

Байкальское медно-никелевое месторождение

Э.Г.Конников, Е.В.Кислов, Д.А.Орсов

Введение

М.М. Тетяев в 1915 г. первым отметил и описал основные и ультраосновные породы водораздела рек Тьи и Ондоко в Северном Прибайкалье. Геологической съемкой, проводившейся А.С. Кульчицким и А.А.Мальшевым, район Йоко-Довыренского интрузива был охвачен лишь после 1949 г. Детальное изучение массива и обнаруженного в нем медно-никелевого оруденения, названного Байкальским месторождением, было начато в 1959 г. Северобайкальской геолого-разведочной экспедицией (В.А.Чабаненко, Л.М.Бабуриной, Л.И.Якимов и др.). Во второй половине 60-х гг. геолого-разведочные работы были свернуты, а месторождение отнесено к разряду забалансовых. Помимо геологов-производственников, в детальном изучении месторождения в этот период приняли участие и сотрудники ряда академических и отраслевых институтов: Н.Н.Шишкин (1963), М.И.Грудинин (1965), С.А.Гурулев (1965, 1983), Т.И. Нюппенен (1965) и др.

Возобновлению интереса к Йоко-Довыренскому плутону и связанному с ним оруденению способствовала экскурсия 1975 г., в которой приняли участие Д.С.Коржинский, А.А. Маракушев, Л.И.Шабынин, Д.С.Штейнберг, Н.Н.Перцев, О.М.Глазунов, М.И.Грудинин, А.А.Ефимов, И.А.Зотов, С.А.Гурулев, Э.Г.Конников, М.Ф.Трунева, Д.И.Царев, М.Б.Эпельбаум (Контактные процессы..., 1979), и геохимические исследования массива, проведенные сотрудниками ГЕОХИ РАН и МГУ во второй половине 70-х гг. (Ярошевский и др., 1982; Ионов, 1984). Новый этап углубленных исследований геологии, петрологии и рудообразующих процессов месторождения, а также вмещающей его толщи был начат сотрудниками Бурятского геологического института СО РАН, Улан-Удэ, под научным руководством Э.Г.Конникова в 1984 г. (Качаровская, 1986; Качаровская, Трунева, 1986; Кислов, 1992; Кислов, Конников, 1991, 1992; Кислов и др., 1989; Конников и др., 1987, 1988, 1990; Медь-никеленосные..., 1990; Kislav et al., 1983). В конце 80-х – начале 90-х гг. геологи Северобайкальской экспедиции (А.Г.Крапивин, В.С.Клеткин, А.Г.Степин) занимались доразведкой медно-никелевого оруденения, опробованием интрузива с целью поисков платинометаллического оруденения и оценкой зоны дезинтеграции дунитов на формовочное сырье.

Байкальское месторождение относится к группе сульфидных медно-никелевых собственно магматических месторождений в расслоенных плутонах ультрамафит-мафитового состава. По разведанным запасам сульфидных руд (около 100 тыс. т Ni) это мелкое месторождение. Однако, используя данные по коэффициенту распределения никеля между сульфидной фазой и расплавом (Duke, Naldrett, 1978; Naldrett et al; 1984) применительно к Йоко-Довыренскому массиву (Медь-никеленосные..., 1990), авторы пришли к выво-

ду, что потенциальные запасы сульфидных никелевых руд в нем превышают разведанные на сегодняшний день не менее чем в 7 раз. Поэтому вопрос о масштабе оруденения требует дальнейшего изучения.

Геотектоническое положение, строение и состав интрузива

Йоко-Довыренский массив входит в число ультрамафит-мафитовых плутонов, образующих субширотный пояс медь-никеленосных интрузивов Байкало-Становой металлогенической зоны (рис.1). Большая часть этих плутонов ассоциирует с рифтогенно-типа структурами в перикратонных бассейнах карельского и байкальского возраста. Наиболее изученной в настоящее время является Сыннырская рифтогенная структура, зародившаяся в позднем рифее в краевой части Олоkitско-Бодайбинского окраино-морского бассейна. С ее формированием тесно связано становление в Северном Прибайкалье медно-никелевого и полиметаллического оруденения (Медь-никеленосные..., 1990).

Сыннырский рифтогенный комплекс (рис.2) включает регрессивный ряд карбонатно-терригенных формаций довыренской серии (Мануйлова, Зарубин, 1981) – ондоковская, итыкитская, асектамурская свиты, а также вулканиты иняптуковской (пикритобазальты, базальты) и сыннырской (субщелочные базальты, трахидациты) свит. Осадочная часть разреза рифтовой структуры синхронна с формированием кадаликанской серии Бодайбинского и байкальской серии Байкало-Патомского прогибов (Салоп, 1964). Судя по геохимическому сходству (Конников и др., 1988) и идентичности возраста (740 млн лет - Кислов и др., 1991; Неймарк и др., 1991) иняптуковских вулканитов и Йоко-Довыренского интрузива, они являются разными фациями одного магматического комплекса или вулканоматматической ассоциацией. Помимо Йоко-Довыренского массива, являющегося, по-видимому, "ископаемой" промежуточной камерой вулканитов иняптуковской свиты в подстилающих осадках асектамурской и итыкитской свит, в ограничивающих рифт тектонических нарушениях широко распространены силлы роговообманковых плагиоперидотитов (кортландитов), содержащих сульфидную медно-никелевую минерализацию (Авкитское и Даваканское проявления). Они наряду с силлами габбро-диабазов, могут считаться субвулканической фацией иняптуковских и сыннырских эффузивов.

Йоко-Довыренский дунит-троктолит-габбровый массив – единственный в Сибири крупный хорошо сохранившийся расслоенный массив. Он находится на 56°30' северной широты и 110° восточной долготы. Это силлоподобное тело (рис. 3), залегающее субсогласно со структурой вмещающих позднепротерозойских карбонатно-терригенных отложений осевой части Олоkitского прогиба и геоморфологи-

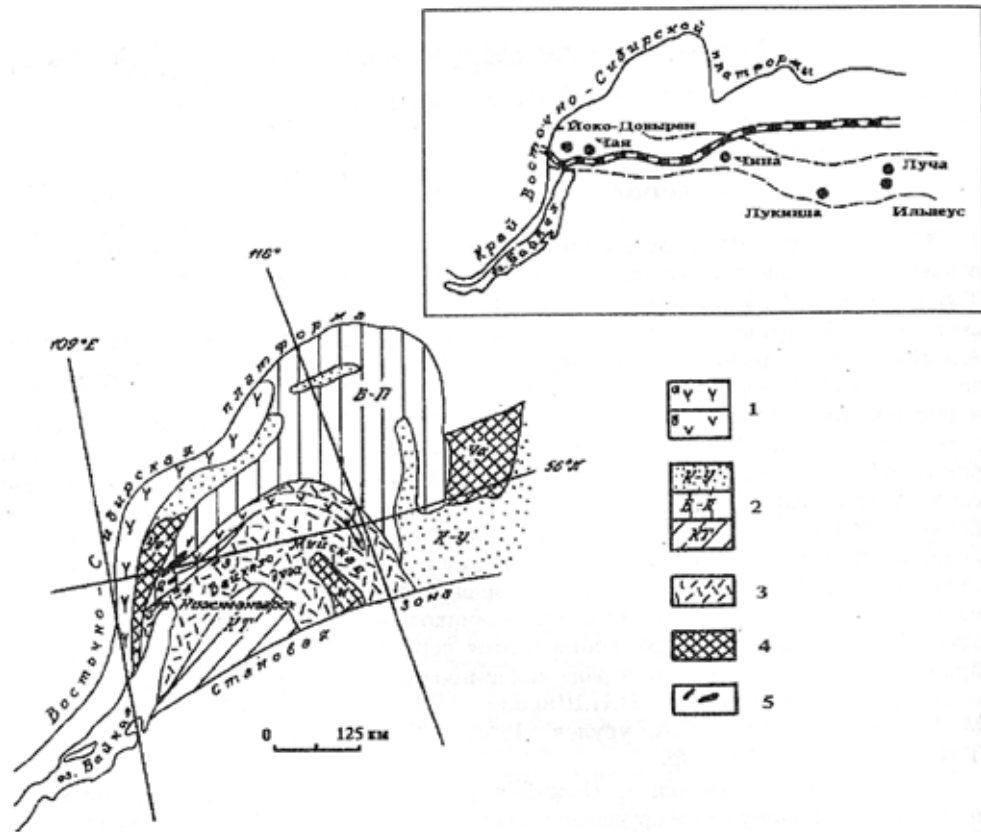


Рис. 1. Схема геологического строения Северо-Байкальской никеленосной провинции:

1 – раннепротерозойская Аkitканская (а) и позднерифейская Сыннырско-Падриинская (б) рифтогенные структуры; 2 – раннепротерозойский Кодаро-Удоканский (К-У), позднерифейские Байкало-Патомский (Б-П) и Котерский (КТ) периконтинентальные бассейны; 3 – позднерифейская энзиматическая 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 – Нюрундуканский. На врезе: расположение Байкало-Амурской железной дороги и Южно-Сибирской медно-никелевой провинции (кружками обозначены медь-никеленосные массивы)

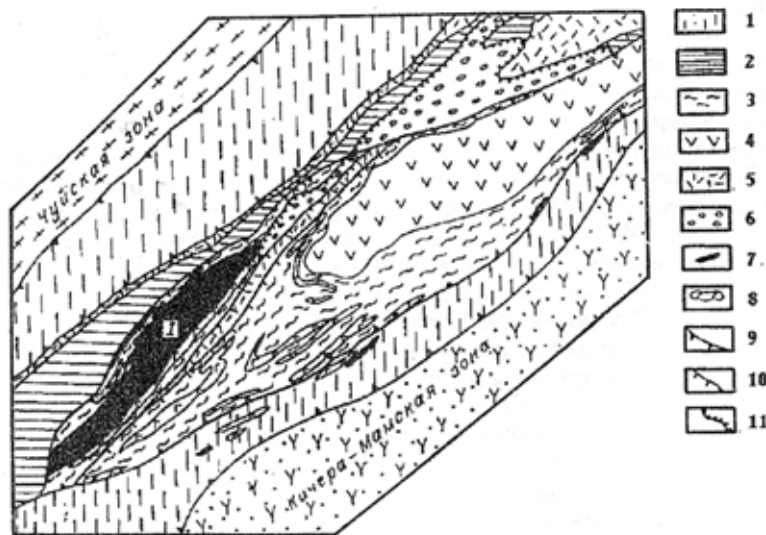


Рис. 2. Тектоно-магматическая схема центральной части Олоkitского прогиба:

1 – раннерифейский зонально метаморфизованный комплекс основания (тулуокитская, тыйская, олоkitская свиты); позднерифейский осадочно-вулканический комплекс: 2 – сланцево-кварцито-доломитовая толща (ондокская свита), 3 – карбонатно-песчано-сланцевая толща (итыкитская и асектамурская свиты), 4 – базальты, пикритобазальты иняптукской свиты, 5 – субчелочные базальты, трахидацилы сыннырской свиты; 6 – конгломераты, песчаники, гравелиты, алевроиты холоднинской свиты (V-C1); 7 – интрузивы Довыренского комплекса (1 – Йоко-Довыренский массив); 8 – габбро-нориты; тектонические нарушения: 9 – надвиги первого и 10 – второго порядка; 11 – границы несогласного налегания пород

чески выраженное хребтом с абсолютными отметками 1600-2150 м, разделяющим бассейны рек Тья, Овдоко и Олокита. Массив вытянут в северо-восточном направлении (азимут 50°) на 26 км при максимальной ширине выхода 3,5 км и крутом ($70-80^\circ$) падении к юго-востоку. На эрозионной поверхности обнажена, по-видимому, краевая часть plutона, о чем свидетельствует крутое ($>70^\circ$) падение ультраосновных пород на северо-запад, а расслоенной серии и основных пород на юго-восток. В приподошвенную часть вмещающей толщи от массива отходят силлоподобные апофизы плагиперидотитов мощностью до 10-20 м.

Исходный расплав Йоко-Довыренского интрузива соответствовал пикриту. Этот вывод основывается на анализе состава закалочных фаций в подошве лополита и расчете средневзвешенного состава plutона (Конников, 1986). Для массива характерны необычно высокие ("коровые") начальные отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0,712$ (Кислов и др., 1991), что предположительно связывается с выплавлением пикритового расплава из участков предварительно "метасоматизированной" мантии и его взаимодействием с вмещающими толщами. Большинство пород интрузива характеризуется парагенезисом $\text{O}l+\text{P}l+\text{Cpx}\pm\text{Orx}$. По смене минеральных ассоциаций снизу вверх в центральной части массива выделяются следующие зоны (Конников и др., 1988): плагиперидотитовая мощностью до 200 м; плагидунитовая (100 м), дунитовая (870 м), ритмического чередования плагидуни-

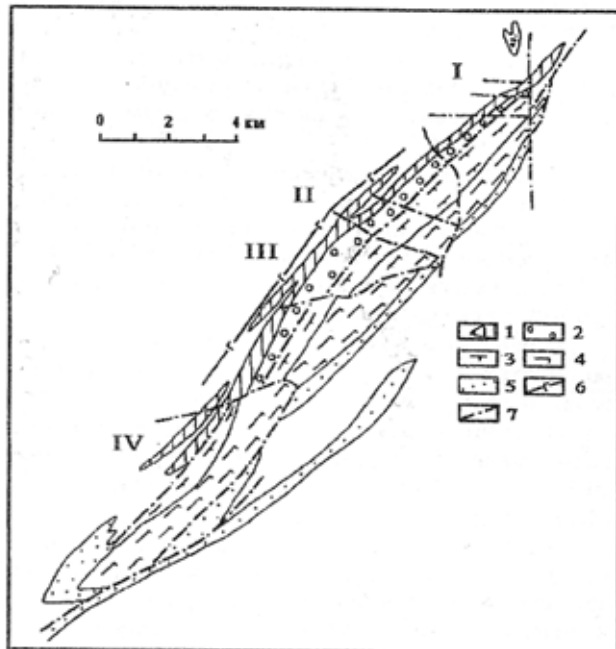


Рис. 3. Схема геологического строения Йоко-Довыренского массива:

- 1 - плагиперидотиты; 2 - плагидуниты, дуниты, верлиты;
3 - полосчатые плагидуниты, троктолиты, оливиновые габбро;
4 - массивные оливиновые габбро и оливиновые габбро-нориты;
5 - габбро-нориты; 6 - то же, маломощные силлы; 7 - разрывные нарушения; рудоносные участки: 1 - Озерный, II - Центральный, III - Большой, IV - Рыбачий

тов и троктолитов (560 м), ритмического чередования троктолитов и оливиновых габбро (430 м), оливиновых габбро (580 м), оливиновых габбро-норитов (520 м). В прикровлевой и приподошвенной частях интрузива и во вмещающей толще отмечаются многочисленные силлы и жилы габбро-норитов. Они сформированы вследствие дополнительного внедрения в камеру базальтоидного расплава, являющегося продуктом продвинутой глубинной дифференциации пикритовой магмы (Конников и др., 1988; Кислов, Конников, 1992).

Для Йоко-Довыренского массива характерно широкое развитие ксенолитов вмещающих пород. Магнезиальные скарны наиболее свойственны для верхней части дунитовой зоны, но встречаются также в основании плагидунит-троктолитовой зоны, ксенолиты терригенных пород встречаются реже, в основном среди плагиперидотитов и габброидов.

В осевой части массива прослеживается крупный продольный разлом, разделяющий дунитовую и плагидунит-троктолитовую зоны. Разлом выражается двухметровой зоной милонитизированных аподунитовых серпентинитов, имеющих северо-западное падение под углом 78° . Вследствии смещения по этому разлому из разреза юго-западной части интрузива (голец Йоко) выпадают ультраосновные породы, а северо-восточный фланг, напротив, сложен исключительно плагиперидотитами. Закартирована также серия субширотных нарушений, падающих на юг под углом 45° и выраженных мощными (до 50-100 м) зонами серпентинитов. Северо-восточный фланг plutона сечется крупным субмеридиональным разломом, к которому приурочены дайки лампрофиров палеозойского (?) возраста.

Медно-никелевое сульфидное оруденение

Наиболее богатая медно-никелевая минерализация сконцентрирована в плагиперидотитовой зоне и отходящих от нее силлах того же состава. Рассеянная вкрапленность, реже прожилково-вкрапленное оруденение отмечены в верхней части дунитовой и нижней части плагидунит-троктолитовой зон, где они сопряжены с апокарбонатными ксенолитами. Обогащены сульфидами также жилные тела габбро-пегматитов и анортозитов прежде всего в троктолит-оливин-габбровой и оливин-габбровой зонах, силлы габбро-норитов подошвы и, особенно, кровли массива. В габбро-норитах, реже плагиперидотитах, встречаются маломощные (0,1-4,0 см), прожилки, выполненные кварцем, кальцитом, аксинитом, пиритом, пирротинном, галенитом и сфалеритом. Тонкая вкрапленность пирита и пирротина характерна для ороговикованных алевролитов верхнего и нижнего экзоконтактов. В карбонатных породах, помимо этих минералов, встречаются галенит и сфалерит.

В плагиперидотитах вкрапленные и массивные руды распределены неравномерно. Вкрапленное оруденение образует протяженные (до первых километров) узкие полосы в серпентинизированных плагиперидотитах без четких контуров, ориентированные в целом со-

гласно общему простиранию массива. Массивные руды слагают жилы в ареале вкрапленного оруденения и контролируются протектоническими нарушениями, пересекающими плагиоперидотитовую зону.

В пределах северо-западного контакта массива выделяются четыре участка концентрации сульфидного медно-никелевого оруденения.

Наиболее богатые руды известны на северо-восточном выклинивании массива (участок Озерный, рис. 4). Зона таких руд протягивается в приподошвенной части интрузива на 2 км по простиранию при мощности в десятки метров (рис. 5). В пределах этой зоны отмечен ряд жил и линз массивных и брекчиевидных руд. В большинстве случаев это крутопадающие тела, приуроченные к трещинам субширотного и субмеридионального направлений (рис. 6). Мощность их колеблется от 0,2 до 1,5 м. Субширотные жилы прослеживаются на расстоянии около 400 м, в то время как субмеридиональные, как правило, менее протяженные (15-40 м). Большая часть их имеет крутое (50-70°) падение. Скважиной 103 жилы массивных руд прослежены на глубину 546 м. Жилы сопровождаются постмагматическими преобразованиями плагиоперидотитов (развитие серпентина, тремолита, талька, прени-та, хлорита).

Три других участка располагаются в средней части северо-западного контакта массива, в верховьях ручьев Центральный и Большой, а также в приустьевой части ручья Рыбачий.

Вкрапленное и прожилково-вкрапленное оруденение участков Центральный (рис. 7) и Большой (рис. 8) локализуется в нижней части приподошвенных силлов плагиоперидотитов на некотором удалении от контакта. Одна из зон на участке Большой простирается на расстоянии 1400 м при средней мощности 4 м и прослеживается скважинами на глубину 110 м. Сульфидная вкрапленность неравномерная при содержании рудного компонента около 30%.

В юго-западной части массива (участок Рыбачий, рис. 9) в плагиоперидотитовых силлах на расстоянии от 20 до 300 м от подошвы массива находится серия рудных зон мощностью от 1 до 25 м с содержанием сульфидов до 30%. В одном из силлов (рис. 10) зона густовкрапленных до массивных руд мощностью 2 м прослеживается на 200 м. Локализация зон густовкрапленного оруденения, жил массивных и брекчиевидных сульфидных руд совпадает с размещением в плагиоперидотитах даек, жил габбро-норитов.

Минеральный состав сульфидов (Конников и др., 1990) отчетливо коррелирует с составом рудовмещающих силикатных пород. Вкрапленные и массивные руды плагиоперидотитовой зоны сложены преимущественно гексагональным пирротинном, иногда в ассоциации с троилитом, доля которых в сумме сульфидов колеблется от 58 до 94%, пентландитом (7-25%), халькопиритом (0,1-6%), хромитом (1-3%) и магнетитом (1-7%). Встречаются здесь кубанит, маккинавит (в том числе кобальтовый), виоларит, ильменит, сфалерит, пирит, марказит,

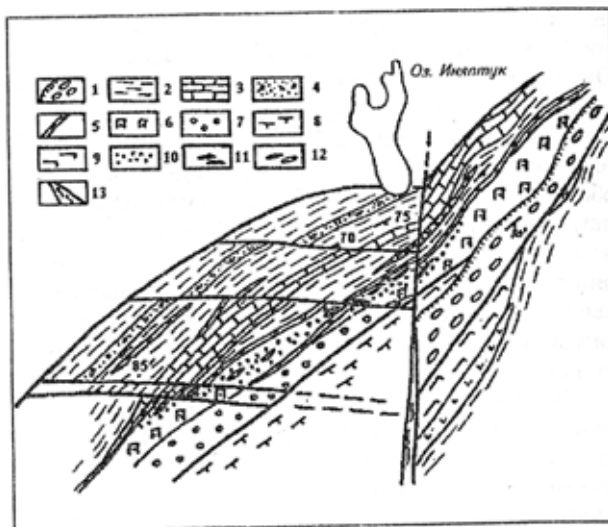


Рис. 4. Схема геологического строения участка Озерный:

1 - конгломераты венд-кембрия; 2 - алевролиты, алевропесчаники углеродсодержащие; 3 - мраморы; 4 - кварциты; 5 - силлы габбро-норитов; 6 - плагиоперидотиты; 7 - плагиодуниты; 8 - троктолиты, плагиодуниты; 9 - оливиновые габбро, оливиновые габбро-нориты; 10 - зоны сульфидной вкрапленности; 11 - линзы массивных сульфидных руд; 12 - ксенолиты карбонатных пород и магнезиальных скарниов; 13 - разломы и зоны серпентинизации

реже - никелин, герсдорфит, кобальтин, полидимит, борнит.

Состав сульфидов в дунитах менее разнообразен. Основные минералы - троилит и пентландит. Отмечаются халькопирит и борнит в сростаниях с пентландитом, который иногда замещается маккинавитом и виоларитом. Присутствующий в этих рудах хромит обычно замещается к краям хроммагнетитом и ильваитом.

Вкрапленное оруденение в жильных анортозитах и габбро-пегматитах из ритмически расслоенной серии в качественном отношении мало отличается от оруденения в плагиоперидотитах, но характеризуется повышенными содержаниями халькопирита (до 20% от суммы сульфидов).

Вкрапленное оруденение в более поздних габбро-норитах характеризуется преобладанием гексагонального и моноклинного пирротина (90-99%). В значительно меньшем количестве встречаются халькопирит (0-7%), пентландит (0-4%), ильменит (0,1-3,5%), а также кобальтин, никелин, пирит, сфалерит, галенит, герсдорфит.

Весьма сходна с этой сульфидная минерализация ороговикованных алевролитов и песчаников экзоконтактной зоны массива. Сульфиды таких тонкополосчатых руд в большей мере приурочены к песчаниковому слою ритмично-расслоенной толщи. Среди сульфидов преобладает (70-90%) моноклинный пирротин, отмечены халькопирит, пирит повышенной кобальтоносности (до 2,5% Co), реже встречается сфалерит.

Наряду с изменениями минерального состава закономерно изменяется химический состав сульфидов (Конников и др., 1990). Наименее сернистые

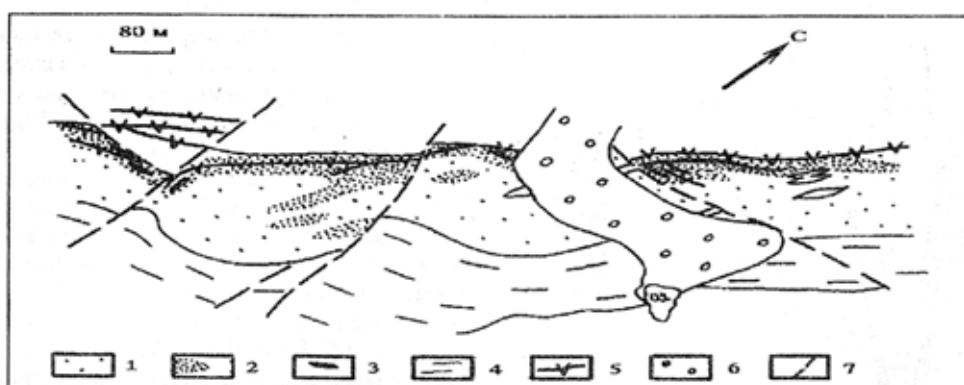


Рис. 5. Детали строения участка Озерный:

1 - плагиоперидотиты; 2 - зоны сульфидной вкрапленности; 3 - линзы массивных сульфидных руд; 4 - ритмическое чередование троктолитов и плагиодунитов; 5 - sillы гранофириновых габбро-норитов и габбро-пегматитов; 6 - четвертичные отложения; 7 - разломы

гексагональные пирротины зафиксированы в дунитах с постепенным повышением содержания серы в минерале из вкрапленных и массивных руд в плагиоперидотитах, минерализации в анортозитах. В габбро-норитах и тем более роговиках экзоконтакта моноклинные пирротины наиболее сернистые. Пентландиты обнаруживают сходные тенденции: в ультраосновных породах они богаче железом и беднее никелем, кобальтом при крайне низких содержаниях Си по всему разрезу. Состав халькопирита практически постоянен во всех ассоциациях, но при этом аналогично сернистости пирротина уменьшается отношение меди к железу. Тенденции изменчивости сернистости пирротина и медистости халькопирита, смена троилита гексагональным, а затем моноклиным пирротинном позволяют судить о повышении фугитивности серы в ходе рудно-магматического процесса. Химические составы сульфидов вкрапленных и массивных руд плагиоперидотитовой зоны близки.

Средние содержания и соотношения основных компонентов различных типов руд приведены в таб-

лице. Отличительной особенностью руд Байкальского месторождения является повышенное содержание кобальта, изоморфно входящего в пентландит, виоларит, никелин, герсдорфит (в последних двух минералах отмечено до 12% Co), а также формирующего кобальтин и кобальтовый маккинавит.

Платинометальное оруденение

Первые сведения о повышенных содержаниях элементов платиновой группы (ЭПГ) в рудах массива относятся еще к началу 60-х гг., когда в двух технологических пробах, отобранных институтом "Гипроникель", было обнаружено: палладия до 0,90, платины 0,26 и родия до 0,02 г/т. Однако наибольшие концентрации этих элементов зафиксированы в штучной пробе оруденелого пегматоидного габбро (соответственно, 2,24, 0,52 и 0,02 г/т). Позднее в шлихах из отвалов шурфа, вскрывшего массивные руды, найден сперрилит (Качаровская, Трунсва, 1986).

Геохимические исследования последнего десятилетия (Трунсва, Качаловская, 1985, Конников и др.,

Средние содержания и соотношения основных компонентов в рудах Байкальского месторождения, %

Тип руды	Ni	Co	Cu	Ni : Co	Ni : Cu
Вкрапленные в плагиоперидотитах	0,126 (n=443)	0,013 (n=417)	0,029 (n=363)	9,8	4,4
Массивные (n=21)	2,073	0,135	0,635	15,4	3,3
Вкрапленные в дунитах и верлитах (n=22)	0,188	0,011	0,047	17,1	4,0
Вкрапленные в габбро-норитах (n=15)	0,071	0,013	0,024	5,5	3,0
Прожилковые (n=10)	0,013	0,005	0,019	2,6	0,7

Примечание: n - число проб.

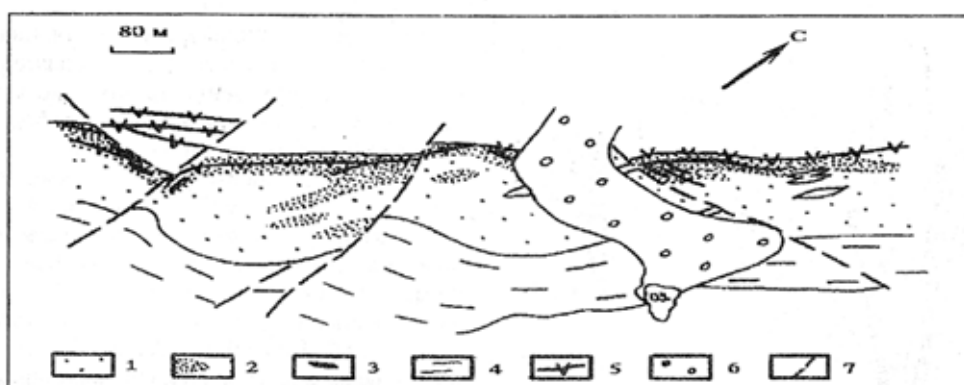


Рис. 5. Детали строения участка Озерный:

1 - плагиоперидотиты; 2 - зоны сульфидной вкрапленности; 3 - линзы массивных сульфидных руд; 4 - ритмическое чередование троктолитов и плагиодунитов; 5 - силлы гранодиоровых габбро-норитов и габбро-пегматитов; 6 - четвертичные отложения; 7 - разломы

гексагональные пирротины зафиксированы в дунитах с постепенным повышением содержания серы в минерале из вкрапленных и массивных руд в плагиоперидотитах, минерализации в анортозитах. В габбро-норитах и тем более роговиках экзоконтакта моноклинные пирротины наиболее сернистые. Пентландиты обнаруживают сходные тенденции: в ультраосновных породах они богаче железом и беднее никелем, кобальтом при крайне низких содержаниях Cu по всему разрезу. Состав халькопирита практически постоянен во всех ассоциациях, но при этом аналогично сернистости пирротина уменьшается отношение меди к железу. Тенденции изменчивости сернистости пирротина и медистости халькопирита, смена троилита гексагональным, а затем моноклиновым пирротинном позволяют судить о повышении фугитивности серы в ходе рудно-магматического процесса. Химические составы сульфидов вкрапленных и массивных руд плагиоперидотитовой зоны близки.

Средние содержания и соотношения основных компонентов различных типов руд приведены в таб-

лице. Отличительной особенностью руд Байкальского месторождения является повышенное содержание кобальта, изоморфно входящего в пентландит, виоларит, никелин, герсдорфит (в последних двух минералах отмечено до 12% Co), а также формирующего кобальтин и кобальтовый маккинавит.

Платинометальное оруденение

Первые сведения о повышенных содержаниях элементов платиновой группы (ЭПГ) в рудах массива относятся еще к началу 60-х гг., когда в двух технологических пробах, отобранных институтом "Гипроникель", было обнаружено: палладия до 0,90, платины 0,26 и родия до 0,02 г/т. Однако наибольшие концентрации этих элементов зафиксированы в штучной пробе оруденелого пегматоидного габбро (соответственно, 2,24, 0,52 и 0,02 г/т). Позднее в шлихах из отвалов шурфа, вскрывшего массивные руды, найден сперрилит (Качаровская, Трунева, 1986).

Геохимические исследования последнего десятилетия (Трунева, Качаловская, 1985, Конников и др.,

Средние содержания и соотношения основных компонентов в рудах Байкальского месторождения, %

Тип руды	Ni	Co	Cu	Ni : Co	Ni : Cu
Вкрапленные в плагиоперидотитах	0,126 (n=443)	0,013 (n=417)	0,029 (n=363)	9,8	4,4
Массивные (n=21)	2,073	0,135	0,635	15,4	3,3
Вкрапленные в дунитах и верлитах (n=22)	0,188	0,011	0,047	17,1	4,0
Вкрапленные в габбро-норитах (n=15)	0,071	0,013	0,024	5,5	3,0
Прожилковые (n=10)	0,013	0,005	0,019	2,6	0,7

Примечание: n - число проб.

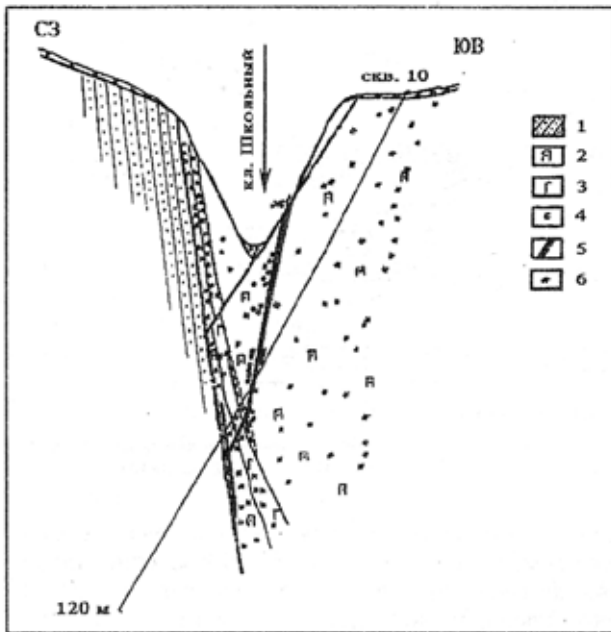


Рис. 6. Соотношение массивных руд с плагиоперидотитами в долине ручья Школьный на участке Озерный (по данным Л.М.Бабурина и др.):

1 – роговики; 2 – плагиоперидотиты; 3 – габбро-нориты; 4 – серпентины; 5 – жилы сульфидных руд с брекчиевой структурой; 6 – сульфидная вкрапленность

1987; Дистлер, Степин, 1993 и др.) подтвердили наличие повышенных содержаний ЭПГ в рудах нижней части массива и показали определяющую роль процессов накопления сульфидов и кристаллизационной дифференциации в концентрировании благородных металлов. При этом для ультраосновной части массива была выявлена тенденция существенно преобладания палладия над платиной.

В последнее время появились новые данные (Дистлер, Степин, 1993; Kislov et al., 1993), свидетельствующие о развитии в габброидной части массива мало-

сульфидного платинометалльного оруденения. Проведенные нами исследования показали, что платинометалльное оруденение приурочено к стратифицированным горизонтам ("рифам") пород наибольшей петрографической неоднородности.

Наиболее высокими содержаниями ЭПГ характеризуется нижний "риф", приуроченный к верхней границе троктолит-оливин-габбровой зоны и прослеженный по простиранию на 19 км. При общем высоком фоне максимальные концентрации ЭПГ и золота наблюдаются в анортозитах и такситовых троктолитах (Pd до 1,8, Pt до 1,2, Rh до 0,07 и Au до 0,8 г/т). Платиноносные породы характеризуются постоянным присутствием сульфидов (до 7%), а также гидроксилсодержащих минералов (флогопит, цоизит, пренит, амфиболов, хлорит и др.).

Сульфидная минерализация в троктолитах и оливиновых габбро представлена троилитом, железистым пентландитом, реже встречаются кубанит и халькопирит. В анортозитах наблюдаются две разновидности сульфидных ассоциаций: кубанит – пентландит – халькопирит – гексагональный пирротин и никелистый пентландит – годлевскит – талнахит – борнит – халькопирит. Постоянно в незначительных количествах отмечаются маккинавит, сфалерит, реже – галенит и пирит. Минерализация ЭПГ в анортозитах представлена туламинитом, тетраферроплатиной, звягинцевитом, масленицковитом и мончетом.

Отношения концентраций платины к палладию для подавляющего большинства проанализированных проб более 1. Анализ общих закономерностей распределения ЭПГ и золота в разрезе массива показывает, что из благородных металлов в медно-никелевых рудах нижней части массива накапливался главным образом палладий, а в породах "рифа" – платина и золото (рис. 11). Сопоставление сульфидоносных и бессульфидных пород приподошвенной части подтверждает решающее значение сульфидов в процессе накопления палладия: в бессульфидных

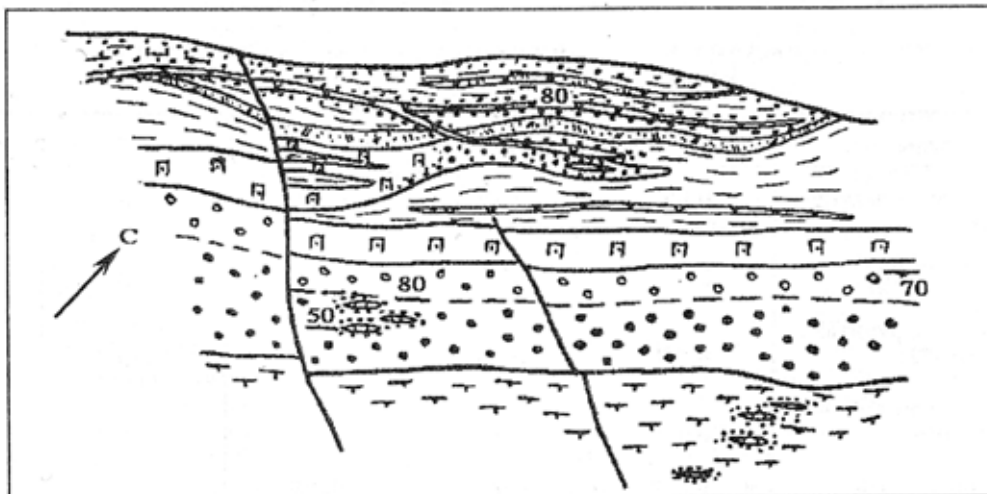


Рис. 7. Схема геологического строения участка Большой. Условные обозначения см. на рис. 4, залитые кружочки – дуниты

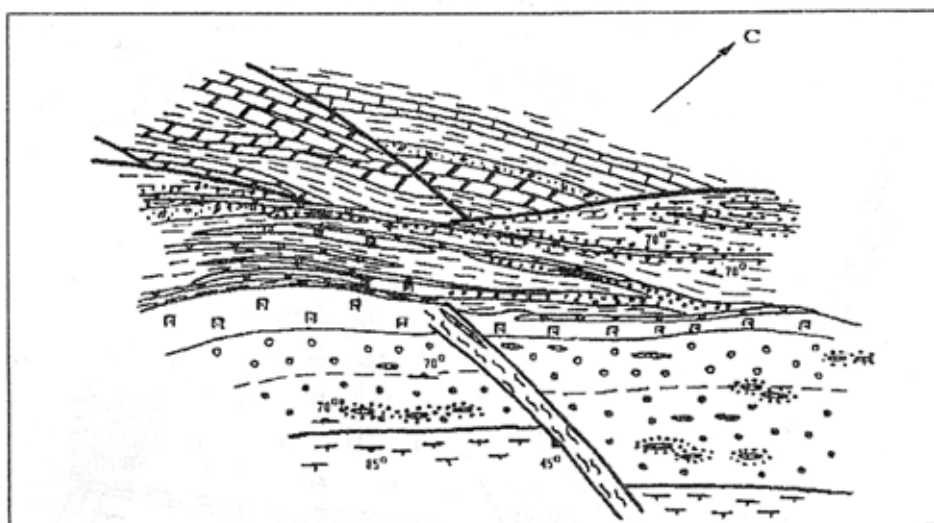


Рис. 8. Схема геологического строения участка Центральный
Условные обозначения см. на рис. 4, заливные кружочки – дуниты

породах за счет палладия существенно повышается относительная доля золота. Поведение платины и палладия в нижней части интрузива и малосульфидном горизонте существенно различается, что отражается в разнонаправленной корреляции величин $Pt/(Pt+Pd)$ и $Cu/(Cu+Ni)$ (рис. 12).

Нормированные по хондриту С1 концентрации ЭПГ и золота в основных типах платиноносных пород "рифа" образуют спектр с наклоном в сторону тугоплавких элементов (рис. 13). Характер спектра в целом соответствует малосульфидному типу оруденения ЭПГ расслоенных комплексов, а в пределах типа наиболее близок спектру платиноносных пород "рифа" Пикет-Пин массива Стилуотер (Boudreau, McCallum, 1986). Кривые распределения благородных металлов из

медно-никелевых руд нижней части массива отличаются более высокими значениями осмия и низкими – платины.

Особенности формирования сульфидного оруденения

Тесная корреляция состава сульфидной минерализации и несущих ее интрузивных пород обычно считается признаком магматического происхождения оруденения. Отмеченная выше изменчивость характера парагенезисов и их химического состава соответствует направлению эволюции сульфидного расплава при понижении температуры. Отмеченные зависимости также свидетельствуют, что сульфид-

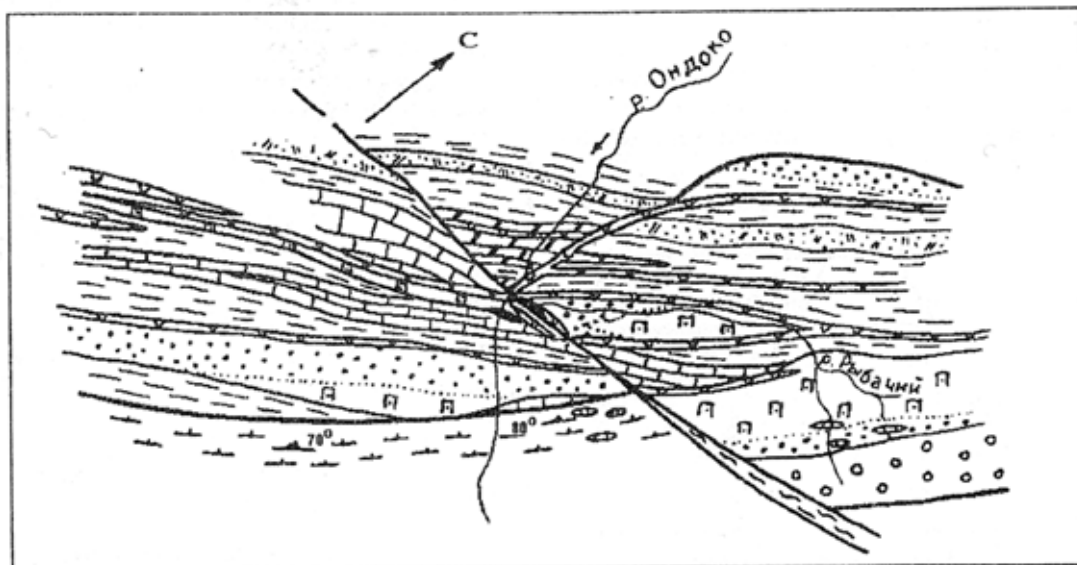


Рис. 9. Схема геологического строения участка Рыбачий
Условные обозначения см на рис. 4, заливные кружочки – дуниты

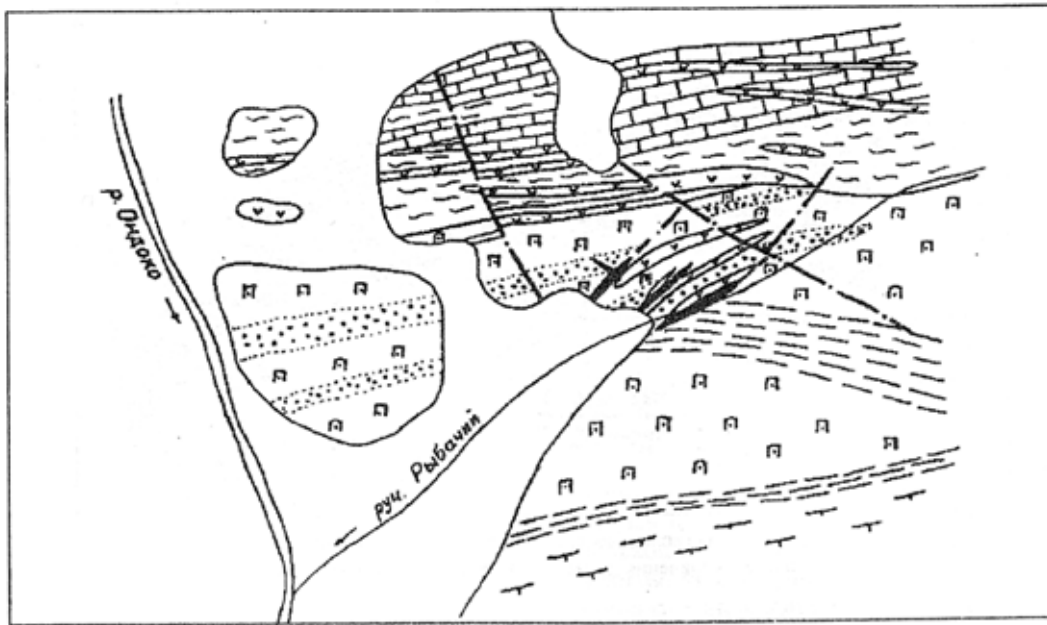


Рис. 10. Детали строения участка Рыбачий (по данным Л.М.Бабурина и др. с дополнениями авторов)
Условные обозначения см. на рис. 4

ное оруденение Йоко-Довыренского массива сингенетично содержащим его магматическим породам и что источником металлов (Ni, Co, Fe, Cu) для руд был расплав.

С.А.Гурулев (1965) полагал, что магма Йоко-Довыренского массива заимствовала серу из вмещающих пород и что именно ассимиляция серосодержащих осадков расплавом привела к образованию в интрузиве рудных скоплений.

Растворимость серы в "сухих" основных расплавах не превышает 0,10-0,15% (Альмухамедов, Медведев, 1982), а в ультраосновных - 0,16-0,47% (Shima, Naldrett, 1975). Но для флюидо- и, особенно, водосодержащих щелочных базальтовых расплавов Н.С. Горбачевым (1989) экспериментально установлена более высокая (до 1,5%) растворимость серы.

Диапазон колебаний изотопного состава серы медно-никелевых руд интрузива узок ($\delta^{34}\text{S} =$

$-3,1; +3,4\%$) и близок метеоритному стандарту (среднее значение $+0,36\%$, Качаровская и др., 1986). Для медно-никелевой минерализации плагиоперидотитов характерен еще более узкий диапазон значений $\delta^{34}\text{S}$: от $-0,07$ до $+1,68\%$ при среднем значении $+0,12\%$ (Качаровская и др., 1986). Изотопный состав серы пирит-пирротиновой минерализации приподожвенных алевролитов также близок метеоритному стандарту: $\delta^{34}\text{S} = -0,18\%$ (Конников, 1986). Сульфиды сингенетической вкрапленности в габбро-норитах ($-0,6\%$) и кварц-кальцитовых гидротермальных прожилков (пирротин $-1,0\%$, пирит $-3,1\%$) обогащены легкой серой (Качаровская и др., 1986).

Исходя из данных о магматическом происхождении металлов и серы, наличия мелких "капель" сульфидов в кристаллах оливина, других силикатов, можно предположить, что отделение сульфидного

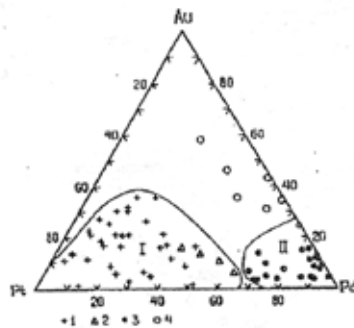


Рис. 11. Соотношение содержаний Pt, Pd и Au в породах и рудах Йоко-Довыренского массива:

1 - анортозиты; 2 - такситовые троктолиты; 3 - вкрапленные и массивные медно-никелевые руды; 4 - бессульфидные плагиоперидотиты и дуниты; I - поле составов из платиноносного "рифа"; II - поле составов из ультраосновной части массива

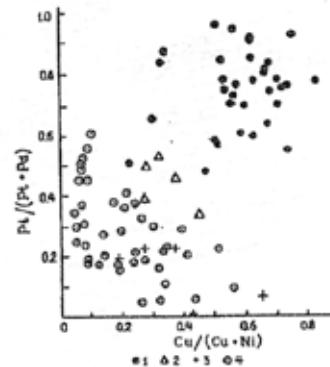


Рис. 12. Диаграмма соотношений Pt/(Pt+Pd) - Cu/(Cu+Ni) для платиноносных пород и руд Йоко-Довыренского массива:

1 - анортозиты и 2 - такситовые троктолиты платиноносного "рифа"; 3 - массивные и 4 - вкрапленные медно-никелевые руды ультраосновной части массива

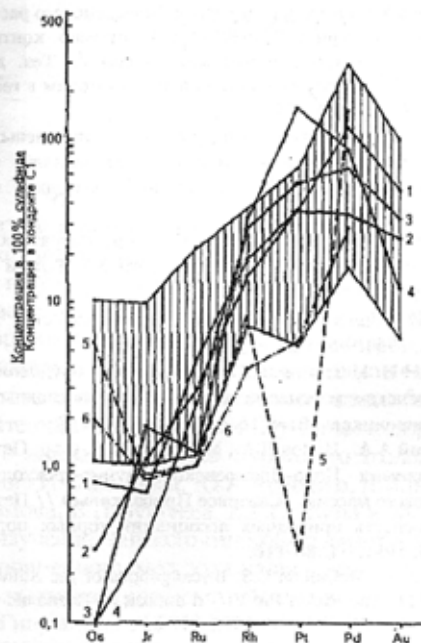


Рис. 13. Распределение нормированных по хондриту C1 содержаний благородных металлов в основных типах платиноносных пород Йоко-Довыренского массива:

1, 2 — такситовые троктолиты; 3, 4 — анортзиты; 5 — массивные и 6 — явкрапленные медно-никелевые руды (с использованием данных Дистлера, Степина, 1993); заштрихованная область — платиноносные породы "рифа" Пикет-Пин Стиллутерского комплекса (Boudreau, McCallum, 1986)

расплава от магмы происходило в близиквидусной области. Процесс силикатно-сульфидной ликвации, по-видимому, в значительной степени стимулировался процессами ассимиляции пикритоидным расплавом боковых пород. Об этом свидетельствует приуроченность максимальных концентраций сульфидов к эндоконтактовым зонам с наиболее отчетливыми признаками контаминации: нижней плагиоперидотитовой и околосенолитным вокруг фрагментов магнезиальных скарнов в верхней части дунитовой зоны. Вероятная причина этой взаимосвязи, по-видимому, заключается в следующем: повышение концентраций щелочей и воды в контаминированных участках магматической камеры вызвало увеличение растворимости серы, приводившее к их недосыщенности по сравнению с основным объемом расплава. Вследствие этого должно было начаться перераспределение серы в эти участки. В процессе снижения температуры, основности и объема расплава сера связывается с железом, медью, никелем, кобальтом, образуя сульфидную фазу. Подтверждением тесной связи процессов рудообразования с ощелочением рудно-магматической системы может служить прямая корреляция содержаний флогопита и сульфидов в породах плагиоперидотитового горизонта (Конников и др., 1990).

Для Байкальского месторождения характерна совмещенность сульфидного оруденения в плагиоперидотитах с секущими их габбро-норитами. При

этом габбро-нориты, как правило, обогащены не только сульфидами, но и флюидосодержащими минералами (флогопит, паргасит). Возможно, что формирование оруденения в этих участках аналогично образованию минерализации в зонах обводнения и ощелочения в плагиоперидотитах, взаимодействовавших с терригенными породами. Поступление воды и щелочей из габброидного расплава в приконтактовые участки плагиоперидотитов могло также привести к перераспределению в них серы. Вероятно, что связь оруденения и даек носит не генетический характер, а обусловлена трещинными структурами, контролировавшими размещение тех и других. Рассеянная сульфидная жидкость в незакристаллизовавшихся до конца плагиоперидотитах могла перераспределяться в участки хрупких деформаций, определивших затем расположение даек. Сульфидный расплав мог мигрировать в приконтактовую зону и после кристаллизации габброидной магмы из-за уменьшения объема. Причиной формирования сульфидного оруденения в ореоле габбро-норитовых даек также может быть привнос базальтоидным расплавом дополнительной серы. При смешении более богатого серой габброидного расплава с остаточной интерстициальной жидкостью плагиоперидотитов следует ожидать появления дополнительного количества сульфидов.

Литература

- Альмухамедов А.И., Медведев А.Я. Геохимия серы в процессах эволюции основных магм. — М.: Наука, 1982. — 148 с.
- Горбачев Н.С. Флюидно-магматическое взаимодействие в сульфидно-силикатных системах. — М.: Наука, 1989. — 240 с.
- Грудинин М.И. Петрография Нюрундуканского и Довыренского габбро-перидотитовых массивов (Северное Прибайкалье) // Петрография Восточной Сибири. — Т.111. — М.: Наука, 1965. — С.5-112.
- Гурулев С.А. Геология и условия формирования Йоко-Довыренского габбро-перидотитового массива. — М.: Наука, 1965. — 122 с.
- Гурулев С.А. Условия формирования основных расслоенных интрузий. — М.: Наука, 1983. — 248 с.
- Дистлер В.В., Степин А.Г. Малосульфидный платиноносный горизонт Йоко-Довыренского расслоенного гипербазит-базитового интрузива // Докл. Акад. наук. — 1993. — Т.328. — № 4. — С.498-501.
- Ионов Д.А. Геохимия пород и минералов и особенности кристаллизационной дифференциации Йоко-Довыренского расслоенного массива: Автореф. дис... канд. геол.-минер. наук. — М., 1984. — 17 с.
- Качаровская Л.Н. Сульфидные медно-никелевые руды Йоко-Довыренского расслоенного плутона (состав и условия образования): Автореф. дис... канд. геол.-минер. наук. — Улан-Удэ, 1986. — 20 с.
- Качаровская Л.Н., Конников Э.Г., Кавиладзе М.Ш. Изотопный состав серы и генезис сульфидных руд Йоко-Довыренского базит-гипербазитового массива // Геология и геофизика. — 1986. — №5. — С.52-57.
- Качаровская Л.Н., Трунева М.Ф. Исследование минералогии благородных металлов сульфидных медно-никелевых руд // Эндогенные процессы и оруденение в Забайкалье. — Улан-Удэ, 1986. — С.120-123.
- Кислов Е.В. Петрология, рудоносность и контактные процессы в Йоко-Довыренском массиве: Автореф. дис... канд. геол.-минер. наук. — Улан-Удэ, 1992. — 25 с.

- Кислов Е.В., Конников Э.Г. Контактные процессы и их роль в локализации сульфидного оруденения Його-Довыренского массива // Геолого-генетические модели и локальное прогнозирование эндогенного оруденения в Забайкалье. - Новосибирск, 1991. - С.31-38.
- Кислов Е.В., Конников Э.Г. Специфика взаимодействия габбро-норитового расплава с плагиоферидотитами Його-Довыренского массива // Геология и геофизика. - 1992. - №2. - С.68-77.
- Кислов Е.В., Конников Э.Г., Посохов В.Ф., Шалагин В.Л. Изотопные свидетельства коровой контаминации в Його-Довыренском массиве // Геология и геофизика. - 1989. - №9. - С.140-144.
- Конников Э.Г. Дифференцированные гипербазит-базитовые комплексы докембрия Забайкалья (петрология и рудообразование). Новосибирск: Наука, 1986. - 127 с.
- Конников Э.Г., Качаровская Л.Н., Загузин Г.Н., Постникова А.А. Особенности состава главных минералов сульфидных руд Байкальского медно-никелевого месторождения (Северное Прибайкалье) // Геология и геофизика. - 1990. - №2. - С.59-66.
- Конников Э.Г., Кислов Е.В., Качаровская Л.Н. Новые данные о рудоносности и петрологии Його-Довыренского никеленого плутона // Геология и геофизика. - 1988. - №3. - С.36-46.
- Конников Э.Г., Кислов Е.В., Цыганков А.А. Формационные типы никеленосных ультрамафитов Северного Прибайкалья // Геология рудных месторождений. - 1987. - №6. - С.38-45.
- Конников Э.Г., Куликова А.Б., Куликов А.А., Кислов Е.В. Распределение благородных металлов в гипербазит-базитовых комплексах Байкальской горной области // Геохимия. - 1987. - №7. - С.970-977.
- Контактные процессы и оруденение в габбро-перидотитовых интрузиях. - М.: Наука, 1979. - 138 с.
- Мануйлова М.М., Зарубин В.В. Вулканогенные породы докембрия Северного Прибайкалья. - Л.: Наука, 1981. - 88с.
- Медно-никелевые месторождения Балтийского щита/Горбунов Г.И., Загородный В.Г., Робонен В.И. и др. - Л.: Наука, 1985. - 329 с.
- Медь-никеленозные габброидные формации складчатых областей Сибири / Кривенко А.П., Готов А.И., Балыкин А.П. и др. - Новосибирск: Наука, 1990. - 237 с.
- Неймарк Л.А., Немчин А.А., Амелин Ю.В., и др. Геохимия изотопов Nd и Pb в породах Його-Довыренского расслоенного массива (Северное Прибайкалье): пример контаминации основных магм осадочным материалом // Тез. докл. XI Всесоюз. симпозиума по стабильным изотопам в геохимии. - М., 1989. - С. 323-324.
- Нюппенен Т.И. О первичных ореолах медно-никелевых сульфидных проявлений Його-Довыренского массива (Северное Прибайкалье) // Методика и техника разведки: Сб. №50. 1965. - С.21-36.
- Петрология сульфидного магматического рудообразования / Дистлер В.В., Гроховская Т.Л., Евстигнеева Т.Л. и др. - М.: Наука, 1988. - 232 с.
- Салоп Л.И. Геология Байкальской горной области. Т.1. - М.: Недра, 1964. - 515 с.
- Шишкин Н.Н. Медно-никелевое сульфидное оруденение в Його-Довыренском массиве основных и ультраосновных пород / Тр. Гипроникель; Вып. 16. - 1963. - С.92-118.
- Ярошенский А.А., Ионов Д.А., Миронов Ю.В. и др. Петрография и геохимия Його-Довыренского дунит-троктолит-габбро-норитового массива (Северное Прибайкалье) // Петрология и рудоносность природных ассоциаций горных пород. - М.: Наука, 1981. - С.86-116.
- Boudreau A.E., McCallum L.S. Investigations of the Stillwater Complex: 111. The Picket Pin Pt/Pd deposit // Economic Geology. - 1986. - Vol.81, №8. - P. 1953-1975.
- Duke J.M., Naldrett A.J. A numerical model of the fractionation of olivine and molten sulfide from komatiite magma // Earth Planet. Sci. Lett. - 1978. - Vol.39. - P.255-266.
- Kislov E.V., Orsoev D.A., Konnikov E.G. PGE-bearing horizons of the Ioko-Dovvren layered massif, Northern Transbaikalia, Russia // Terra nova. - 1993. - Vol.5. Abstract supplement №3. - P.23.
- Naldrett A.J. Nickel sulfide deposits: Classification, composition and genesis // Economic Geology. - 1980. - Vol.75. - P.628-685.
- Naldrett A.J., Duke J.M., Lightfoot P.C., Thompson J.E.H. Quantitative modelling of the segregation of magnetic sulphides: an exploration guide // Can. Miner. Metall. Bull. - 1984. - №4. P.1-10.
- Shima H., Naldrett A.J. Solubility of sulfur in an ultramafic melt and relevance of the system Fe-S-O // Economic Geology. - 1975. - Vol.70. - P.960-967.

* * *