

**Е. В. Кислов^{1,2}, А. А. Арискин^{3,4}, Л. В. Данюшевский⁵,
Г. С. Николаев⁴, А. В. Малышев^{1,2}**

¹ – Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ
evg-kislov@ya.ru

² – Бурятский государственный университет, г. Улан-Удэ

³ – Московский государственный университет, г. Москва

⁴ – Институт геохимии и аналитической химии РАН, г. Москва

⁵ – Центр исследований рудных месторождений (CODES),
Тасманийский университет, г. Хобарт, Австралия

Малосульфидное платинометальное оруденение в дунитах и троктолитах Йоко-Довыренского массива (Северное Прибайкалье, Россия)

Введение. Йоко-Довыренский интрузив – слабо измененный расслоенный ультрамафит-мафитовый массив возраста ~728 млн лет [Арискин и др., 2013]. Его субвертикальное падение позволяет изучать его опробованием поверхностных обнажений от подошвы до кровли. В наиболее мощной центральной части (до 3.5 км) выделяются породы эндоконтакта (закаленные пикродолериты, переходящие в плагиоклазовые лерцолиты) и пять зон, отвечающие (снизу вверх) преобладающим минералам: дуниты (Ol+Chr) → расслоенные троктолиты (Ol+Pl+Chr) → оливиновые габбро (Pl+Ol+Crх) → оливиновые габбронориты (Pl+Ol+Crх±Orх) → кварцевые габбронориты и пижонитовые габбро (Pl+Crх±Orх±Pig). Зона верхнего контакта сложена мелкозернистыми габброноритами проблематичного происхождения. Интерес к плутону первоначально вызвали Cu-Ni сульфидные руды в подстилающих силлах и эндоконтакте [Гурулев, 1965; Кислов, 1998]. Позднее на границе троктолитов и оливиновых габбро зафиксированы анортозиты с малосульфидной минерализацией ЭПГ [Дистлер, Степин, 1993; Кислов и др., 1995]. Отмечены также пирротин-пентландитовая минерализация в участках контаминации карбонатным материалом верхней части дунитовой зоны, а также пирротинное оруденение в верхних габброноритах. Мы представляем новые данные о малосульфидном оруденении в более меланократовых породах из нижних частей дунитовой и троктолитовой зон.

Методы исследований. С 2006 г. нами изучаются разные типы сульфидной минерализации Йоко-Довыренского массива. Большая часть анализов выполнена в Центральной научной лаборатории Тасманийского университета (г. Хобарт, Австралия) с применением методов лазерной абляции сульфидных фаз (для определения микроэлементного состава) и электронной микроскопии (для оценки среднего минерального состава сульфидов). Главные фазы сульфидов: пентландит (Pn), пирротин (Po), халькопирит (Cpy) и кубанит (Cub). Содержания Fe, Cu, Ni, Co, Zn, Ag, Re, Cd, ЭПГ и Au в них определялись на масс-спектрометре ICP-MS Agilent7500s; размер лазерного пучка составлял 10–34 мкм. Средний минеральный состав сульфидов (пропорций Pn/Po/Cpy/Cub) оценен с помощью автоматизированной идентификации фаз на сканирующем электронном микроскопе FEI Quanta 600, который оборудован энергодисперсионным спектрометром (EDS) в сочетании с пакетом программ «Mineral Liberation Analyzer» (MLA). Измерения проводились на полированных пашках даже в случае убогой минерализации при валовых содержаниях серы менее 0.1 мас. %. Относительные пропорции Pn, Po, Cpy и Cub рассчитывались путем

нормирования числа «попаданий» в конкретную минеральную фазу к общему числу микроучастков сульфидов.

Малосульфидная минерализации в нижних троктолитах. В нижней части троктолитовой зоны в свалах и коренных обнажениях обнаружены мезократовые троктолиты с мелкими шлирами и обособлениями гетерогенного материала (Ol+Pl+сульфид) размером до 5–10 см. В них было обнаружено свыше 30 зерен МПГ. Размер отдельных зерен достигал 20–30 мкм. Исследования микроэлементного состава Pn в двух представительных шашках показали достаточно высокие содержания (г/т) Pd (19.4 ± 32.5 и 23.1 ± 7.2), Rh (11.1 ± 8.8 и 23.1 ± 7.2), Ru (3.6 ± 2.4 и 7.5 ± 4.7), Os (2.7 ± 1.8 и 4.2 ± 3.3) и Ir (3.8 ± 3.8 и 6.7 ± 4.0). Содержания платины в зернах Pn составляли 0.15 ± 0.27 и 0.04 ± 0.02 г/т, соответственно.

Находки богатых МПГ сульфидов в низах троктолитовой зоны могли бы объясняться колловиальным переносом минерализованных пород из расположенной выше зоны перехода троктолитов к оливиновым габбро. Однако микронзондовые исследования указывают на более примитивный характер троктолитов (Fo 84.6 ± 0.2 , An 7.2 ± 2.1) по сравнению с породами, вмещающими минерализованные анортозиты (Fo $81-84$, An 84.4 ± 0.7). Можно предположить, что высокомедистая и богатая ЭПГ сульфидная жидкость могла просачиваться из зоны формирования Главного Рифа сквозь поровое пространство частично затвердевших троктолитовых кумулатов. Этому противоречит высоко Os-Ru-Ir состав Pn из троктолитов: содержания этих элементов, в среднем, на порядок превышают концентрации в Pn из Главного Рифа. Таким образом, геологический факт обнаружения столь необычного типа сульфидной минерализации и ее геохимические особенности оставляют мало сомнений в том, что богатые ЭПГ сульфиды концентрировались также и в нижней части троктолитовой зоны Йоко-Довыренского массива. Этот вывод может иметь важное генетическое значение для исследований ЭПГ-минерализации в других крупных расслоенных интрузивах.

Малосульфидная минерализации в нижних дунитах образует горизонт мощностью 150 м, отвечающий постепенному переходу от плагиодунитов к нижней части дунитовой зоны. Он начинается на высоте ~170 м от нижнего контакта и отмечен увеличением содержания S от 0.02–0.03 до 0.09–0.14 мас. %. Вверх по разрезу снижается количество пойкилокротов Pl+Crх, увеличивается количество кумулюсового Ol и содержание MgO от ~35 до 38–39 мас. %. Следующие ~20 м горизонта – граничная зона переходных дунитов, где пойкилитовая структура Ol кумулатов полностью сменяется гипидиоморфной. Несмотря на адкумулатный габитус этих пород с MgO >40–41 мас. %, содержание S может достигать 0.3 и даже 0.6 мас. %. Нерегулярные вариации концентраций S в дуните продолжаются до высоты ~320 м, что также отражается в валовой геохимии Cu, Ni, и, особенно, IPGE.

Сульфиды в безрудных и минерализованных породах горизонта наблюдаются в виде отдельных мельчайших полиминеральных зерен и более крупных (до 1 мм) многокомпонентных агрегатов Pn+Crх±Po. Наиболее распространенная форма – интерстициальные выделения, заполняющие пространство между немного скругленными зернами Ol. Взаимопрорастание с интеркумулюсным флогопитом также распространено, тогда как с интеркумулюсными Pl и Crх – встречается очень редко. Тесная связь сульфидов с хромитом в интерстициях типична; в некоторых случаях довольно большие включения сульфидов найдены в интеркумулюсном хромите. Магматическая природа минеральной ассоциации подтверждается неизменностью как Ol, так сульфидных агрегатов.

Непосредственно под горизонтом находится слой мощностью ~10 м обеденных сульфидами (0.03–0.04 мас. % S) и обогащенных хромитом (~1 мас. % Cr₂O₃) плагиодунитов, содержащих ареалы тонко рассеянных включений сульфидов, главным образом, в интерстициальном Pl, в редких случаях – в Ol. Это может интерпретироваться как сигнал сульфидной несмесимости, которая произошла *in situ* в середине поздней стадии затвердевания этих мезокумулятов, окончательно закристаллизовавшихся как пойкилитовые плагиодуниты.

Углы сульфидных интерстиций трех образцов из интервала 189–243 м над нижним контактом – острые (60°) до капилляров между зернами Ol. Это может свидетельствовать о том, что сульфидная жидкость смачивала кристаллы Ol, порождая неправильные области взаимосвязанных сульфидов. Это обычно рассматривается как свидетельство сульфидного осаждения на месте и неспособности сульфидов мигрировать через поровое пространство Ol кумулуса. Однако вверх по разрезу двугранные углы увеличиваются до 90°, зерна сульфидов приобретают округлый габитус, особенно на контакте с интеркумуляусными Pl и флогопитом. Более высокие значения углов (68–115°) свидетельствуют о «несмачивающем» поведении сульфидной жидкости, приводящем к формированию отдельных капелек и способствующей их коалесценции. Такая «несмачивающая» сульфидная жидкость могла проникнуть через толщу Ol кумулуса сверху, вероятно, на поздних стадиях затвердевания кумулатов.

Сульфиды плагиодунитов и дунитов чрезвычайно обогащены Pn (обычно >60 %) с количеством медистых сульфидов Cru+Sub не более 15 %. Большинство сульфидных ассоциаций дунитов не содержат Po с вариациями от почти чистого Pn до ~38 % Cru+Sub. В плагиодунитах сульфиды более разнообразны в отношении Pn/Po – от <5 до ~40 % Po. Принятая за «исходный сульфид» ассоциация закаленного плагиоперидотита более богата Po и содержит лишь ~12 % Pn. Это может быть индикатором своего рода «фракционирования», или реакции обмена Fe-Ni, сопровождающего эволюцию интеркумуляусных сульфидов во время затвердевания оливинных кумулатов.

Просачивание сульфидов через слабо минерализованную зону косвенно подтверждается распределением благородных металлов в среднем сульфиде. Большой разброс их содержаний, достигающий трех-четырех порядков концентраций, отражает высокую неоднородность по составу, которую трудно объяснить с позиций кристаллизации сульфидов *in situ* из того же самого интеркумуляусного расплава в подобных по составу кумулатах. Пространственное распределение благородных металлов также очень неоднородно. В основной части горизонта малосульфидных дунитов (начинающейся с высоты ~190 м) самые высокие концентрации Os, Ru и Rh в сульфидах наблюдались в пределах слоя мощностью ~7 м нижних плагиодунитов, тогда как Pd и Pt показывают пиковые концентрации на 3–4 м выше; Re, а затем Ag и Cd сконцентрированы в вышележающем горизонте с максимумом Au, наблюдаемом около основания дунитовой зоны.

Как и в других платиноносных интрузивах, большая часть PGE (Os, Ir, Ru, Pd, Rh) и Re сконцентрированы в Pn, где их среднее содержание на порядок выше, чем в сосуществующем Po. Содержания Ag и Cd в этих двух минералах сильно варьируют (от ~0.2 до 100 г/т), в то время как содержания Au и Pt низкие, обычно менее 0.1 г/т. Распределение этих элементов в Cru очень сходно с таковым в Sub с содержанием Ag и Cd заметно выше, чем в Pn и Po. Концентрации Os, Ir, Pt и Au в медистых сульфидах обычно ниже предела обнаружения, тогда как Rh и Pd в Cru показывают промежуточные значения между Pn и Po.

Os и Ru показывают определенную корреляцию с нижними плагиодунитами, включающими сульфиды с самыми высокими содержаниями этих элементов. Менее очевидная положительная корреляция может быть прослежена для Ir к Ru и Rh к Ru; однако в обоих случаях составы сульфидов нижних плагиодунитов значительно отклоняются к более высокому содержанию Ru от общих геохимических тенденций. Эти наблюдения могут указывать на присутствие другой фаз(ы)-концентратора Os и Ru в этих породах (помимо сульфидов цветных металлов), таких как интерметаллические соединения, хромит или/и лаурит RuS₂. В связи с этим выполнен предварительный скрининг методом LA-ICP-MS 46 зерен хромита в двух образцах нижних плагиодунитов. В одном из образцов (09DV501-7, 34 анализа хромита) во время бурения лазерных отверстий были найдены шесть относительно больших (5–15 мкм) «включений» Os+Ir±Ru (Л. В. Данюшевский, личное сообщение). То есть хромит мог действовать как доминирующая фаза, определяющая валовое содержание Os, Ir, Ru и Rh, наряду с сосуществующими минералами ЭПГ и сульфидами. Интересно, что очень редкие рассеянные сульфиды того же 09DV501-7 (содержащего лишь 0.03 мас. % S) характеризуются самыми высокими средними концентрациями Ru (43.4±41.0 г/т) и Os (22.5±19.4 г/т) в горизонте малосульфидных дунитов. Таким образом, нельзя исключить возможность эффективного диффузного обмена IPGE между хромитом и сульфидами.

До сих пор малосульфидной минерализации в приподошвенных плагиодунитах и дунитах не придавалось особого значения. Но мы полагаем, что малосульфидные дуниты представляют фундаментальное генетическое значение, поскольку могут обеспечить понимание ранних стадий формирования, развития и вероятной миграции несмешивающейся сульфидной жидкости в затвердевающей преимущественно оливиновой толще кумулуса.

Работа поддержана Российским научным фондом, грант № 16-17-10129.

Литература

- Арискин А. А., Конников Э. Г., Данюшевский Л. В., Костицын Ю. А., Меффре С., Николаев Г. С., Мак-Нил Э., Кислов Е. В., Орсов Д. А. Геохронология Довыренского интрузивного комплекса в Неопротерозое (Северное Прибайкалье, Россия) // Геохимия. 2013. № 11. С. 955–972.
- Гурулев С. А. Геология и условия формирования Йоко-Довыренского габбро-перидотитового массива. М.: Наука, 1965. 122 с.
- Дистлер В. В., Степин А. Г. Малосульфидный платиноносный горизонт Йоко-Довыренского расслоенного гипербазит-базитового интрузива (Северное Прибайкалье) // Доклады академии наук. 1993. Т. 328. № 4. С. 498–501.
- Кислов Е. В. Йоко-Довыренский расслоенный массив. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 1998. 264 с.
- Кислов Е. В., Конников Э. Г., Орсов Д. А., Пушкарев Е. В., Воронина Л. К. Роль хлора в формировании платиноносных горизонтов Йоко-Довыренского расслоенного массива по результатам изучения флюидсодержащих минералов // Доклады академии наук. 1995. Т. 340. № 6. С. 805–808.