого состава ( $Fs_{14-17}$ ). Оливин присутствует во включениях в клинопироксенах и плагиоклазе, а также образует сегрегации и выделения в форме «дорожек». По составу он отвечает  $Fo_{73-79}$  при содержании никеля 0,15—0,35 мас. %. Оливин редко встречается неизменным и обычно подвержен замещению вторичными минералами. Ортопироксен состава  $Fs_{24-30} Wo_{1-4} En_{66-72}$  встречается

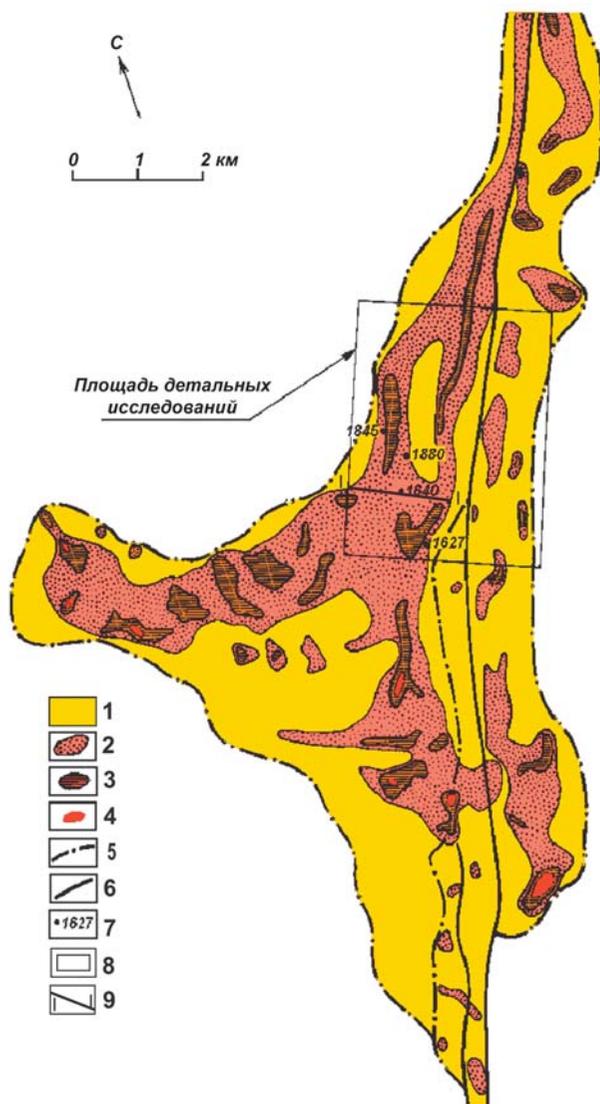


Рис. 4. Схематический план распространения горизонта лейкогабброидов с предполагаемым малосульфидным платиновым рудением в кровле дифференцированных интрузивов Талнахского рудного узла. 1—4 — градации мощности габброидов, м: 1 — 0—1, 2 — 1—10, 3 — 10—30, 4 — более 30; 5 — контур Верхнеталнахских интрузивов; 6 — главный тектонический шов Норильско-Хараелахского разлома; 7 — скважины детальной разведки; 8 — площадь детальных исследований; 9 — линия геологического разреза

редко и образует либо автономные призматические зерна, либо реакционные каемки вокруг оливина. Интерстициальный флогопит имеет красно-бурю окраску в связи с повышенным количеством титана. Его магниальность достигает 98%. В ассоциации с сульфидами флогопиты более железистые.

Такситовое габбро в значительной степени насыщено водо-, хлор- и фторсодержащими минералами — пренимом, актинолитом, роговой обманкой, флогопитом, апатитом, анальцимом, томсонитом, ангидритом. Они образуют миндалевидные обособления или развиваются по первичным силикатам.

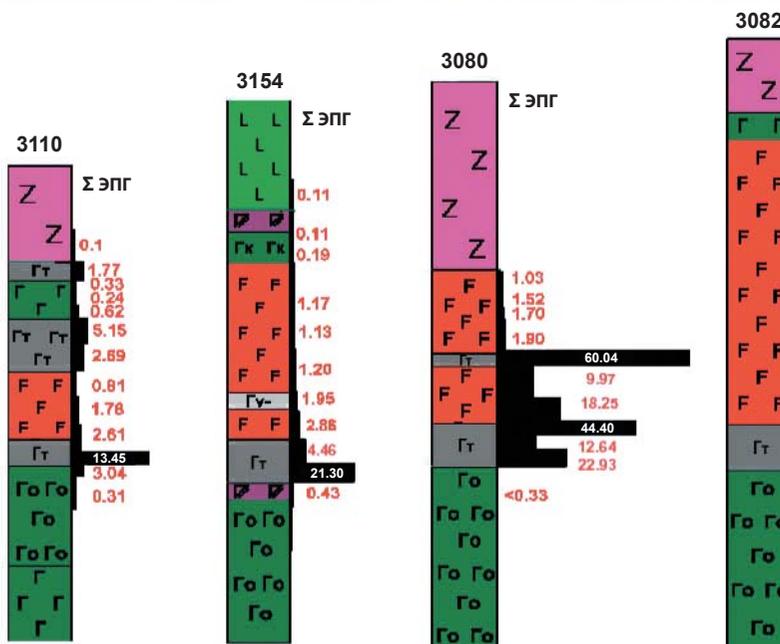
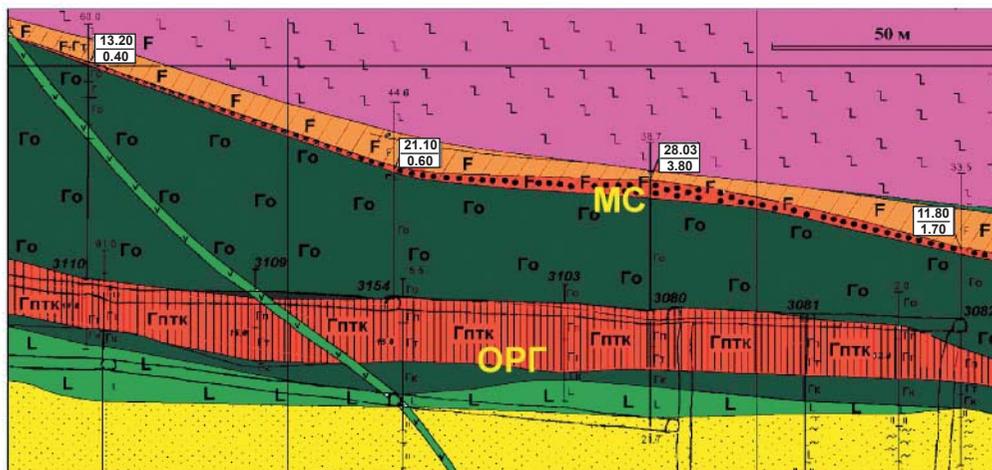


Рис. 5. Положение Верхней габбровой серии в разрезе интрузива Норильск I, ее строение в отдельных пересечениях и положение малосульфидных платиновых горизонтов. Линия разреза II—II на рис. 3.

Условные обозначения: 1 – базальты, 2 – песчаники и алевриты тунгусской серии, 3 – долериты титанавгитовые, 4 – микродолериты, 5–10 – породы интрузива (5 – лейкогаббро, 6 – габбро-диориты, 7 – габбродолериты безоливиновые, 8 – габбродолериты оливиновые, 9 – габбро такситовое, 10 – габбродолериты контактовые), 11–13 – обозначения для разреза (11 – малосульфидный платиновый горизонт, 12 – Верхняя габбровая серия, 13 – основной горизонт вкрапленных платино-медно-никелевых руд), 14 – мощность горизонта на геологических колонках

Миндалины могут составлять до 25% объема пород. В такситовых габброидах помимо обычных титаномагнетита и ильменита широко развит хромит, образующий сегрегации величиной от первых миллиметров до нескольких сантиметров [7; 11]. Содержание хромита в отдельных участках достигает 40%. В этих участках концентрация хрома в породах возрастает до 6 мас. %. Хромит неравномерно развит в породе. Часто образует скопления вокруг миндалины с водо-, хлор- и фторсодержащими минералами.

*Богатые оливином породы.* В разрезе Верхней габбровой серии обогащенные оливином породы встречаются сравнительно редко. Они в основном приурочены к основанию слоя крупнозернистых массивных лейкогаббро или такситовых габбро на контакте их с нижележащими габбро-диоритами или безоливиновыми и оливинсодержащими габбродолеритами (рис. 6). Мощность тел пикритов и троктолитовых пород измеряется в основном первыми сантиметрами и дециметрами и редко достигает 0,5 м.



по составу. Содержание никеля в оливине несколько ниже, чем в оливине такситовых габбро, и составляет 0,22—0,27 мас. %. Эвгедральный оливин образует также включения и в плагиоклазе. Плагиоклаз образует таблитчатые зональные ( $An_{76-80}$ ) протокристаллы или короткопризматические зерна ( $An_{57-77}$ ) размером от 0,2 до 3 мм. Клинопироксен характеризуется повышенной хромистостью (1,05—1,25 мас. %  $Cr_2O_3$ ) и средней титанистостью (0,55—0,83%  $TiO_2$ ). Ортопироксен ( $Fs_{19-21}Wo_{3-4}En_{76-77}$ ) встречается очень редко, главным образом в виде реакционных кайм вокруг оливина на его границах с плагиоклазом, реже образует ксеноморфные автономные зерна.

Красно-бурая Fe-Mg-слюда в обогащенных оливином породах представлена титанистым (5—7 мас. %  $TiO_2$ ), реже малотитанистым (до 1%  $TiO_2$ ) флогопитом ( $X_{Mg} = 78—82\%$ ). В ассоциации с сульфидами флогопиты имеют более железистый состав, и иногда присутствует биотит. Хромит образует сыпь мелких (0,005—0,02 мм) идиоморфных зерен чаще всего в плагиоклазе, несколько реже встречается в оливине и клинопироксене.

Процессы аутометасоматического преобразования в обогащенных оливином породах обычно весьма значительны. Постмагматические минералы представлены сосюритовым агрегатом, замещающим плагиоклаз, а также хлоритом и биотитом, развитыми по клинопироксену. Оливин наиболее глубоко затрагивается процессами аутометаморфизма. Наиболее часто его замещают сапонит, хлорит, иддингсит, серпентин + магнетит.

*Габбро-диориты* и призматически-зернистые габбродолериты представляют собой средне- и крупно-зернистые породы зеленовато-серого или розовато-серого цвета с призматически-зернистой, офитовой структурой, содержащие шлиры пегматоидных габбродолеритов. Породы сложены (объем. %): плагиоклазом ( $An_{56-59}$ ) — 50—70, авгитом ( $Fs_{17-24}$ ) — 20—30; в мезостази присутствуют альбит, микроклин, кварц, биотит, хлорит, пумпеллиит, ортит, апатит, циркон, сфен. Вторичные минералы представлены эгирин-авгитом, роговой обманкой, хлоритом, иддингситом (боулингитом), пренитом, сосюритовым агрегатом. В породах встречается интеркумулюсный оливин.

### Особенности локализации и внутреннего строения МС-горизонта

Главным критерием для оконтуривания МС-горизонта в разрезе Верхней габбровой серии являются результаты опробования скважин поисковой и эксплуатационной разведки. Вместе с тем МС-горизонт локализован во вполне определенных вмещающих породах, которые характеризуются сравнительно выдержанными текстурно-структурными особенностями и вещественным составом, что позволяет сформулировать основные геолого-петрографические критерии для его выделения. Их

использование при обработке МС-горизонта существенно сократит затраты на опробование и горные работы.

МС-горизонт занимает вполне определенное место в разрезе Верхней габбровой серии базит-гипербазитовых массивов, в верхних эндоконтактных зонах интрузивных массивов. При этом МС-горизонт локализуется исключительно среди пород нижней части разреза Верхней габбровой серии (см. рис. 5—7).

Рудовмещающими (вмещающими МС-горизонт) породами являются преимущественно хромитсодержащие такситовые габбро (около 70%), лейкократовое габбро (20%), а также включенные в эти породы шлиры и линзы оливиновых габбродолеритов, пикритов и троктолитов (менее 10%) с бедной вкрапленностью сульфидов (менее 2 объем. %).

Концентрации ЭПГ в рудовмещающих породах на порядок и более превосходят их концентрации в перекрывающих и подстилающих МС-горизонт породах. В разрезе горизонта ЭПГ распределены неравномерно, образуя несколько максимумов. Главный максимум приурочен, как правило, к подошве горизонта, реже к другим частям разрезов (см. рис. 5—7).

### Сульфидная минерализация

Концентрация цветных металлов в горизонтах с малосульфидным платиновым оруденением не превышает в сумме 0,3—0,4 мас. % и редко достигает 0,8—1,0 мас. %.

Как и в основных рудных горизонтах, общая валовая концентрация никеля складывается из сульфидного и силикатного никеля. Доля силикатного никеля в МС-горизонте, вероятно, по сравнению с основными рудными горизонтами, особенно в пикритах, не так велика в силу незначительности развития пород, обогащенных оливином, — основного концентратора силикатного никеля. Содержание никеля в оливине составляет 0,05—0,30 мас. %. Вторичные силикаты, развивающиеся по оливину, в основном сохраняют примесь никеля. Примесь никеля отмечается также в клинопироксене, флогопите и шпинелидах, но его концентрация в них обычно не превышает 0,1 мас. %.

Валовые содержания меди полностью обеспечиваются халькопиритом, входящим в состав сульфидных вкрапленников, а кобальта — пентландитом. Незначительные концентрации цветных металлов в пробах из МС-горизонта отражают малое содержание сульфидов, обычно составляющих менее 3 объем. % пород. Но на отдельных участках содержание сульфидных минералов может достигать 5 объем. % и более. Максимальные количества сульфидов отмечаются в лейкогаббро и такситовых габбродолеритах.

Морфология и величина выделений сульфидов весьма изменчива. В безоливиновых, оливиновых габбродолеритах и верхних пикритах они образуют

в основном мелкую (не более 2 мм) вкрапленность. В лейкократовых габбро и такситовых габбродолеритах наряду с тонкой интерстициальной вкрапленностью сульфиды слагают довольно крупные (до 1,5—2 см) неправильной формы и иногда овоидные выделения.

Основными сульфидными минералами являются пирротин, пентландит, халькопирит и миллерит. В породах постоянно присутствует пирит. В некоторых участках, особенно в эруптивных брекчиях, он может быть единственным сульфидом. Сульфиды в основном образуют три продуктивные ассоциации: пирротин + халькопирит + пентландит, пирротин + пентландит и миллерит + халькопирит + Ni-пирит. Эти ассоциации отличаются не только количественным соотношением сульфидов, но и некоторыми особенностями их состава.

Сульфиды в МС-горизонтах интенсивно замещаются водосодержащими минералами, особенно это касается пирротина — его бывшее присутствие определяется только тем, что в виде реликтов сохраняется находящийся в нем пентландит.

Пирит может развиваться как по сульфидам (чаще всего по пирротину), так и по силикатам (в основном по плагиоклазу). В первом случае он содержит повышенные концентрации кобальта и никеля (до 5 мас. %), во втором эти элементы-примеси отсутствуют.

### Платиновая минерализация

Абсолютные концентрации элементов платиновой группы во всех породах верхних эндоконтактовых зон массивов превышают в сумме 0,3 г/т. Содержания платиновых металлов на уровне 0,3—2,0 г/т для этих зон можно считать фоновыми.

Содержание ЭПГ в малосульфидных рудах превышают 3 г/т, в пределах от 3—12 г/т до 20—40 г/т, реже до 60 г/т.

В верхних платиноносных горизонтах, как и в основных рудах, наблюдается корреляция цветных металлов, серы и ЭПГ, но она не столь значима, как в платино-медно-никелевых рудах. Как уже указывалось, для всех крупных платиновых месторождений в крупных расслоенных массивах характерны высокие содержания ЭПГ при незначительных концентрациях цветных металлов и соответственно серы.

Количество сульфидов в этих объектах, как и в малосульфидных рудах Норильского района, не превышает 3 объем. %. Концентрация цветных металлов и серы в рифе Меренского, J-М рифе и Великой Дайке не превышают соответственно (мас. %): Ni — 0,18, 0,24 и 0,12, Cu — 0,11, 0,14 и 0,13, S — 0,70, 0,48 и 0,067, а содержание этих элементов в МС-рудах Норильского района обычно не превышает 0,25—0,40 мас. %. Отношение концентраций ЭПГ (в сумме, г/т) и серы (мас. %) составляет для рифа Меренского в среднем 17, для J-М рифа 35—70, для Великой Дайки 60—75,

а для МС-горизонта Норильска I всегда превышает 5 и достигает 40—70, в то время как этот показатель для вкрапленных руд Талнаха не превышает 1,2, а для руд Норильска 1—3,5.

На графике  $\Sigma \text{Ni} + \text{Cu}$  (мас. %) —  $\Sigma \text{ЭПГ}$  (г/т) поле малосульфидных платиновых руд совершенно обособлено от вкрапленных руд основных рудных горизонтов (рис. 8).

Концентрации родия в малосульфидных платиновых рудах составляют 0,19—0,89 до 2,8 г/т, иридия — 0,022—0,24 до 0,75, рутения — 0,10—0,49 до 0,75 и золота — 0,06—0,49 до 1,03 г/т. При этом отношение суммы редких платиноидов к сере составляет 0,23—2,40 до 4,41, а золота к сере — 0,14—0,59 до 1,18. Для сравнения: сумма концентраций Rh + Ir + Ru/S для вкрапленных руд Талнахских месторождений не превышает 0,09, Норильска I — 0,26, Au/S 0,08 и 0,20 соответственно, т. е. насыщенность малосульфидных платиновых руд редкими платиноидами и золотом в пересчете на сульфидную массу также превышает такие показатели для основных рудных горизонтов.

Соотношение концентраций платины и палладия примерно соответствует этому показателю для платино-медно-никелевых руд основных рудных горизонтов, т. е. оно колеблется от 0,23 до 0,63, преобладающие значения Pt/Pd отношения лежат в пределах 0,33—0,50, хотя при малых концентрациях ЭПГ оно может возрастать до 0,8—0,9. Соотношение концентраций двух главных платиновых металлов в малосульфидных рудах Норильска близко к таковому для платиновых руд J-М-рифа Стиллуотера (в среднем 0,35).

Распределение ЭПГ как по латерали, так и в разрезе малосульфидного горизонта неравномерно. Неравномерность распределения по латерали обусловлена главным образом наличием лейкогабброидов — главных концентраторов ЭПГ, хотя повышенные (до 5 г/т) содержания платиновых металлов отмечаются также в эруптивных брекчиях и габбродолеритах. В разрезе малосульфидного горизонта, как правило, наблюдается несколько максимумов концентрации ЭПГ (см. рис. 5—7). Эти максимумы в основном связаны с такситовыми габброидами, богатыми минералами с летучими компонентами, хромом, а также с развитием продуктивных ассоциаций сульфидов. Существует прямая корреляция между количеством  $\text{H}_2\text{O}$ -, Cl- и F-содержащих минералов, хромшпинелидов и концентрацией ЭПГ (рис. 9). Обычно максимальные содержания ЭПГ приурочены к подошве малосульфидных горизонтов, реже к другим частям разреза.

Мощность горизонта с малосульфидными рудами изменчива и составляют 0,6—3,0 м при бортовом содержании 2—3 г/т. При повышении бортового содержания до 5 г/т она обычно не превышает 1,7 м.

В отличие от вкрапленных руд основных рудных горизонтов рудоносных массивов [2; 10] твердые растворы ЭПГ в сульфидах платиновых руд играют

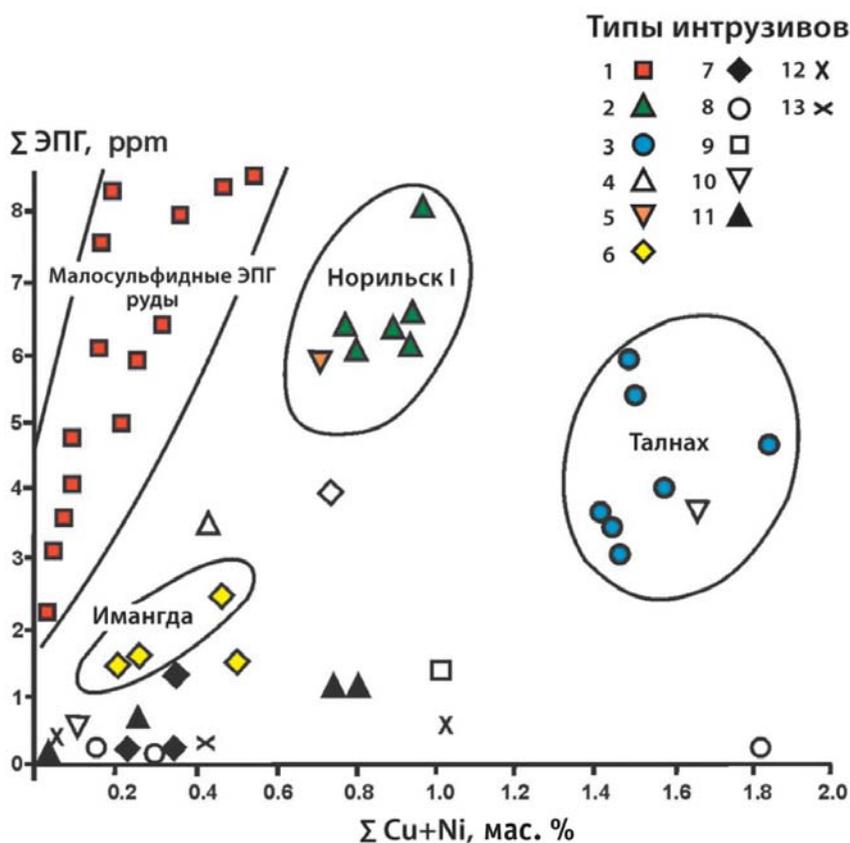


Рис. 8. Диаграмма  $\Sigma$  ЭПГ (г/т) –  $\Sigma$  Cu+Ni (мас. %) для вкрапленных руд гипербазит-базитовых массивов Норильского района. Интрузивы: 1 – малосульфидные платиновые руды, 2 – Норильск I, 3 – Талнахский и Хараелахский, 4 – Норильск II, 5 – Черногорский, 6 – Имангдинский, 7 – Зубмаркшейдерский, 8 – Нижнеталнахский и Нижненорильский, 9 – Моронговский, 10 – Крулгогорский, 11 – Курейский, 12 – Дюмталейский, 13 – Бинюдинский

в общем балансе платиновых металлов небольшую роль. Более значительны концентрации платиновых металлов в арсенидах и сульфоарсенидах никеля, кобальта и железа — никелине, маухерите, кобальтовом герсдорфите и никелевом кобальтине: платины — до 0,41 мас. %, палладия — до 0,89 мас. %, родия — до 0,44 мас. %.

Иногда наблюдаются сростки арсенидов и сульфоарсенидов с платиносодержащим арсенидом родия — холингвортитом и сперрилитом.

Основная доля валовых концентраций ЭПГ малосульфидных руд связана с их собственными минералами [11]. Они относятся к 35 минеральным видам. Минералы платиновых металлов (МПМ) представлены разнообразными классами соединений — интерметаллидами, железо-платиновыми сплавами, сульфидами и сульфоарсенидами. Минералы платины представлены в основном сперрилитом, железо-платиновыми сплавами и платиновым атоцитом. Железо-платиновые сплавы представлены изоферроплатиной, тетраферроплатиной, сплавом состава Pt<sub>7</sub>Fe и туламинитом.

В ряду минералов Pd<sub>3</sub>Sn — Pt<sub>3</sub>Sn (атокит — рустенбургит) наибольшим распространением пользуется платиновый атоцит. Кроме изоморфизма

платины и палладия в соединениях состава A<sub>3</sub>B широко развит изоморфизм лигандов — Sn, As, Sb и Pb. Состав этих минералов может меняться как от зерна к зерну, так и в одном зерне. Установлены также конечные члены: звягинцевит Pd<sub>3</sub>Pb и винсентит Pd<sub>3</sub>As. Из стибнидов палладия широко развиты, особенно в рудах Талнаха, стибниопалладинит, мертиит II, минерал состава Pd<sub>3</sub>Sb.

Широкий изоморфизм как платиновых металлов, так и лигандов характерен и для соединений состава A<sub>5</sub>B<sub>2</sub> и A<sub>8</sub>B<sub>3</sub>, где A — Pd и Pt, а B — Sn, As, Sb, иногда Te.

Среди минералов состава Pd<sub>2</sub>B выделяются паоловит Pd<sub>2</sub>Sn, палладоарсенид Pd<sub>2</sub>As, Pd<sub>2</sub>Sb и фазы состава Pd<sub>2</sub>(Sn, As), Pd<sub>2</sub>(As, Sb), (Pd, Ni)<sub>2</sub>As с переменным отношением олова, мышьяка и сурьмы. Наиболее широко развиты многокомпонентные соединения, особенно состава Pd<sub>2</sub>(Sn, As). Висмутотеллуриды представлены минералами ряда PdTe-PdBi и висмутовыми меренскиитом и мончеитом. В системе PdTe-PdBi в малосульфидных рудах развит главным образом котульскит и висмутовый котульскит, реже соболевскит.

Из стибнидов палладия широко развиты, особенно в рудах Талнаха, стибниопалладинит Pd<sub>5</sub>Sb<sub>2</sub>, мертиит II Pd<sub>8</sub>(Sb, As)<sub>3</sub>, минерал состава Pd<sub>3</sub>Sb.

Сульфиды платины и палладия представлены куперитом, брэггитом, высокоцитом, сульфидами платины, свинца, меди, никеля и железа, по составу соответствующими хараелахиту. Единственным минералом ЭПГ иридиевой группы, обнаруженным в малосульфидных платиновых рудах, является холингвортит.

Размер выделений МПМ лежит в пределах 3—90 мкм, доминирующими являются зерна величиной 5—40 мкм. Несмотря на такие мелкие выделения, МПМ очень часто образуют сростки (двух-, трех- и четырехкомпонентные).

Кроме минералов платиновых металлов в малосульфидных платиновых рудах довольно широко развиты сплавы золота и серебра с высокими концентрациями золота (79—86 мас. %). Реже обнаруживаются сплавы золота, палладия и меди. Самородное золото редко образует самостоятельные выделения, в основном оно составляет включения в МПМ, часто мельчайших размеров (не более 3 мкм).

МПМ и ЭПГ-содержащие арсениды и сульфоарсениды на 90% приурочены к H<sub>2</sub>O-, Cl- и F-содержащим минералам, замещающим сульфиды, часто к контакту замещающихся сульфидов с вторичными силикатами. Железо-платиновые сплавы нередко образуют мельчайшие микрометрические сростания с водородсодержащими силикатами.

### Геолого-генетическая модель образования малосульфидных платиновых руд Норильского района

Поскольку малосульфидные платиновые руды тесно связаны с лейкогабброидами, основная проблема заключается в механизме образования этих пород. Мы, как и [8; 9], связываем появление лейкогабброидов с процессами жидкостного расслоения (ликвации) флюидизированной магмы на относительно «сухую» и флюидизированную лейкократовую.

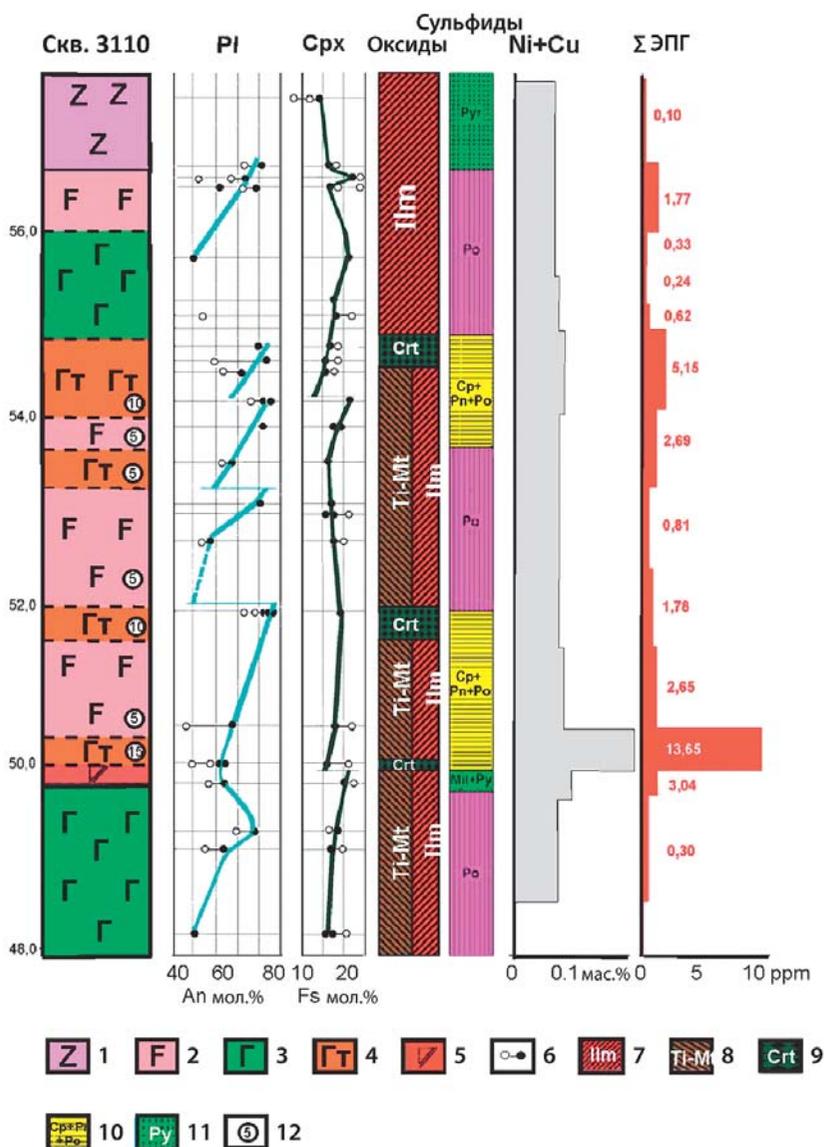


Рис. 9. Вариации составов породообразующих силикатов, оксидов, ассоциации сульфидов и содержаний цветных и платиновых металлов в верхней эндоконтактной зоне интрузива Норильск I с малосульфидным платиновым оруденением. 1 – базальт; 2 – лейкогаббро; 3 – безоливиновые габбродолериты; 4 – такситовые габбро; 5 – габбродолериты; 6 – составы минералов; оксидная минерализация: 7 – ильменит, 8 – титаномagnetит; 9 – хромит; 10 – халькопирит + пентландит + пирротин; 11 – пирит; 12 – объемный % F-, Cl-, и OH-содержащих минералов

Н. А. Натюрхин и др. [6] находили в Талнахских интрузивах признаки ликвационного расщепления магматических жидкостей. А. А. Маракушев с соавторами [5] объясняет расслоенность массивов норильского типа процессами ликвации. Н. И. Безмен [1] в экспериментальных условиях получил расслоение магматического расплава при прокачивании через него водорода.

Такой механизм образования лейкогабброидов объясняет резкие контакты между лейкогаббро и другими породами без зон закалки и локализацию тел, сложенных этими породами по всему разрезу массивов. Они обнаруживаются не только в верхних эндоконтактных зонах, но и в безрудных габбродолеритах и пикритах. Величина этих тел колеблется в значительных пределах, и мощность их достигает 25 м.

На некоторых участках они секут безоливиновые и контактовые габбродолериты [4; 12].

Флюидизированная кашеобразная масса лейкократового габбро могла перемещаться в кристаллизующемся субстрате магматической камеры. Нужно отметить, что в любых породах эти тела лейкогабброидов несут сульфидную минерализацию с более высокосернистыми ассоциациями, чем вмещающие их породы, и часто к ним приурочены проявления малосульфидного платинового оруденения.

Приуроченность в верхних эндоконтактных зонах тел пород, обогащенных оливином, к подошве лейкогабброидов свидетельствует, вероятно, о процессах кристаллизационно-гравитационной дифференциации во флюидизированном расплаве.

Это подчеркивают и линзовидные скопления оливина, тоже преимущественно приуроченные к подошве лейкогабброидов. Тектоническая активность приводила к отжатию этого еще не совсем закристаллизованного ультраосновного материала вплоть до верхнего контакта массивов и появлению их квазисекущих контактов как с лейкогабброидами, так и с габбродолеритами.

Последующая обильная флюидизация приводит к появлению на поздне- и постмагматических этапах  $H_2O$ -, Cl- и F-содержащих силикатов, массовой кристаллизации хромшпинелидов и ЭПГ минерализации.

Летучие компоненты, растворенные в магматическом расплаве, выделяются при его кристаллизации и в силу его низкой плотности перемещаются вверх, вплоть до еще не закристаллизованных верхних эндоконтактных зон массивов. Другими путями миграции магматического флюида из тыловых частей магматической колонны по направлению к фронтальным частям массивов являются верхние эндоконтактные зоны. Кровля массивов является при этом экраном для летучих компонентов.

### Заключение

Приведенные выше данные по геологическому строению, петрографии, геохимии и рудной минерализации верхних эндоконтактных зон базит-ультрабазитовых массивов Норильского района позволяют сформулировать геолого-петрографические и минералогические признаки малосульфидного платинового оруденения:

1. MS-оруденение приурочено к верхнему эндоконтакту базит-ультрабазитовых дифференцированных массивов, как правило, к кровле габбро-диоритов, безоливиновых, оливинсодержащих и оливиновых габбро-долеритов Основной расслоенной серии.

2. MS-горизонт представляет собой аномальную — критическую зону с максимальной петрографической и минералогической неоднородностью, обусловленной пятнисто-блоковым и прожилковидным распространением разновидностей пород, отли-

чающихся текстурами, структурами и минеральным составом.

3. Оруденение приурочено к участкам развития лейкогабброидов (лейкогаббро и такситовое габбро), в меньшей степени к эруптивным брекчиям и контактовым габбро-долеритам. В участках развития лейкогабброидов вмещающей оруденение породой является такситовое габбро, образующее неправильные, прожилковидные обособления с четкими размытыми границами, фиксируемые исчезновением хромшпинелевых обособлений.

4. Хромшпинелиды образуют сегрегации линзовидной, изометричной, амебовидной формы величиной от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров и имеют четкие границы с силикатами. Скопления хромшпинелидов наблюдаются иногда в цементе эруптивной брекчии и редко в контактовых габбро-долеритах и содержат ЭПГ минерализацию. Обособления хромита часто развиваются вокруг миндалевидных обособлений  $H_2O$ -, Cl- и F-содержащих минералов (актинолита, роговой обманки, флогопита, биотита, пренита, апатита).

5. Миндалины — один из характерных признаков малосульфидного оруденения. Величина миндалин колеблется от долей миллиметра до 2—3 см. Как правило, они имеют изометричную, чаще шаровидную форму. Миндалины распределены в породе неравномерно. Нередко в центральных частях миндалин наблюдаются выделения сульфидов.

6. Платиноносное такситовое габбро содержит только вкрапленники продуктивных ассоциаций сульфидов: пирротин + пентландит + халькопирит, пентландит + халькопирит, никелистый и кобальтсодержащий пирит + миллерит + халькопирит. Безрудные породы несут сульфидную ассоциацию: кобальтсодержащий пирротин и кобальтовый (Со до 7 мас. %) пентландит. Халькопирит составляет в сульфидных вкрапленниках не более 3%.

7. В MS-горизонте может быть несколько максимумов концентраций ЭПГ. Эти максимумы совпадают с развитием такситовых габбро, сегрегаций хромита и миндалевидных обособлений  $H_2O$ -, Cl- и F-содержащих минералов и сульфидов с продуктивными ассоциациями сульфидов. Как правило, наибольший максимум содержания ЭПГ приурочен к подошве MS-горизонта.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Президиума РАН «Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации» и программы РАН «Рудная петрология расслоенных базит-гипербазитовых магматических комплексов, несущих стратегические типы минерального сырья».

## Литература

1. Безмен Н. И. Экспериментальное изучение жидкостной дифференциации базит-гипербазитовых расплавов // Тезисы докладов 27-й Международной геологической конференции. — Т. 4. — М., 1984. — С. 264—265.
2. Дистлер В. В., Служеникин С. Ф., Кабри Л. Дж. и др. Платиновые руды норильских расслоенных интрузивов: соотношение магматического и флюидного концентрирования благородных металлов // Геология рудных месторождений. — 1999. — Т. 41, № 3. — С. 241—265.
3. Лебедев А. П. О типах дифференциации в траппах Сибирской платформы. — Изв. АН СССР. Сер. геол. — 1957. — № 2. — С. 55—74.
4. Лихачев А. П. Роль лейкократового габбро в формировании норильских дифференцированных интрузий // Изв. АН СССР. Сер. геол. — 1965. — № 10. — С. 75—89.
5. Маракушев А. А., Феногенов А. Н., Емельяненко П. Ф. и др. Генезис расслоенных интрузивов норильского типа // Вестн. МГУ. Сер. геол. — 1982. — № 1. — С. 3—19.
6. Наторхин И. А., Архипова А. И., Батуев Б. Б. Петрология Талнахских интрузий. — Л.: Недра, 1977.
7. Рябов В. В., Цимбалист В. Г., Якоби Н. А. Концентрация хрома и платиноидов в кровле расслоенных интрузий норильского типа // Докл. АН СССР. — 1982. — Т. 266, № 2. — С. 350—353.
8. Рябов В. В. Флюидный режим траппового магматизма и рудообразования (петрологический аспект) // Геология и геофизика. — 1999. — № 10. — С. 1457—1473.
9. Рябов В. В., Шевко А. Я., Гора М. П. и др. Магматические образования Норильского района — Т. 1: Петрология траппов. — Новосибирск: Nonparel, 2000. — 408 с.
10. Служеникин С. Ф., Дистлер В. В. Вкрапленные руды талнахского рудного узла как источник платиновых металлов // Крупные и уникальные месторождения редких и благородных металлов. — СПб., 1998. — С. 247—256.
11. Служеникин С. Ф., Дистлер В. В., Дюжинов О. А. и др. Малосульфидное платиновое оруденение в норильских дифференцированных интрузивах // Геология рудных месторождений. — 1994. — Т. 36, № 3. — С. 195—217.
12. Тарасов А. В. О механизмах формирования Норильской интрузии и связанных с ней сульфидных тел // Замещение и вторжение при магматизме и рудообразовании. — Новосибирск, 1976. — С. 123—276.