

МОРФОЛОГИЯ, МИНЕРАЛОГИЯ И СОСТАВ СУЛЬФИДНЫХ КАПЕЛЬ В ПИКРОДОЛЕРИТАХ ИЗ ПРИДОННЫХ АПОФИЗ ЙОКО-ДОВЫРЕНСКОГО РАССЛОЕННОГО ИНТРУЗИВА

© 2020 г. И. В. Пшеницын^{a, b, *}, А. А. Арискин^{a, b}, Г. С. Николаев^b, Е. В. Кислов^c,
Д. В. Корост^a, В. О. Япаскерт^a, С. Н. Соболев^a

^aМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Геологический факультет, Воробьевы Горы, 1, Москва, 119234 Россия

^bИнститут геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, ул. Косыгина 19, Москва, 119991 Россия

^cГеологический институт СО РАН, ул. Сахьяновой 6, Улан-Удэ, 670047 Россия

*e-mail: lotecsi@gmail.com

Поступила в редакцию 18.06.2019 г.

После доработки 10.11.2019 г.

Принята к публикации 27.12.2019 г.

Представлены результаты исследований сульфидных глобул в пикродолеритах из придонного апофиза Йоко-Довыренского массива (Северное Прибайкалье). Структурные особенности этих пород указывают на кристаллизацию в условиях быстрого остывания магмы, а их состав близок к составу закаленных оливиновых габброноритов из нижнего контакта массива. Используя методы рентгеновской компьютерной томографии, в одном из образцов было обнаружено множество каплевидных глобул размером от 2 до 15 мм. Наиболее крупная глобула была выбурена и изучена детально. Это позволило уточнить ее строение, которое включает основной сфероид и окружающее гало из тонкой сульфидной вкрапленности. Используя средние составы для главных сульфидных фаз и их относительные пропорции, установлены существенные различия среднего химического состава главной капли и окружающего гало, которое оказалось богаче медью. Средневзвешенный (с учетом гало) состав можно рассматривать как аппроксимацию исходной сульфидной жидкости, формировавшейся вблизи зоны закалки габброноритового апофиза из главной интрузивной камеры. Содержание меди в исходном сульфиде отвечает результатам термодинамического моделирования геохимии примитивных сульфидов в ультрамафитах основания массива по программе COMAGMAT-5. Различия в составе гало и основной капли указывают на возможность локальной миграции (в масштабе первых мм) остаточных сульфидных жидкостей, обогащенных медью на этапе дифференциации протосульфидного расплава. В качестве физического механизма формирования гало предполагается отжим наиболее поздней сульфидной фракции в поровое пространство быстро кристаллизующихся оливиновых ортокумулатов.

Ключевые слова: Йоко-Довыренский массив, пикродолерит, рентгеновская компьютерная томография, сульфидные капли, протосульфидная жидкость

DOI: 10.31857/S0869590320030061

ВВЕДЕНИЕ

Характерной особенностью многих Cu-Ni-ЭПГ рудоносных ультрамафит-мафитовых комплексов является наличие сульфидных глобул, ассоциирующих с другими типами сульфидной минерализации, включая богатые вкрапленные, сидеронитовые и массивные руды (Barnes et al., 2017, 2019). Как правило, они приурочены к нижним частям интрузивных тел (Лихачев, 2006; Barnes et al., 2006; Спиридонов, 2010; Le Vaillant et al., 2017; Krivolutskaia et al., 2018), но были обнаружены также в центральной части расслоенных серий интрузивов (Holwell et al., 2016), иногда вблизи контактов

магнезиальных габброидов и лейкогаббро (Vishnevskiy, Cherdantseva, 2016). Размер этих глобул варьирует от первых миллиметров до нескольких сантиметров; уникальные проявления таких глобул включают сфероиды диаметром до 5–10 см (С.Ф. Служеникин, личное сообщение). В их составе преобладают пирротин и пентландит при подчиненной роли медистых сульфидов – халькопирита и кубанита. Для этих образований типична фазовая расслоенность, которая выражается в разделении на обогащенную высокомедистыми сульфидными верхнюю часть глобулы и существенно пентландит-пирротинную нижнюю (Patten et al., 2013; Duran et al., 2007; Czamanske et al., 1992;

Barnes et al., 2006). В случае минерализованных пород, отвечающих поздним стадиям дифференциации интрузивных магм, глобулы мельче и сложены более медистыми ассоциациями, вплоть до борнит-дигенитовых, как это имеет место в Платинова Риф (Platinova Reef) интрузива Скаергаард (Holwell, Keays, 2014; Holwell et al., 2016).

Сферический облик и близость среднего состава интрузивных глобул к составу микроглобулярных образований в стеклах и оливине из океанических базальтов (Czamanske et al., 1992; Francis, 1990) являются основанием рассматривать эти признаки как отражение сульфидной ликвации в процессе эволюции мафит-ультрамафитовых магм внутри магматических камер, например, (Рябов и др., 2001). Такая интерпретация подкреплена сотнями экспериментов, направленных на изучение силикатно-сульфидной несмесимости в синтетических и природных алюмосиликатных системах, см. обзоры (Baker, Moretti, 2011; Ariskin et al., 2013; Fortin et al., 2015). Причем, для интрузивных тел понятие “магматической эволюции” распространяется не только на процессы внедрения и кристаллизации исходных магм, но также и позднее при кристаллизации интрузивов — с возможностью зарождения сульфидных капель в интеркумуляном расплаве и транспорта продуктов их агломерации сквозь поровое пространство примитивных и дифференцированных кумулатов (Mungall, Su, 2005; Chung, Mungall, 2009; Ariskin et al., 2016, 2018a).

Генетическая запись пород с сульфидными каплями не исчерпывается фактом сульфидной ликвации. Хорошо известно, что благородные металлы (включая элементы платиновой группы — ЭПГ) и другие халькофильные элементы с учетом высоких коэффициентов разделения сульфид–силикат (Patten et al., 2013; Mungall, Brenan, 2014) практически экстрагируются из магматического расплава первыми порциями исходной сульфидной жидкости (Campbell, Naldrett, 1979; Арискин и др., 2017). Это приводит к контролю поведения ЭПГ, Au, Ag, Re и халькогенов (Se, Te) сульфидной фазой в магматическом процессе, во многом определяя характер их распределения в породах и постмагматического минералообразования с участием этих элементов (Naldrett, 2004, 2011). Таким образом, в валовом составе сульфидных капель (особенно, если они приурочены к наименее фракционированным зонам интрузивных тел) может содержаться информация о наиболее примитивном сульфиде — той несмесимой протосульфидной жидкости, с которой связана последующая минералого-геохимическая эволюция платиноидов и других благородных металлов (Holwell, McDonald, 2010; Ariskin et al., 2018a, 2018b).

Реконструкция этих исходных составов — непростая задача, поскольку доступные изучению сульфидно-глобулярные образования представлены многофазовыми ассоциациями — как результат кристаллизации протосульфидных жидкостей в интервале температур от магматических до субсолидусных. Экспериментальные исследования показали кристаллизацию сульфидных систем в два основных этапа: (1) сначала выделение Fe-Ni моносульфидного твердого раствора (Mss) с образованием комплементарных наиболее богатых медью сульфидных жидкостей (обогащенных платиноидами, Zn, Ag, Cd, Sn, Pb, Bi, Te и Se), затем (2) кристаллизация этих остаточных систем, состав которых близок таковому высокотемпературных кубических сульфидных Ni-Cu-Fe твердых растворов (Iss), см. (Kullerud et al., 1969; Ebel, Naldrett, 1996; Tsujimura et al., 2004; Синякова, Косяков, 2012; Синякова и др., 2017). На эту историю накладываются субсолидусные преобразования, записанные в структурах распада и при перекристаллизации ранее выделенных фаз. Минералогические исследования этих соотношений позволяют выстроить более детальную генетическую последовательность, включающую две разновидности исходных Mss-растворов (Mss1 и Mss2) и пять типов высокомедистых ассоциаций — Iss1 → Iss2 →... Iss5 (Спиридонов, 2010; Спиридонов и др., 2019), возможно, усложненных перетектическими реакциями сульфидных твердых растворов с остаточным расплавом (Fleet, 2006). По этим причинам валовые содержания главных металлов (Fe, Ni, Cu, Co) в исходных сульфидных жидкостях требуют максимально точных оценок относительных пропорций и состава всех компонентов этих полигенетических ассоциаций (Czamanske et al., 1992; Ariskin et al., 2016). В случае благородных металлов и халькогенидов задача усложняется, поскольку основная масса этих микроэлементов обычно присутствует в сульфидах в виде самостоятельных минералов микронного размера (висмотеллуриды, арсениды, станниды, плюмбиды), которые к тому же могли быть переотложены под воздействием позднематических флюидов (Boudreau, 2019).

Не менее важен тот факт, что сульфидное каплеобразование связано с динамической эволюцией сульфидонасыщенных систем, включающей коалесценцию микроглобул, транспорт и гравитационное накопление относительно крупных сегрегаций и капель в подводящих каналах или в придонных участках магматических камер (Лихачев, 2006; Robertson et al., 2016; Krivolutskaya et al., 2018). Некоторые авторы допускают определенную роль флюидных пузырьков в переносе сульфидных капель (Barnes et al., 2019). Ассоциация глобулярных сульфидов с массивными рудами подчеркивает общность процессов их образования, для классификации и расшифровки которых в последние годы активно применяются методы

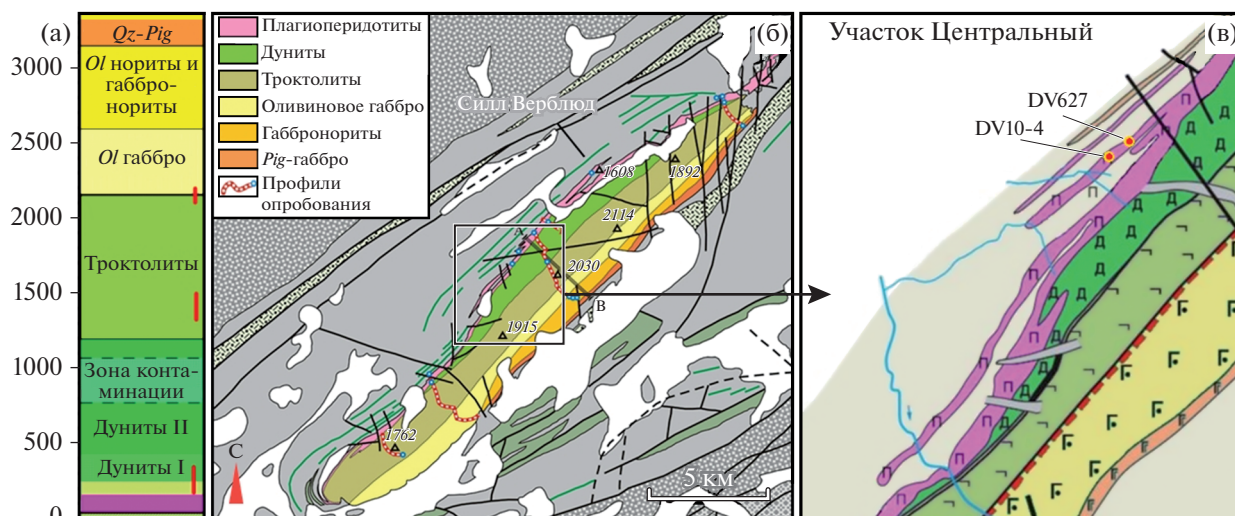


Рис. 1. Геологическое строение Йоко-Довыренского массива и точки опробования пород с глобулярными сульфидами. (а, б) – по данным (Ariskin et al., 2018a), (в) – центральный участок интрузива, по данным (Орсоев и др., 2018) с дополнениями. Нижняя зона осложнена наличием подстилающих плагиоперидотитовых силлов/апофизов, включающих рассеянную минерализацию и сульфидные руды, с которыми ассоциируют проявления пород с сульфидными каплями (точки DV10-4 и DV627).

рентгеновской компьютерной томографии (далее КТ), например, (Godel et al., 2006; Barnes et al., 2008, Holwell et al., 2016; Корост и др., 2019). Основой подобных исследований является предположение, что динамика транспорта сульфидного вещества должна быть записана в текстурных особенностях сульфидоносных пород, в том числе в морфологии и объемном распределении глобулярных образований (Barnes et al., 2016, 2017).

В настоящей работе впервые представлены результаты изучения изометричных сульфидных глобул (фактически капель) из образца пикродолерита, опробованного в основании центральной части Йоко-Довыренского расслоенного массива (Северное Прибайкалье, Россия). Такие породы были обнаружены в разведочной канаве, вскрывающей апофизу с линзами рудоносных ультрамафитов, вблизи сложноустроенного нижнего контакта массива (рис. 1, справа). Особенности структуры и состава минерализованных пикродолеритов позволяют предполагать, что глобулы приурочены к контакту апофиза и образовались при быстром остывании магмы, подобно приконтактовым пикродолеритам в других частях массива (см. ниже). Пространственная ассоциация пород с сульфидными каплями с богатыми вкрапленными и сидеронитовыми рудами свидетельствует, что разнообразие типов минерализации (см. Введение) отражает определенную последовательность накопления сульфидного материала в низах магматической камеры.

Мы интерпретируем эти сульфиды как капли несмесимого расплава и акцентируем внимание на особенностях их строения, используя (помимо

петролого-минералогических методов) структурно-морфологический и генетический анализ на основе результатов КТ-исследований, в сочетании с оценками относительных пропорций главных сульфидных фаз. Такой подход позволяет визуализировать структурные соотношения сульфидной фазы и силикатной матрицы в разных масштабах, включая детальное строение одной из сульфидных капель. Эти данные явились основой для оценки среднего химического состава сульфидной глобулы. Результаты подобных расчетов аппроксимируют состав ранней или слабо фракционированной сульфидной жидкости в интрузивной камере, что крайне важно для реконструкции истории сульфидного насыщения довыренских магм (Ariskin et al., 2018b). Впервые обсуждаются проблемы гетерогенности сульфидных глобул, указывающие на пространственное разделение Mss -растворов и обогащенных медью сульфидных фракций в субмиллиметровом масштабе.

ГЕОЛОГИЯ ЙОКО-ДОВЫРЕНСКОГО МАССИВА

Географическое положение Йоко-Довыренского массива и геологическая трактовка подстилающих его силлов

Йоко-Довыренский массив (далее “Довырен”) расположен в складчатом обрамлении юга Сибирской платформы, примерно в 60 км к северо-востоку от побережья оз. Байкал (пос. Нижнеангарск). Это крупнейший из интрузивов Сыннырско-Довыренского вулканоплутонического комплекса, U - Pb изотопный возраст пород которого по цирконам по-

падает во временной интервал от 728.4 ± 3.4 млн лет (интрузивный комплекс) до 722 ± 7 млн лет для ассоциирующих вулканитов (Арискин и др., 2009, 2013). Результаты U-Pb датирования по бадделеиту из пегматоидного габбронорита в верхах массива дают возраст в 724.7 ± 2.5 млн лет (Ernst et al., 2016).

Породы Довырена залегают согласно с вмещающими породами среди крутопадающих карбонатно-терригенных (преимущественно черносланцевых) толщ Сыннырского рифта (Конников, 1986; Рыцк и др., 2002). Довырен имеет субвертикальное падение, что дает возможность опробовать стратиграфические разрезы от нижнего до верхнего контакта. При этом в основании Довырена, ниже закаленных контактов, прослеживаются протяженные (до нескольких километров) ультрамафит-мафитовые тела, которые принято называть плагиоперидотитовыми (Кислов, 1998) или габбро-перидотитовыми силлами (Орсоев и др., 2018). Они рассматриваются как неотъемлемый компонент Довыренского интрузивного комплекса (Арискин и др., 2015) и обычно отделены от главного интрузивного тела мощными (до 150–200 м) прослоями ороговикованных вмещающих пород. Результаты геологического картирования массива показывают (рис. 1б, 1в), что в центральной, наиболее мощной, части эти протяженные силы могут примыкать к базальному основанию Довырена (Ariskin et al., 2018b). Таким образом, подстилающие тела габбро-перидотитов или, по крайней мере, некоторые из них можно рассматривать как апофизы или ответвления от Довырена, а горизонты роговиков – как неперемещенные линзы вмещающих пород, подвергнутых контактовому термальному метаморфизму.

На основании петрологических реконструкций установлено, что нижние породы Довырена, от пикродолеритов до плагиоперидотитов, представлены незакономерным переслаиванием двух типов оливиновых кумулатов – наиболее примитивных (оливин Fo_{88} , $T \sim 1290^\circ\text{C}$) и более эволюционированных с оливином, магнезиальность которого не выше Fo_{86-87} в равновесии с магмами при температуре ниже 1240°C (Ariskin et al., 2018a). Причем, плагиоперидотиты второго типа по составу оливина близки к породам подстилающих и примыкающих к базальной зоне силлов. Такая гетерогенность вызвала многолетние дискуссии по вопросу – относятся/принадлежат ли плагиоперидотиты к основанию стратиграфического разреза Довырена (Арискин и др., 2009) или же представляют самостоятельные фазы внедрения (Конников, 1986)? Д.А. Орсоев с соавторами (2018) представили находки ксенолитов плагиоперидотитового состава из верхней мафической части Довыренского интрузива, интерпретируя эти породы как аналог или реликты габбро-перидотитовых силлов, что предполагает их

более раннее внедрение. Мы полагаем, что химическая гетерогенность базальной части Довырена при отсутствии холодных контактов между инъекциями магматического материала свидетельствует о практически одновременном внедрении и взаимном импрегнировании производных одной и той же высокомагнезиальной магмы в виде гетерогенных смесей оливин–расплав при температурах, различающихся на 100°C . Причем, наиболее примитивные магмы были недосыщены относительно сульфидной фазы, а продукты их кристаллизации (вероятно, уже в магмоподводящей системе) содержали некоторое количество сульфидов (Ariskin et al., 2018a). Это обстоятельство важно учитывать при обсуждении природы пород с глобулярными сульфидами, которые встречаются в подстилающих телах, состоящих из относительно дифференцированных оливиновых кумулатов.

Строение и сульфидная минерализация Йоко-Довыренского массива

Для удобства выделим три основные структурные группы в стратиграфической последовательности пород Довырена: (1) базальная зона или краевая группа (мощностью 150–200 м), (2) главная расслоенная серия (мощностью от ~ 3 км в центре до ~ 1 км в северо-восточном замыкании) и (3) прикровельная зона мощностью около 200 м. Строение базальной и прикровельных зон в целом выдержано по простиранию: внизу – это закаленные габбронориты и пикродолериты, переходящие в горизонт плагиоклазовых перидотитов, а в верхней ее части присутствуют безоливиновые пижонитсодержащие габбро и лейкогаббронориты, включая тонкозернистые фации эндоконтакта (рис. 1а). Причем, степень гетерогенности придонного горизонта в центре выше, чем в юго-западной и северо-восточной его оконечности, где представлены плагиоперидотиты с исходным составом оливина $\sim Fo_{86-87}$ (Ariskin et al., 2018a). Более контрастно представлено строение расслоенной серии: в центре массива ее основной объем состоит из плагиоклазосодержащих дунитов (до 970 м), существенно мезократовых троктолитов (~ 950 м) и габброидов (~ 1050 м), варьирующих от оливиновых габбро до оливиновых и оливинсодержащих габброноритов (рис. 1а). На северо-востоке (разрез Школьный мощностью 1340 м) 2/3 массива сложены переслаиванием плагиодунитов и сильно меланократовых троктолитов при отсутствии дунитов.

Далее рассмотрим особенности сульфидоносных пород из центральной части массива, где происходил отбор пород с глобулярными сульфидами (рис. 1б, 1в). В стратиграфическом разрезе Довырена мы выделяем четыре разновидности сингенетической минерализации малосульфидного типа, включая снизу вверх: (1) горизонт плагиодунитов с рассеянными сульфидами с преобладанием

пентландита (Ariskin et al., 2016), (2) богатые (до 70–77%) халькопиритом и кубанитом ассоциации в нижней половине троктолитовой зоны (с ЭПГ-минерализацией), (3) главный платинометалльный “риф”, также связанный с пентландит-пирротин-халькопиритовой (+кубанит) ассоциацией, приуроченный к зоне перехода от лейкотроктолитов к оливиновым габбро, и (4) горизонт относительно богатых сульфидами (местами до ~10 мас. %) безоливиновых габброноритов в пределах прикровельной зоны (Дистлер, Степин, 1993; Кислов, 1998; Ariskin et al., 2016, 2018a).

Строение и минерализация апофиз оливиновых габброноритов

Богатые сульфидами породы, вплоть до сидеронитовых и массивных руд (Байкальское месторождение (Кислов, 1998; Толстых и др., 2008)), сосредоточены по периферии Довырена, вдоль всего протяженного нижнего контакта. В центральной части эта рудная минерализация связана с габбро-перидотитовыми силлами или апофизами ниже подошвы массива, на северо-восточном и юго-западном флангах приурочена к плагиоперидотитам из основания массива и комагматичным дайкам габбродиабазов (Арискин и др., 2013). Геологическая позиция и природа рудопроявлений в области сочленения силлов/апофизов с основанием (возможно, магмоподводящей системы) Довырена неоднозначна, тем не менее, мы полагаем, что значительная часть сосредоточенной здесь массы сульфидного вещества поступила из магматической камеры или кондуита. Об этом свидетельствуют низкие значения $\delta^{34}\text{S}$ в большинстве сульфидоносных пород, как правило, в пределах $+(1-3)\%$ (Качаровская, 1986) и хорошее соответствие между наблюдаемыми и модельными содержаниями Pt, Pd, Au и Te в примитивных сульфидах (Ariskin et al., 2018b).

Неопределенность проявляется и в строении пластовых тел, что трудно рассматривать как результат внедрения и дифференциации одного импульса магмы. Для наиболее мощных силлов характерна контрастная расслоенность, которая выражается в присутствии лейкократового горизонта *OI*-содержащих и безоливиновых габброноритов, заключенного между подстилающими их меланократовыми оливиновыми габброноритами и перекрывающими плагиодунитами, сильно серпентинизированными в верхней части. Это наглядно демонстрирует стратиграфическая последовательность пород силла Верблюдов на рис. 2, слагающего седловину двугорбой возвышенности в среднем течении руч. Центральный и имеющего мощность около 200 м (Арискин и др., 2013, 2015). Д.А. Орсов с соавторами (2018) отмечают, что в пределах расслоенной серии этого силла наблюдается секущая дайка кварцсодержащих гранофировых габброноритов мощностью

~15 м. Интрузии лейкогабброидов в ультрамафиты имеют место и в других телах, например в силле Магнетитовый, см. рис. 10 в (Ariskin et al., 2018a).

Необычность залегания ультрамафитов над габброноритами подчеркивается распределением MgO и Cr_2O_3 по разрезу в породах силла Верблюдов (рис. 2). Учитывая пойкилитовую природу плагиоклаза в плагиодунитах (состав и структура которых аналогичны плагиодунитам Довырена, см. Ariskin et al., 2016, 2018a), можно предположить, что верхние ультрамафиты представляют выжимки-апофизы из главной довыренской камеры. В этом случае нижнюю часть расслоенного тела массива можно рассматривать как результат контрастной дифференциации другого импульса магмы, осложненного дополнительными инъекциями гранофировых и безоливиновых габброноритов. Подобно строению нижних контактов главного расслоенного массива (Кислов, 1998; Ariskin et al., 2018a), для довыренских силлов характерно наличие маломощных зон закалки, представленных пикродолеритами – порфиroidными породами с вкрапленниками оливина и долеритовой структурой основной массы (Орсов и др., 2018). В этих породах проявляется снижение содержания оливина (и, соответственно, MgO в породе) по направлению к непосредственному контакту, что является характерной особенностью строения многих интрузивных тел (Арискин и др., 2009).

ОБРАЗЦЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для последующего рассмотрения важно, что вблизи нижнего эндоконтакта силла Верблюдов, на стратиграфическом уровне примерно от 20 до 50 м нами установлена сульфидная минерализация. Аналогичное, но более значимое накопление сульфидов проявляется в основании другого силла или апофизы (профиль DV10), опробованного на удалении 3.5 км к юго-востоку от силла Верблюдов в разведочной канаве, примерно в 200 м от выходов сетчатых сульфидных руд (рис. 1, 2). Именно в этом разрезе нами впервые обнаружены образцы оливиновых габброноритов с мелкими сульфидными каплями размером до 3–4 мм.

Опробование другой параллельной канавы на расстоянии около 120 м к северо-востоку от точки DV10 привело к обнаружению еще одного типа пород с глобулярными сульфидами – с меньшим количеством оливина и существенно менее магнетиальных (табл. 1), с четко выраженной долеритовой структурой. Размер отдельных капель в этих породах достигал 15 мм. Несмотря на то, что задернованность склонов не позволяла определить точное положение этих пород относительно нижнего контакта, особенности структуры и состава указывают на то, что они представляют пикродолериты с сульфидными каплями, которые формировались вблизи зоны закалки, возможно

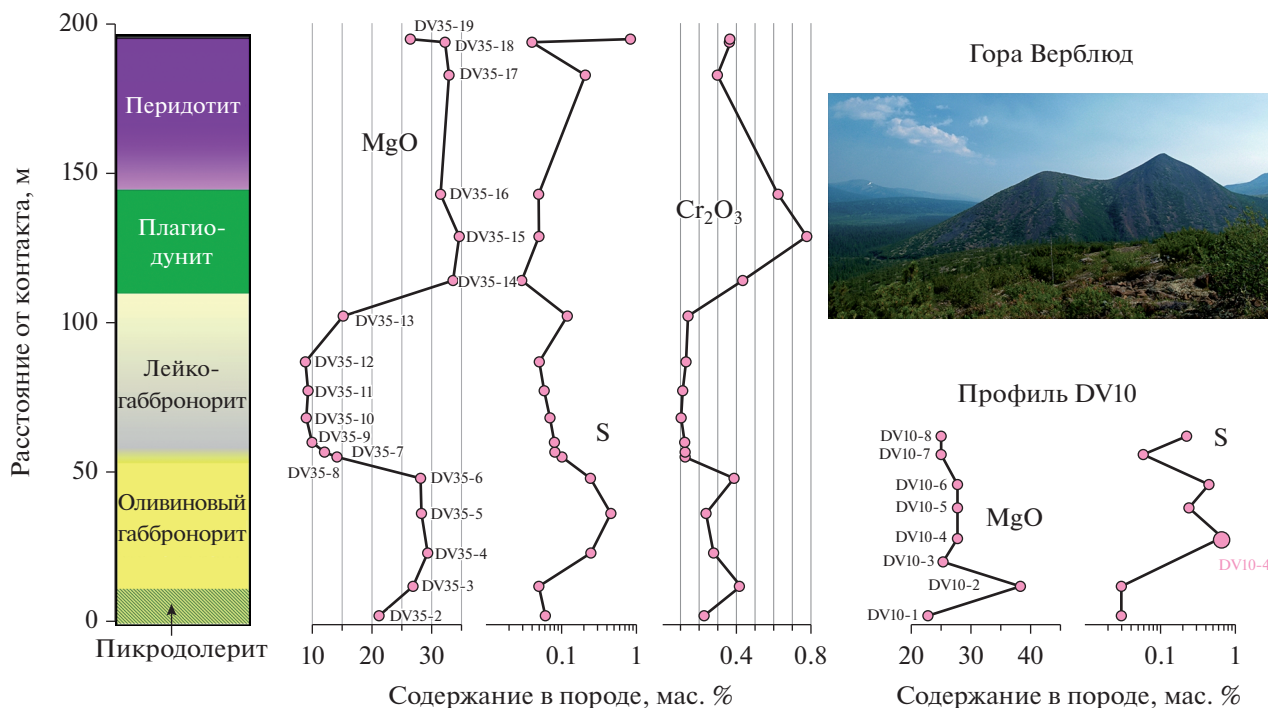


Рис. 2. Стратиграфическая последовательность и вариации состава пород по разрезам силла Верблюд (Арискин и др., 2013, 2015) и основания безмянного силла/апофиза, профиль DV10. Составы пород силла Верблюд и образцов по профилю DV10 см. в Приложении В к статье (Ariskin et al., 2018a), лист “Rocks” (<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.01.001>). Графики демонстрируют небольшое накопление серы (сульфидов) в основании разрезов.

вдоль непосредственного контакта с вмещающими роговиками. Для последующих исследований нами было выбрано четыре образца в этой точке (профиль DV627 на рис. 1в), один из которых (обр. DV627-1-2) изучен петролого-геохимическими методами, включая КТ-исследования и детализацию структуры и состава наиболее крупной сульфидной капли и ее капли-спутника.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБОРУДОВАНИЕ

При изучении пород-капельников использовался традиционный минералого-петрографический подход и методы рентгеновской компьютерной томографии – в сочетании с элементным картированием и оценками пропорций сульфидных фаз с помощью программы Adobe Photoshop CS2. Петрографическое описание образцов и съемка микрофотографий проводились на оптических микроскопах Altamі MET 1С и CARL ZEISS AXIO LAB.A1 с использованием программы Kolor Autopano Giga 4.2 для создания панорамных изображений.

Аналитические исследования. Содержания петрогенных компонентов пород силлов Верблюд и профиля DV10 (рис. 1в) были получены методом рентгеноспектрального флуоресцентного анализа

(РФА) в Школе физических наук и Центре исследований рудных месторождений при Тасманийском университете (CODES, г. Хобарт, Австралия). Детали аналитических исследований см. в Приложении А к статье (Ariskin et al., 2018a; <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.01.001>). Состав обр. DV627-1-2 (табл. 1) оценен по схеме HСAM ВИМС 439-РС методом РФА на вакуумном спектрометре последовательного действия, модель Axios mAX Advanced производства компании PANalytical (Нидерланды), в лаборатории анализа минерального вещества ИГЕМ РАН (аналитик А.И. Якушев, Москва). В качестве контрольных образцов использованы стандартные образцы геологической службы США (USGS).

Исследования состава минеральных фаз и элементное картирование проведено в лаборатории локальных методов исследования вещества кафедры петрологии МГУ им. М.В. Ломоносова на электронном микроскопе JSM-6480LV с вольфрамовым термоэмиссионным катодом, оснащенном энергодисперсионным спектрометром X-Max-N50 (“Oxford Instruments”, Великобритания). Стандарты и образцы измерялись в режиме сфокусированного зонда при ускоряющем напряжении 20 кВ и силе тока зонда 10 нА. При этом применялись стандарты металлов, стехиометрических оксидов и сульфидов. Для обработки резуль-

татов измерений по алгоритму ХРР-коррекции использовалась оболочка INCA (“Oxford Instruments”, версия 21b), что обеспечивало точность оценки содержаний для главных элементов в интервале 0.5–2 отн. %.

Рентгеновская компьютерная томография. Для получения данных различного разрешения и информативности были использованы две КТ-системы (Корост и др., 2019). На первом этапе съемки объекты изучения сканировались на томографе РКТ-180 (АО “Геологика”, Новосибирск), который предназначен для работы с полноразмерным скважинным керном и крупными образцами. Этот сканер обеспечивает достаточно быструю съемку (~20 мин) при относительно грубом разрешении – от 100 до 200 мкм. На втором этапе из наиболее перспективного (в плане полноты капель) образца выбуривался цилиндр диаметром 10 мм, включающий как сульфидные капли, так и их периферийное окружение. Этот цилиндр сканировался на томографе SkyScan-1172 (Bruker, Германия), с разрешением около 3 мкм. Проведенная на этом приборе съемка включала от 1000 до 2500 плоскостных срезов для каждого образца, из которых с помощью пакета программ компании SkyScan (DataViewer, STAn, CTVol, CTVox) производился пересчет набора полученных рентгенограмм в набор плотностных сечений, отображающих внутреннюю структуру объекта (Корост и др., 2019).

Расчет пропорций сульфидных фаз проводился в программе Adobe Photoshop CS2. Для этого серия изображений капли, полученных в отраженном свете (см. ниже), обрабатывалась серией фильтров, затем в каждом шлифе выделялись контрастные по цвету фазы (пирротин/троилит, пентландит, халькопирит) и замерялась площадь каждой фазы в пикселях. Используя средние составы этих минералов (по результатам микронзондовых анализов), полученные данные пересчитывались на соотношения Fe, Ni, Cu и Co для данной площади. Достоверность таких оценок контролировалась сравнениями с результатами более точного элементного картирования, что показало отклонение не хуже 1% в пересчете на концентрацию конкретного металла.

ПЕТРОГРАФИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

Пикродолерит, обр. DV627-1-2, представлен массивной, полнокристаллической, средне-мелкозернистой породой порфирированного облика и офитовой структурой основной массы. Порфирированность определяется наличием крупных вкрапленников оливина, а “офитовость” проявлена в цементирующей основной массе в виде удлиненных кристаллов пироксенов и многочисленных мелких лейст плагиоклаза (рис. 3). По структуре, минеральному и химическому составу эти породы очень близки к закалочным пикродолеритам

Таблица 1. Сравнение составов убого- и слабоминерализованных пород из эндоконтактных зон Йоко-Довыренского массива и подстилающих силлов/апофизов

Компоненты	DV30-1a	DV627-1-2	DV35-2	DV10-4
	0.4	н.д.	3	~20
SiO ₂	50.66	49.33	47.89	45.65
TiO ₂	0.54	0.57	0.46	0.36
Al ₂ O ₃	11.67	10.11	9.64	6.87
FeO	9.56	11.42	11.50	13.12
MnO	0.18	0.19	0.18	0.20
MgO	16.75	18.85	20.94	26.43
CaO	7.80	6.68	7.27	4.95
Na ₂ O	1.53	1.35	0.99	0.53
K ₂ O	0.86	0.84	0.67	0.56
P ₂ O ₅	0.10	0.09	0.07	0.07
Cr ₂ O ₃	0.23	0.24	0.23	0.46
NiO	0.07	0.10	0.09	0.23
S	0.05	0.23	0.07	0.57
Сумма	100.00	100.00	100.00	100.00
П.п.п.	1.10	1.20	1.54	3.3

Примечание. 0.4, 3, ~20 – расстояние от нижнего контакта, м (н.д. – нет данных). Составы пересчитаны на безводную основу. Состав пикродолерита-капельника, обр. DV627-1-2, – настоящая работа; остальные взяты из табл. 1 и 3 в статье (Ariskin et al., 2018b): обр. DV30-1a представляет закаленный контакт Йоко-Довыренского массива, обр. DV35-2 – эндоконтакт силла Верблюдов.

из типичного нижнего контакта массива, в частности, обр. DV30-1a, см. в (Ariskin et al., 2018a) и в табл. 1. Основными породообразующими минералами являются оливин $Fo_{82.5 \pm 0.5}$ (примерно 15 об. %), варьирующий от андезина до лабрадора плагиоклаза (в среднем $An_{53.5 \pm 1.5}$, ~50%), авгит ($Mg\# = 78.5 \pm 0.6$, ~15%) и гиперстен ($Mg\# = 74.5 \pm 0.7$, ~10%). Вторичные минералы представлены сосюритом и серпентином. Из второстепенных фаз преобладают сульфиды (~5%) и флогопит ($Mg\# \sim 80$, 2.5–5%); главные акцессорные фазы – алюмохромит ($Cr\# = Cr/(Cr + Al) = 67.5 \pm 1$, ~0.5%) и ильменит (1%). Характеристики химического состава силикатных минералов приведены в табл. 2.

Минералогия силикатов и оксидов. Оливин образует вкрапленники около 1.5 мм в поперечнике. Четкие кристаллографические очертания кристаллов прослеживаются редко, в основном зерна оливина изометричные или слабо вытянутые. Офитовая ассоциация плагиоклаза и пироксенов выражена удлиненными кристаллами со средним размером около 1 мм. Для плагиоклазовых лейст отношение длины к ширине составляет (4–5) : 1, сосюритизация проявлена слабо. Гиперстен на-

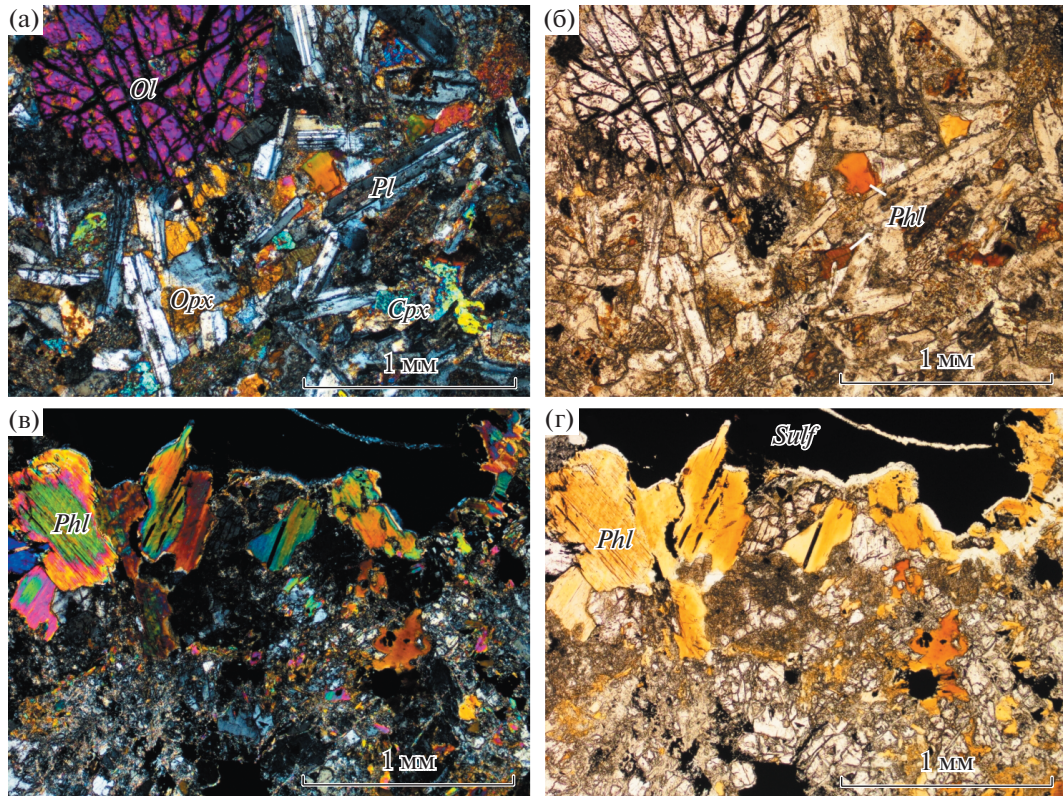


Рис. 3. Структурные соотношения породообразующих минералов в пикродолерите-капельнике, обр. DV627-1-2. (а) – вкрапленник оливина (*Ol*) в основной оливин-пироксен-плагиоклазовой массе (*Ol-Opx-Cpx-Pl*), николи скрещенны, увеличение $\times 5$; (б) – тот же участок, без анализатора; (в) – зерна флогопита (*Phl*) на границе с сульфидом (*Sulf*), николи скрещенны, увеличение $\times 5$; (г) – тот же участок, без анализатора.

блюдается в виде субидiomорфных и удлиненных, реже ксеноморфных кристаллов с отношением длины к ширине (5–6) : 1. Пойкилитовые соотношения с плагиоклазом не проявлены (рис. 3а, 3б). Авгит наиболее распространен и занимает ту же структурную позицию, что и гиперстен, но его удлиненные кристаллы чуть менее вытянуты при отношении – (4–5) : 1. Флогопит образует субидiomорфные, реже ксеноморфные таблитчатые зерна, при этом большинство кристаллов флогопита ассоциируют с сульфидами, часто образуя ореолы минерализации вокруг сульфидных капель (рис. 3в). Ильменит формирует субидiomорфные и ксеноморфные зерна размером до 0.3 мм, тогда как алюмохромит представлен изометричными кристаллами размером не более 0.1 мм. Большинство зерен алюмохромита обнаружено внутри вкрапленников оливина; в основной массе отмечены только редкие кристаллы, иногда в виде небольших скоплений.

Минералогия сульфидных фаз. В изученном образце сульфиды представлены рассеянными и сферoidalными (в плане) образованиями (рис. 4), глобулярная форма которых подтверждается результатами КТ-исследований (рис. 5). При этом основная масса сульфидов сосредоточена именно в каплях, в составе которых преобладают пирро-

тин и троилит. Эти фазы формируют характерные змееобразные ламели распада моносulfидного твердого раствора (*Mss*), примерно в равной пропорции (рис. 6б–6г). Такая ассоциация характерна для большинства руд Байкальского месторождения (Качаровская, 1986), а также многих других Cu-Ni-сульфидных месторождений и рудопроявлений (Рябов и др., 2001; Спиридонов и др., 2010; Служеникин и др., 1994). По данным (Taylor et al., 1970; Новиков, 1988), образование подобных структур связано с субsolidусным распадом *Mss*-раствора, близкого по составу к железистому пирротину при температуре ниже 150°C. Усредненный химический анализ, полученный в ходе элементного СЭМ-картирования площадки 400 × 400 мкм, может отражать состав первичного, не претерпевшего распада железистого пирротина (мас. %): S – 37.6, Fe – 62.1, Ni – 0.25.

Распределение халькопирита, кубанита и пентландита демонстрирует расслоение на богатую минералами меди (предположительно) верхнюю часть и обогащенную пирротином/троилитом нижнюю (рис. 6а). Помимо верхов, редкие зерна халькопирита отмечены по всему объему изученной капли, но слагают также существенную часть окружающего гало из тонкой сульфидной вкрапленно-

Таблица 2. Химический состав породообразующих минералов в пикродолерите, обр. DV627-1-2

Компоненты	<i>Ol</i>	<i>Pl</i>	<i>Opх</i>	<i>Cpx</i>	<i>Phl</i>
SiO ₂	37.28–38.03 (37.7)	52.86–54.68 (50.6)	52.86–54.68 (53.7)	51.59–53.84 (53.1)	37.91–38.32 (38.1)
TiO ₂	–	–	0.12–0.57 (0.41)	0–0.94 (0.24)	1.51–6.59 (3.85)
Al ₂ O ₃	–	29.6–30.64 (30.24)	0.28–1.65 (1.29)	0.3–2.4 (0.78)	13.97–15.62 (14.88)
FeO	20.48–23.15 (21.41)	0.13–0.19 (0.15)	13.71–17.64 (15.49)	4.34–8.27 (6.05)	8.18–9.28 (8.73)
MnO	0.22–0.31 (0.27)	–	0.29–0.41 (0.35)	0.08–0.25 (0.16)	–
MgO	37.25–39.46 (38.68)	–	25.72–28.52 (27.02)	15.01–16.46 (15.81)	17.18–20.96 (19.04)
CaO	0.01–0.11 (0.08)	12.5–13.33 (13.08)	0.36–2.01 (1.58)	21.51–23.9 (22.61)	–
Na ₂ O	–	3.5–4.32 (3.87)	–	0.09–0.32 (0.19)	0.07–0.49 (0.31)
K ₂ O	–	0.14–0.21 (0.16)	–	–	9.27–9.86 (9.50)
Cr ₂ O ₃	–	–	0–0.23 (0.11)	0–0.38 (0.18)	0.7–0.95 (0.84)
NiO	0.14–0.24 (0.21)	–	–	–	–
Cl	–	–	–	–	0.32–0.45 (0.41)

сти (рис. 4). Как правило, этот минерал формирует ксеноморфные выделения, реже встречается в виде небольших ламелей в пирротине/троилите. В халькопирите широко проявлены двойники полиморфных переходов из кубического в тетрагональный (Christa, Couderc, 1989) (рис. 6г). Хотя в отраженных электронах такие двойники выглядят контрастно, они идентичны по составу (см. табл. 3) и не являются ламелями кубанита. Редкий кубанит установлен исключительно в виде ламелей в халькопирите из верхних частей капель и в пределах гало (рис. 6е).

Пентландит представлен двумя генерациями. Зернистый пентландит-1 (рис. 6б) приурочен к верхам сульфидных глобуль и зачастую находится в ассоциации с халькопиритом, отделяя нижнюю существенно пирротиную часть капли от более богатых халькопиритом верхов. Пламенеvidные ламели пентландита-2 развиты в основном в центральной части глобули и приурочены к границам халькопирита и пирротина, а также – к границам двойников в пирротине и внутренним трещинам в сульфидах (рис. 6в). Такие ламели составляют не более 1% от всего объема пентландита в шлифах. Отличие между этими разновидностями пентландита подчеркиваются их химическим составом (табл. 3). Для пентландита-2 характерны более су-

ществленные вариации по Ni (от 30 до 33.5 мас. %) при содержании <1 мас. % Co. В то время как состав пентландита-1 более выдержан (31.5–33 мас. % Ni) и отличается повышенным содержанием ко-

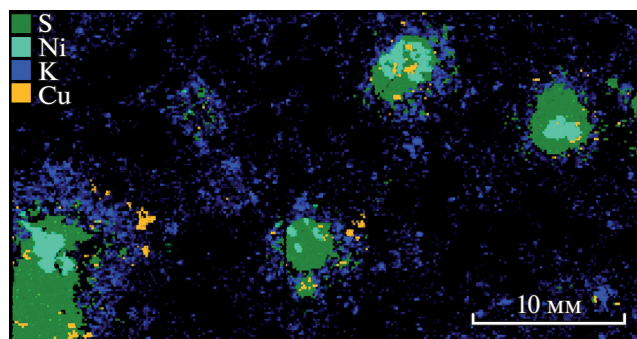


Рис. 4. Элементная карта площадки сечения пикродолерита-капельника, обр. DV627-1-2, размером 20 × 40 мм. Съемка проведена на микрозонде-микроскопе РММ 30-м методом локального рентгенофлуоресцентного элементного микроанализа. Цветом выделены области максимальных содержаний серы, никеля, меди и калия, который используется как маркер флогопита. Хорошо видны ареолы флогопита вокруг сульфидных капель, а также распространение зерен халькопирита вне сульфидных глобуль.

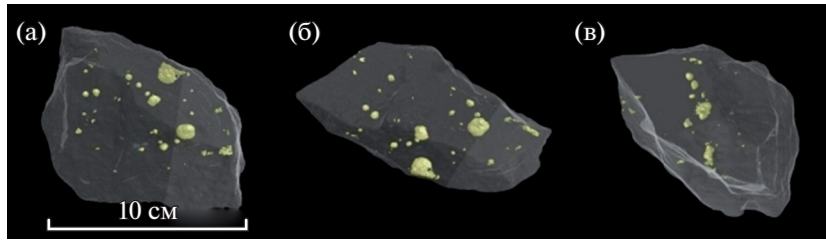


Рис. 5. Результаты КТ-съемки пикродолерита-капельника, обр. DV627-1-2, в трех разных проекциях. Съемка проведена на томографе РКТ-180. Минералы силикатной матрицы показаны полупрозрачными в темно-серых тонах, сульфиды – золотистым цветом. На проекции справа сульфидные глобулы выстроились в одну плоскость, демонстрируя планарность распределения.

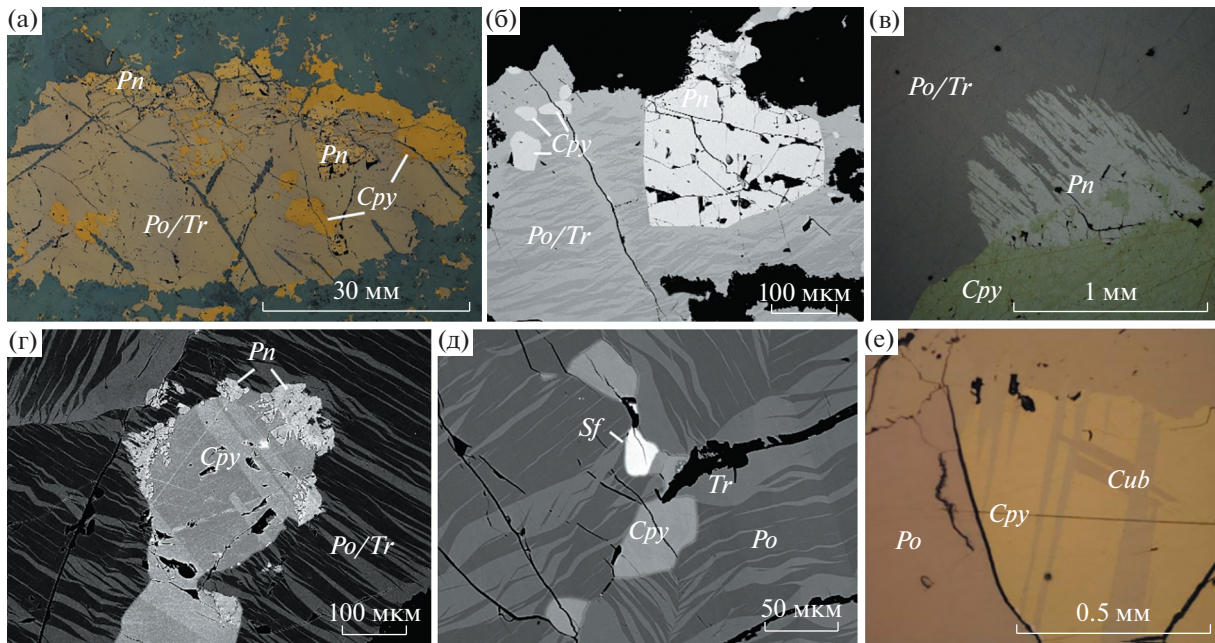


Рис. 6. Изображение сульфидной капли и микрофотографии структурных соотношений сульфидных фаз в отраженных электронах.

(а) – панорама одного из срезов капли, где хорошо проявлено разделение на более богатую халькопиритом верхнюю часть и обогащенную пирротином/троилитом нижнюю; (б) – кристалл зернистого пентландита в пирротин-троилитовом матриксе на краю сульфидной капли; (в) – пламенеvidная lamель пентландита на границе пирротина и халькопирита; (г) – ксеноморфное зерно халькопирита в пирротин-троилитовом матриксе из центра капли (видны двойники полиморфных переходов из кубического халькопирита в тетрагональный¹, а также зерна пламенеvidного пентландита на краю выделения халькопирита); (д) – структуры распада Mss-раствора на пирротин и троилит, в ассоциации с халькопиритом и сфалеритом; (е) – lamели кубанита в зерне халькопирита. *Po* – пирротин, *Pn* – пентландит, *Tr* – троилит, *Cpy* – халькопирит, *Cub* – кубанит, *Sf* – сфалерит.

¹Это подтверждается идентичностью составов светло-серого (участок 2) и серого (участок 1) участков в халькопирите (см. табл. 3).

бальта (1.5–2.6 мас. %). Подобные разновидности пентландита типичны для медно-никелевых руд и зон сульфидной минерализации (Vishnevskiy, Cherdantseva, 2016; Barnes et al., 2006; Prichard et al., 2004; Duran et al., 2017), в том числе и в самом Йокондовыренском массиве (Каچارовская, 1986).

В качестве второстепенных сульфидных минералов встречаются сфалерит и галенит. Интересно,

что все капли окружены ореолом из кристаллов флогопита, нередко с зернами апатита: эти взаимоотношения хорошо заметны на элементной карте обр. DV627-1-2 (рис. 4). Эти данные подтверждают, что практически весь пентландит в сульфидных глобулах сконцентрирован в одном или в нескольких крупных зернах, тогда как большинство зерен халькопирита находятся на некотором удалении от

Таблица 3. Концентрации основных металлов и серы в сульфидных минералах (мас. %)

Минерал	S	Fe	Co	Ni	Cu
Пирротин	37.7–38.9	60.4–61.8		0.3–0.5	
Троилит	36.2–36.6	63.1–63.5		0–0.04	
Пирротин + троилит (площадка)	37.6	62.1		0.25	
Пентландит-1	32.8–33.5	30.9–33.5	1.4–3.3	31.6–33.1	
Пентландит-2	33.2–33.8	32.4–34	0.28–0.86	32.3–33.6	
Халькопирит	34.1–35.2	30.4–31.2			33.6–34.7
Халькопирит (участок 1)*	34.6	30.9			34.1
Халькопирит (участок 2)*	34.9	30.4			34.2
Кубанит	34.8–35.5	40.8–41.2			22.6–23.3

* См. сноску к подрисуночной подписи рис. 6.

сульфидных капель, формируя рассеянную вокруг них высокомедистую ассоциацию.

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕНТГЕНОВСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

Мелкомасштабная съемка. Предварительное изучение образца пикродолерита-капельника методом КТ при низком разрешении 100–200 мкм на томографе РКТ-180 позволило выявить внутри образца 25 отдельных каплеобразных образований, размером от 2 до 15 мм (рис. 5). Рассчитанное по результатам КТ-исследования содержание сульфидов в образце составило 0.87 об. %, степень их связанности – 36%.¹ Эти данные хорошо согласуются с итоговой трехмерной реконструкцией: подавляющее большинство сульфидов (золотистые на модели) концентрируются в изолированные глобулы, между которыми присутствуют слабо связанные рассеянные сульфиды. Тонкая структура этих разветвленных (ксеноморфных) и отдельных сульфидных интерстиций при данном разрешении не видна. Сами же капли имеют слегка приплюснутую форму. Многие из них характеризуются присутствием капель-спутников, представленных мелкими субмиллиметровыми каплями вблизи основной глобулы, см. рис. 5 и результаты крупномасштабной съемки на рис. 7. При этом большинство глобулярных образований выстраивается в единую плоскость, которая установлена при стереоскопическом вращении КТ-модели (рис. 5, справа). Интересно, что данная плоскость ортогонально совпадает с плоскостью уплощения сульфидных капель. Заметим,

¹ Степень связанности рассчитывается как доля самого крупного объекта (в отн. %) от суммарного объема данного рентгеноконтрастного компонента (Корост и др., 2019).

что подобные наблюдения недоступны обычным методам микроскопических исследований.

Крупномасштабная съемка. Используя стереологическую модель для целого образца (рис. 5), нам удалось распилить его под таким углом, что были вскрыты сразу пять капель размером от 2 до 8 мм. Аншлиф этого препарата был использован при крупномасштабном элементном картировании поверхности (рис. 4), а также микронзондовых и петрографических исследований. Для подготовки следующего этапа КТ-съемки из этого производного образца был точно выбурен миникерн диаметром 10 мм, который включал одну из наиболее крупных капель. Этот миникерн был отснят с высоким разрешением около 3 мкм на томографе SkyScan-1172. Построенная на основе этих данных трехмерная модель позволила увидеть детали сложного строения крупной капли (рис. 7а), которая включает основной приплюснутый сфероид размером 8 × 7 × 4.5 мм с неровной поверхностью, осложненной микроапофизами наподобие “протуберанцев” (рис. 7б), и окружающее его кольцеобразное гало из тонкой сульфидной вкрапленности (рис. 7в). По внешней периферии гало выделяется еще одна мелкая капля размером около 2 мм (см. нижнюю часть сульфидной ассоциации на рис. 7а и 7в). При этом гало и основная капля не связаны через интерстициальное пространство силикатных минералов, что позволило выделить и визуализировать их отдельно друг от друга. По результатам расчетов на основе КТ-реконструкций объем сульфидного материала в гало составляет примерно 5% от объема основной капли.

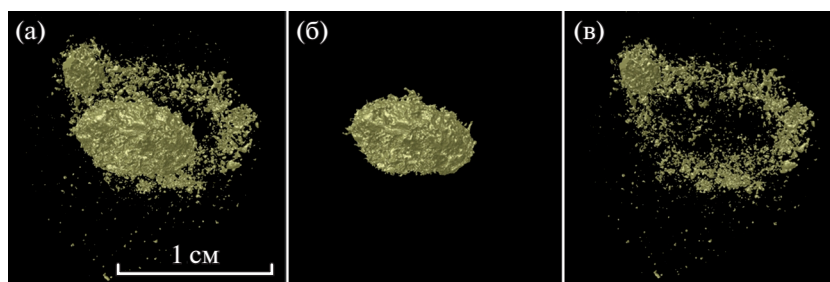


Рис. 7. Пространственная структура крупной сульфидной капли по результатам КТ-съемки 10 мм керна, выбуренного из пикродолерита-капельника, обр. DV627-1-2. (а) – основная капля-сфероид + сульфидное гало; (б) – только сфероид, (в) – строение сульфидного гало с мелкой каплей.

СРЕДНИЙ ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СУЛЬФИДНОЙ КАПЛИ

Оценка состава протосульфидных и производных жидкостей играет важную роль при рассмотрении эволюционных процессов концентрирования и переноса ЭПГ и других благородных металлов в магматических системах (Naldrett, 2004). Для решения этой задачи в сульфидной петрологии обычно используются методы пересчета валовых содержаний ЭПГ в породах на 100% сульфидной массы, например, (Barnes, Lightfoot, 2005; Ariskin et al., 2018b). Этот подход предполагает отсутствие значительного приноса или выноса сульфидного вещества после его кристаллизации и хорошо работает для высокохалькофильных элементов при содержании сульфидов выше 1–3%. Недостатком метода являются трудности с надежной оценкой содержаний Ni, Co и Cu: для двух первых элементов необходимо вводить поправки на количество и состав феррических минералов (особенно оливина), в случае меди надо учитывать ее содержание в интеркумулусе. Другая проблема связана с выбором представительного объема сульфидных сегрегаций, который можно использовать для аппроксимации состава исходной сульфидной жидкости. Связано это с тем, что, по мере кристаллизации и фракционирования сульфидов на посткумулусной стадии, более поздние и медистые фракции способны мигрировать сквозь поровое пространство затвердевающих кумулатов или формировать самостоятельные, способные к перемещению массы. В таких месторождениях как Норильск и Садбери масштабы подобных миграций могут составлять десятки метров (Mungall, 2002; Naldrett et al., 1984; Спиридонов, 2010). С одной стороны, в изученных нами породах зафиксированы скопления сульфидов меди вокруг основного сфероида только в пределах нескольких миллиметров (рис. 4, см. Обсуждение результатов). Поэтому каждую сульфидную каплю с ближайшим окружением можно рассматривать как закрытую систему. С другой стороны, тот факт, что объем сульфидного материала в гало не превышает 5 отн. % (см. выше), а сложено оно теми же основными металла-

ми, что и сфероид, указывает, что погрешность при оценке валового состава исходного сульфида по составу основного тела капли не должна превышать первых процентов.

Расчеты на основе элементного картирования. Для решения этой задачи, используя точную локализацию капли в миникерне, он был распилен на 11 тонких пластин толщиной порядка 0.7 мм, вскрывающих полную ассоциацию сульфидов в виде глобулярных образований. Из этих препаратов приготовлено семь аншлифов, представляющих строение капли на разных уровнях (изображение одного из них показано на рис. 6а). В каждом аншлифе подсчитывались площади для халькопирита, пирротина/троилита и пентландита. Затем, используя средние химические составы каждой фазы по данным микрозондового элементного картирования (рис. 8) и рассчитанные площадные соотношения (рис. 9, слева), эти данные пересчитывались на соотношения S, Fe, Ni, Co и Cu в сульфиде для каждого из срезов.

Наличие семи представительных сечений сульфидной капли позволило достаточно точно оценить состав всей капли в целом и состав исходной сульфидной жидкости в образце пикродолерита, постулируя закрытость системы в отношении сульфидного материала. Для оценки достоверности этого метода мы провели сравнение с точечным элементным картированием той же площади на электронном микроскопе. При пересчете обеих оценок на элементный состав сульфида их разница не превысила 1 мас. % для S, Fe, Ni и Cu. В случае Co эта разница оказалась почти в полтора раза выше, вероятно, за счет его малых концентраций в сульфидных минералах (рис. 9, справа).

Таким образом, были рассчитаны составы и минеральные соотношения для семи срезов сульфидной капли. Отдельно рассчитывалось соотношение для гало и для капли, при этом на всех срезах наблюдались систематические отличия в составе: гало более медистое (до 10% более медистое, чем капля на отдельных срезах) и менее никелистое. Для крайних срезов, где было невозможно отде-

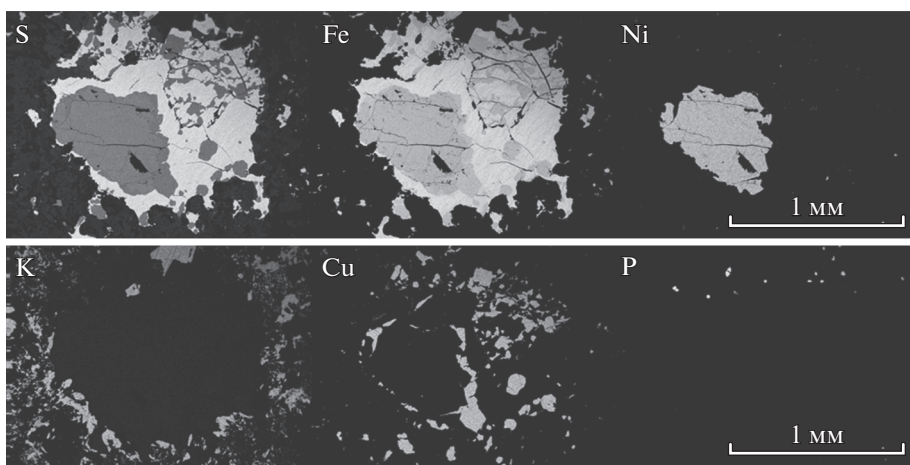


Рис. 8. Элементные карты содержаний S, Fe, Ni, Cu, K, P для одного из сечений обр. 16DV627-1-2.

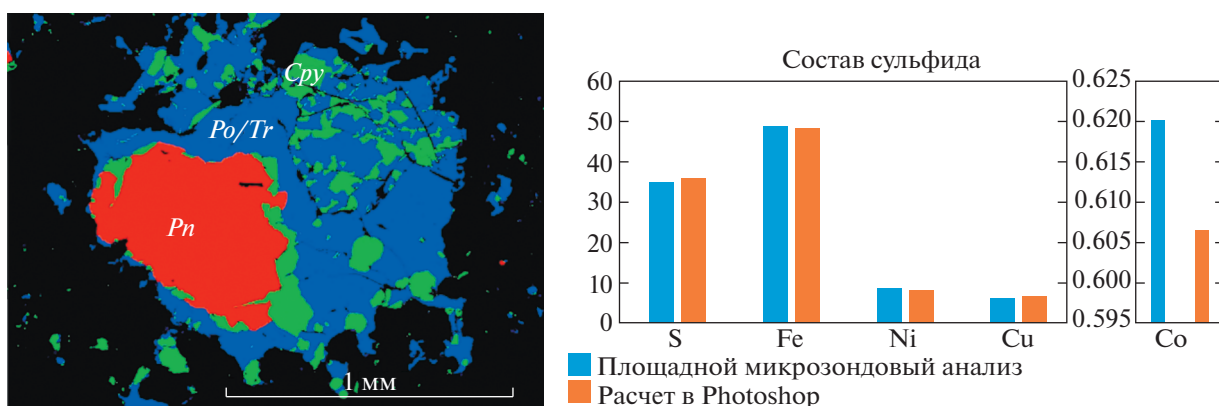


Рис. 9. Пример обработки панорамного изображения одного из сечений обр. 16DV627-1-2 в Adobe Photoshop. Слева – модель площадных соотношений, справа – сравнение расчета средневзвешенного состава с данными по элементному картированию той же области на электронном микроскопе JSM-6480LV.

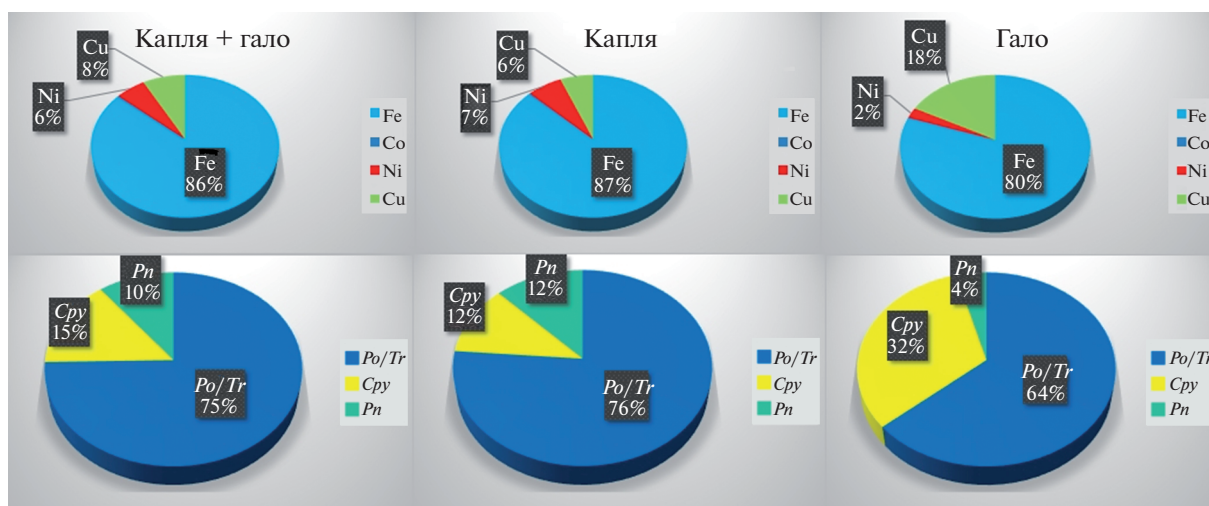


Рис. 10. Химический и минеральный состав сульфидной глобулы, центральной капли и гало. Содержания Fe, Ni и Cu нормированы на сумму основных металлов в сульфидном веществе.

Таблица 4. Валовый состав сульфидных образований и средние составы сульфидных фаз в пикродолерите, обр DV627-1-2

Сульфидные образования	Средневзвешенный состав по семи срезам для основных металлов и серы, мас. %					Средний минеральный состав		
	S	Fe	Co	Ni	Cu	Po/Tr	Pn	Cpy
Капля-сфероид	36.7	54.9	0.2	4.1	3.9	76.5	11.6	11.9
Сульфидное гало	36.6	50.8	0.1	1.5	11.1	63.6	4.3	32.1
Полное глобулярное обособление, включая сфероид + гало	36.7	54.4	0.2	3.6	5.1	75.3	14.2	10.5

лить каплю от гало, — рассчитывалось как их сумма. Итоговые валовые значения по всем срезам показаны в табл. 4 и на рис. 10.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Факт небольшого, но систематического обогащения сульфидами базальных частей ультрамафит-мафитовых тел вблизи нижнего контакта Довырена указывает на процессы переноса и накопления протосульфидного вещества не только в главной магматической камере, но также в сопутствующих силлах и апофизах. Находки пород-капельников позволяют предположить, что эти транспортные явления сопряжены с каплеобразованием вблизи контактов, что ставит вопрос о природе исходных сульфидных жидкостей, в том числе — особенностях их состава и морфологии. Для изучения морфологических особенностей сульфидных капель мы использовали современные методы рентгеновской компьютерной томографии, которые показали довольно высокую степень связанности сульфидного материала (36%), что отражается на итоговых 3D-реконструкциях: основная масса сульфидов сконцентрирована в округлых каплях, а рассеянные по интеркумулусу сульфиды практически отсутствуют (см. рис. 5). Учитывая петрографический облик породы, которая несет признаки быстрой закалки (см. рис. 2), можно предположить, что жидкие сульфидные капли были “законсервированы” в быстро закристаллизованной силикатной матрице и сохранили близкую к первичной сферообразную морфологию. Это подтверждается также описанием аналогичных по морфологии и строению сульфидных капель в закалочных фациях мафической дайки в террейне Педра Альта (Piedra Alta, Уругвай) (Prichard et al., 2004); в одной из множества мафических даек, связанных с третичной базальтовой вулканической провинцией в районе Кангерлуссак (Kangerlussuaq) в Восточной Гренландии (Holwell et al., 2016), а также в габброидной дайке Тогедда (Togeda), где размеры сульфидных глобул достигают вплоть до максимального диаметра около 10 мм (Barnes et al., 2017). Таким образом, каждую сульфидную глобулу и ее ближайшее окружение можно рассматривать как единую закрытую си-

стему, не связанную с другими сульфидами в породе. Это позволяет реконструировать процессы фазовых и химических преобразований сульфидной жидкости после ее захвата в силикатную матрицу.

Одним из результатов такой эволюции является наличие гало из тонкой сульфидной вкрапленности вокруг основных глобул (рис. 4, рис. 6). Выявленные в результате расчета среднего химического состава различия между основным сфероидным образованием и окружающим его гало (рис. 9) свидетельствуют о том, что последнее было сформировано из относительно позднего высокомедистого сульфидного материала. По всей видимости, этот компонент был отделен от изначальной “протокапли”, в ходе ее кристаллизации, после образования в основном объеме моносульфидного твердого раствора. Мы полагаем, что эта поздняя медистая фракция сульфидов была частично выдавлена в поровое пространство вмещающей силикатной матрицы, возможно, за счет контракционных явлений в затвердевающей породе. При этом основной сульфидный сфероид, сохранил в себе значительную часть меди, на что указывает обогащенная халькопиритом верхняя часть капли (рис. 6а).

Интересен тот факт, что все сульфидные капли в образце находятся в одной плоскости (рис. 5в). Учитывая то, что она совпадает с плоскостью уплощения сфероидальных капель (рис. 5в), такую поверхность можно интерпретировать как маркер фронта кристаллизации породы, ниже которого направленная вниз миграция сульфидной жидкости была невозможна. Мы допускаем, что подобное наложение транспортных явлений на фронт кристаллизации носило собирательный характер, способствуя агломерации мелких капель и перколирующих сульфидов в более крупные глобулярные образования. Предложенная схема формирования глобулярных образований в пикродолеритах изображена на рис. 11: в расплав с интрателлурическими кристаллами оливина вблизи контакта магматической камеры Довырена прибывают капельки и глобулы сульфидной жидкости, которые были сегрегированы из вышележащего объема магмы при достижении насыщения серой и при сульфидной ликвиации (рис. 11а). Затем при достижении восходящего фронта в резуль-

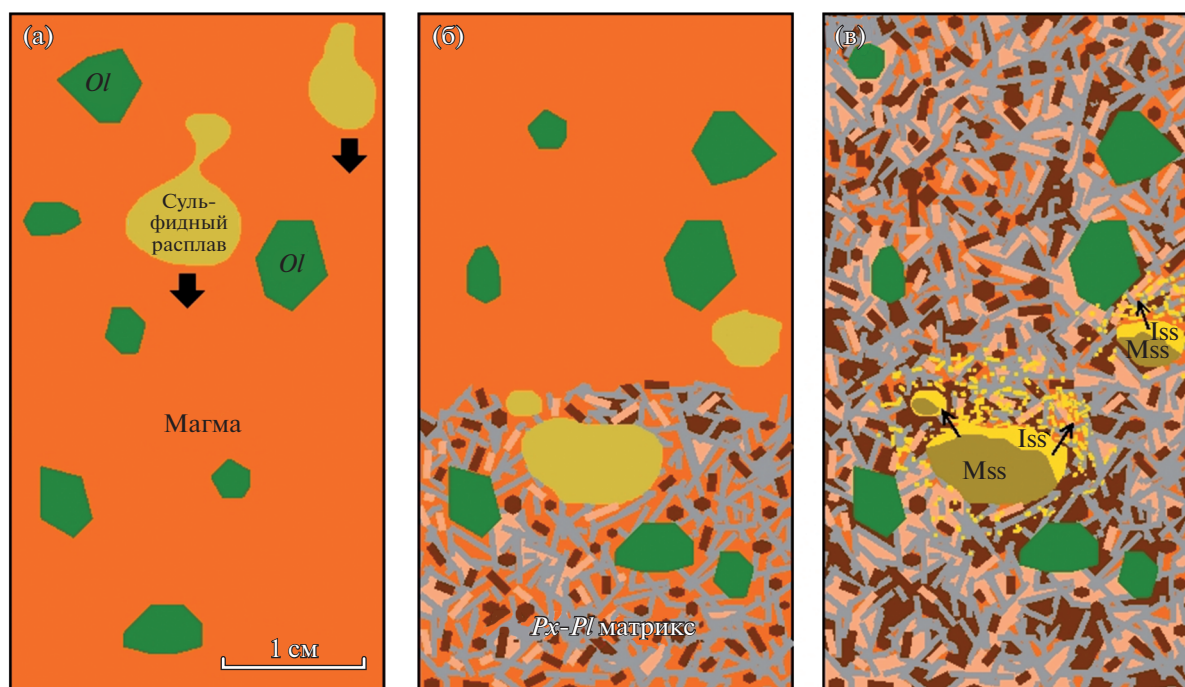


Рис. 11. Схема формирования сульфидно-силикатных взаимоотношений в пикродолерите-капельнике. (а) – начальные стадии миграции жидких сульфидных сегрегаций в магме с кристаллами оливина; (б) – захват и консервация сульфидных капель в офитовой матрице, быстро кристаллизующейся по направлению от контакта магматической камеры; (в) – формирование высокомедистого гало и фазовой минеральной расслоенности в каплях при кристаллизации глобулярных сульфидных обособлений.

тате быстрой кристаллизации магмы от контакта они захватываются тонкозернистой силикатной матрицей, кристаллизующейся в виде лейст плагиоклаза и удлинённых кристаллов пироксенов (рис. 11б). Далее при кристаллизации Mss-раствора из протосульфидного расплава происходит частичная выжимка поздней медистой жидкости в поровое пространство породы, заполненное остаточным силикатным расплавом (рис. 11в). Судя по томографическим и минералогическим наблюдениям, такая миграция не превышала 0.5–0.6 см.

ВЫВОДЫ

Впервые изучено распределение, строение и состав сульфидных капель в пикродолеритах из зоны распространения силлов и апофизов в основании Йоко-Довыренского расслоенного массива, в близкой ассоциации с проявлениями сетчатых Cu-Ni руд. Получены следующие результаты:

1. Петрографические особенности исследованного образца пикродолерита DV627-1-2 указывают, что эта порода сформировалась в условиях быстрого остывания магмы, вероятно, в зоне закалки апофиза, отвечающего по составу оливинным габброноритам. Содержание вкрапленников оливина в пикродолерите не превышает 15%, а структура и химический состав близки породам из нижнего закаленного контакта массива.

2. Методами рентгеновской компьютерной томографии в обр. DV627-1-2 было установлено 25 глобул диаметром от 2 до 15 мм, распределение которых в объеме породы носит планарный характер. Сами глобулы имеют форму сфероидов, сплюснутых в направлении плоскости распределения капель, и окружены кольцеобразным гало из тонкой сульфидной вкрапленности, плоскость распределения которой также совпадает с плоскостью капельных образований.

3. Сульфидные гало удалены от центра сфероидов на расстояние не более 20% их диаметра. С учетом отсутствия других типов рассеянных сульфидов этот факт позволяет рассматривать гетерогенные глобулярные образования (главная капля + гало) как закрытые системы, средний состав которых должен отражать состав исходного сульфида.

4. Главные капли имеют характерную фазовую расслоенность, которая выражается в обогащении халькопиритом предположительно в верхней части и доминировании продуктов Mss-раствора (главным образом, пирротин + троилит) в нижней. Окружающее гало также обогащено минералами меди.

5. Расчеты пропорций сульфидных фаз и результаты изучения их состава на микронзонде (проводившиеся отдельно для гало и основной капли) позволили конкретизировать различия их валового химического состава: гало оказалось на

7.2 мас. % богаче медью и на 2.6 мас. % беднее никелем.

6. Средневзвешенный состав крупного глобулярного образования в обр. DV627-1-2 (диаметром около 10 мм) отвечает (мас. %): 54.4Fe, 3.6Ni, 5.1Cu и 36.7S. Эту оценку можно рассматривать как состав сульфидной жидкости, сформировавшейся вблизи зоны заалки габброноритовых апофизов. Полученная оценка содержания меди в исходном сульфиде согласуется с результатами термодинамического моделирования геохимии сульфидов в ультрамафитах основания Йоко-Довыренского массива по программе COMAGMAT-5, которые указывают на 3.4 мас. % Cu в примитивной протосульфидной жидкости (Ariskin et al., 2018b).

7. Различия в составах между гало и основной каплей указывают на возможность локальной миграции (в масштабе первых миллиметров) остаточных высокомедистых сульфидных жидкостей на этапе дифференциации исходного протосульфидного расплава. В качестве физического механизма формирования гало предполагается отжим наиболее поздней и высокомедистой фракции сульфидного расплава в поровое пространство быстро кристаллизующихся пикритоидных магм.

Благодарности. Авторы благодарны Н.Н. Коротяевой и Э.М. Спиридонову (МГУ им. М.В. Ломоносова) за помощь при проведении анализов и диагностике сульфидных фаз, также признательны В.А. Туркову и К.М. Рязанцеву (ГЕОХИ РАН, Москва) за подготовку аншлифов и препаратов для КТ-исследований, А.Н. Хомяку за консультации при реконструкции КТ-данных. Содержательные комментарии и рекомендации рецензентов (С.Ф. Служеникин и М.А. Юдовская, ИГЕМ РАН) значительно улучшили рукопись.

Источники финансирования. Работа выполнена при поддержке гранта Российского Научного Фонда № 16-17-10129. Подготовка уникальных тонких аншлифов и количественная характеристика пропорций сульфидов проводились в рамках Госзадания ГЕОХИ им. В.И. Вернадского РАН. Аналитические исследования в лаборатории локальных методов исследования вещества кафедры петрологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова проводились с использованием микроанализатора JEOL JXA-8230, приобретенного за счет средств Программы развития Московского университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ariskin A.A., Konnikov Э.Г., Данюшевский Л.В. и др. Довыренский интрузивный комплекс: проблемы петрологии и сульфидно-никелевой минерализации // Геохимия. 2009. Т. 47. № 5. С. 451–480.

Ariskin A.A., Konnikov Э.Г., Данюшевский Л.В. и др. Геохронология Довыренского интрузивного комплекса в Неопротерозое (Северное Прибайкалье, Россия) // Геохимия. 2013. № 11. С. 955–972.

Ariskin A.A., Данюшевский Л.В., Конников Э.Г. и др. Довыренский интрузивный комплекс (Северное Прибайкалье, Россия): изотопно-геохимические маркеры контаминации исходных магм и экстремальной обогащенности источника // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 3. С. 528–556.

Ariskin A.A., Бычков К.А., Николаев Г.С. Моделирование микроэлементного состава сульфидной жидкости в кристаллизующейся базальтовой магме: развитие концепции R-фактора // Геохимия. 2017. Т. 55. № 5. С. 453–462.

Дистлер В.В., Степин А.Г. Малосульфидный платиновый горизонт Йоко-Довыренского расслоенного гипербазит-базитового интрузива (Северное Прибайкалье) // Докл. АН. 1993. Т. 328. № 4. С. 498–501.

Качаровская Л.Н. Сульфидные медно-никелевые руды Йоко-Довыренского расслоенного плутона (состав и условия образования). Автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Улан-Удэ: ГИ БНЦ, 1986. 20 с.

Кислов Е.В. Йоко-Довыренский расслоенный массив. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского НЦ, 1998. 265 с.

Конников Э.Г. Дифференцированные гипербазит-базитовые комплексы докембрия Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1986. 127 с.

Корост Д.В., Ariskin A.A., Пшеницын И.В., Хомяк А.Н. Рентгеновская компьютерная томография как метод реконструкции 3D-характеристик рассеянных сульфидов и шпинелида в плагиодунитах Йоко-Довыренского интрузива // Петрология. 2019. Т. 27. № 4. С. 401–419.

Лихачев А.П. Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения. М.: Эслан, 2006. 496 с.

Новиков Г.В. Пирротины: кристаллическая и магнитная структура, фазовые превращения. М.: Наука, 1988. 185 с.

Орсоев Д.А., Мехоношин А.С., Канакин С.В. и др. Габбро-перидотитовые силы верхнерифейского Довыренского интрузивного комплекса (Северное Прибайкалье, Россия) // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 5. С. 589–605.

Рыцк Е.Ю., Шалаев В.С., Ризванова Н.Г. и др. Олоkitская зона Байкальской складчатой области: новые изотопно-геохронологические и петрохимические данные // Геотектоника. 2002. № 1. С. 29–41.

Рябов В.В., Шевко А.Я., Гора М.П. Магматические образования Норильского района. Новосибирск: Нонпарель, 2001. Т. 1 (Петрология траппов, 2-е изд.). 407 с.

Синякова Е.Ф., Косяков В.И. Поведение примесей благородных металлов при фракционной кристаллизации Cu-Fe-Ni-сульфидных расплавов, содержащих As и Co // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 9. С. 1126–1153.

Синякова Е.Ф., Косяков В.И., Борисенко А.С. Влияние примесей As, Bi, Te на поведение платиновых металлов при фракционной кристаллизации сульфидной магмы // Докл. АН. 2017. Т. 477. № 4. С. 470–474.

Спиридонов Э.М. Рудно-магматические системы Норильского рудного поля // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. С. 1356–1378.

Спиридонов Э.М., Орсоев Д.А., Ariskin A.A. и др. Hg- и Cd-содержащие минералы Pd, Pt, Au, Ag сульфидно-носных базитов и гипербазитов Йоко-Довыренского интрузива в байкалидах Северного Прибайкалья // Геохимия. 2019. Т. 64. № 1. С. 43–58.

Служеникин С.Ф., Дистлер В.В., Дюжиков О.А. и др. Малосульфидное платиновое оруденение в Нориль-

- ских дифференцированных интрузивах // Геология рудн. месторождений. 1994. Т. 36. № 3. С. 195–217.
- Толстых Н.Д., Орсов Д.А., Кривенко А.П., Изох А.Э. Благороднометаллическая минерализация в расслоенных ультрабазит-базитовых массивах юга Сибирской платформы. Новосибирск: Параллель, 2008. 193 с.
- Ariskin A.A., Danyushevsky L.V., Bychkov K.A. et al. Modeling solubility of Fe-Ni sulfides in basaltic magmas: The effect of Ni in the melt // *Economic Geology*. 2013. V. 108. № 8. P. 1983–2003.
- Ariskin A.A., Kislov E.V., Danyushevsky L.V. et al. Cu-Ni-PGE fertility of the Yoko-Dovyren layered massif (Northern Transbaikalia, Russia): thermodynamic modeling of sulfide compositions in low mineralized dunites based on quantitative sulfide mineralogy // *Mineralium Deposita*. 2016. V. 51. P. 993–1011.
- Ariskin A.A., Danyushevsky L., Nikolaev G. et al. The Dovyren intrusive complex (Southern Siberia, Russia): Insights into dynamics of an open magma chamber with implications for parental magma origin, composition, and Cu-Ni-PGE fertility // *Lithos*. 2018a. V. 302–303. P. 242–262.
- Ariskin A.A., Nikolaev G.S., Danyushevsky L.V. et al. Genetic interpretation of the distribution of PGE and chalcogens in sulfide-mineralized rocks from the Yoko-Dovyren layered intrusion // *Geochemistry International*. 2018b. V. 56. № 13. P. 1322–1340.
- Baker D.R., Moretti R. Modeling the solubility of sulfur in magmas: A 50-year old geochemical challenge // *Rev. Mineral. Geochem.* 2011. V. 73. P. 167–213.
- Barnes S.-J., Lightfoot P.C. Formation of magmatic nickel-sulfide ore deposits and processes affecting their copper and platinum-group element contents // Eds. J.W. Hedenquist, J.F.H. Thompson, R.J. Goldfarb and J.P. Richards. *Econom. Geol. 100th Anniversary Vol.* 2005. P. 179–213.
- Barnes S.-J., Cox R., Zientek M. Platinum-group element, gold, silver and base metal distribution in compositionally zoned sulfide droplets from the Medvezky Creek Mine, Noril'sk, Russia // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2006. V. 152. P. 187–200.
- Barnes S.J., Fiorentini M.L., Austin P. et al. Three-dimensional morphology of magmatic sulfides sheds light on ore formation and sulfide melt migration // *Geology*. 2008. V. 36. P. 655–658.
- Barnes S.J., Cruden A.R., Arndt N., Saumur B.M. The mineral system approach applied to magmatic Ni-Cu-PGE sulphide deposits // *Ore Geology Rev.* 2016. V. 76. P. 296–316.
- Barnes J.S., Mungall J.E., Le Vaillant M. et al. Sulfide-silicate textures in magmatic Ni-Cu-PGE sulfide ore deposits: Disseminated and net-textured ores // *Amer. Mineral.* 2017. V. 102. P. 473–506.
- Barnes J.S., Le Vaillant M., Godel B., Leshner C.M. Droplets and bubbles: solidification of sulphide-rich vapour-saturated orthocumulates in the Norilsk-Talnakh Ni-Cu-PGE ore-bearing intrusions // *J. Petrol.* 2019. V. 60. P. 1–31.
- Boudreau A. Hydromagmatic processes and platinum-group element deposits in layered intrusions. Cambridge University Press, 2019. 286 p.
- Campbell I.H., Naldrett A.J. The influence of silicate:sulfide ratios on the geochemistry of magmatic sulfides // *Economic Geology*. 1979. V. 74. № 6. P. 1503–1506.
- Christa H.-M., Couderc J.-J. TEM study of mechanical twinning in experimentally deformed chalcopyrite (CuFeS₂) single crystals // *European Journal of Mineralogy*. 1989. V. 1. № 2. P. 295–314.
- Chung H.-Y., Mungall J.E. Physical constraints on the migration of immiscible fluids through partially molten silicates, with special reference to magmatic sulfide ores // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2009. V. 286. P. 14–22.
- Duran C.J., Barnes S.-J., Pleše P. et al. Fractional crystallization-induced variations in sulfides from the Noril'sk-Talnakh mining district (polar Siberia, Russia) // *Ore Geol. Rev.* 2007. V. 90. P. 326–351.
- Ebel D.S., Naldrett A.J. Fractional crystallization of sulfide ore liquids at high temperature // *Economic Geology*. 1996. V. 91. P. 607–621.
- Ernst R.E., Hamilton M.A., Söderlund U. et al. Long-lived connection between southern Siberia and northern Laurentia in the proterozoic // *Nature Geoscience*. 2016. V. 9. P. 464–469.
- Czamanske G.K., Kunilov V.E., Zientek M.L. et al. A proton microprobe study of magmatic sulfide ores from the Noril'sk-Talnakh District, Siberia // *Canad. Mineral.* 1992. V. 30. P. 249–287.
- Fleet M.E. Phase Equilibria at High Temperatures // *Rev. Mineral. Geochem.* 2006. V. 61. P. 365–419.
- Fortin M.-A., Riddle J., Desjardins-Langlais Y., Baker D.R. The effect of water on the sulfur concentration at sulfide saturation (SCSS) in natural melts // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2015. V. 160. P. 100–116.
- Francis R.D. Sulfide globules in mid-ocean ridge basalts (MORB) and the effect of oxygen abundance in Fe-S-O liquids on the ability of those liquids to partition metals from MORB and komatiitic magmas // *Chemical Geology*. 1990. V. 85. P. 199–213.
- Godel B., Barnes S.-J., Maier W.D. 3D-distribution of sulfide minerals in the Merensky Reef (Bushveld Complex, South Africa) and the J-M Reef (Stillwater Complex, USA) and their relationship to microstructures using X-ray computed tomography // *J. Petrol.* 2006. V. 47. P. 1853–1872.
- Holwell D.A., Keays R.R. The formation of low-volume, high-tenor magmatic PGE-Au sulfide mineralization in closed systems: evidence from precious and base metal geochemistry of the Platinova Reef, Skaergaard intrusion, East Greenland // *Economic Geology*. 2014. V. 109. P. 387–406.
- Holwell D.A., McDonald I. A review of the behavior of platinum group elements within natural magmatic sulfide ore systems. The importance of semimetals in governing partitioning behavior // *Platinum Metals Rev.* 2010. V. 54. № 1. P. 26–36.
- Holwell D.A., Barnes S.J., Le Vaillant M. et al. 3D textural evidence for the formation of ultra-high tenor precious metal bearing sulphide microdroplets in offset reefs: An extreme example from the Platinova Reef, Skaergaard Intrusion, Greenland // *Lithos*. 2016. V. 256–257. P. 55–74.
- Krivolutskaya N.A., Gongalsky B.I., Kedrovskaya T.B. et al. Geology of the western flanks of the Oktyabr'skoe deposit, Noril'sk district, Russia: evidence of a closed magmatic system // *Mineralium Deposita*. 2018. <https://doi.org/10.1007/s00126-018-0827-z>
- Kullerud G., Yund R.A., Moh G.H. Phase relations in the Cu-Fe-S, Cu-Ni-S and Fe-Ni-S systems // *Economic Geology Monograph*. 1969. V. 4. P. 323–343.
- Le Vaillant M., Barnes S.J., Mungall J.E., Mungall E. Role of de-gassing of the Noril'sk nickel deposits in the Permian-Triassic mass extinction event // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2017. V. 114. P. 2485–2490.
- Mungall J.E. Late-stage sulfide liquid mobility in the Main Mass of the Sudbury Igneous complex: Examples from the

- Victor Deep, McCreedy East, and Trillabelle deposits // *Economic Geology*. 2002. V. 97. P. 1563–1576.
- Mungall J.E., Brenan J.M. Partitioning of platinum-group elements and Au between sulfide liquid and basalt and the origins of mantle-crust fractionation of the chalcophile elements // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2014. V. 125. P. 265–289.
- Mungall J.E., Su S. Interfacial tension between magmatic sulfide and silicate liquids: constraints on kinetics of sulfide liquation and sulfide migration through silicate rocks // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2005. V. 234. P. 135–149.
- Naldrett A.J. Magmatic sulfide deposits: geology, geochemistry and exploration. Heidelberg-Berlin: Springer-Verlag, 2004. 727 p.
- Naldrett A.J. Fundamentals of magmatic sulfide deposits // Eds. C. Li and E.M. Ripley. Magmatic Ni-Cu and PGE deposits: geology, geochemistry and genesis. *Rev. Economic Geology*. 2011. V. 17. P. 1–50.
- Naldrett A.J., Hewins R.H., Dressler B.O., Rao B.V. The contact sublayer of the Sudbury Igneous complex // Eds. E.G. Pye, Naldrett A.J., Giblin P.E. The geology and ore deposits of the Sudbury Structure. Ontario Geol. Surv. Spec. 1984. V. 1. P. 253–274.
- Patten C., Barnes S.-J., Mathez E.A., Jenner F.E. Partition coefficients of chalcophile elements between sulfide and silicate melts and the early crystallization history of sulfide liquid: LA-ICP-MS analysis of MORB sulfide droplets // *Chemical Geology*. 2013. V. 358. P. 170–188.
- Prichard H.M., Hutchinson D., Fisher P. C. Petrology and crystallization history of multiphase sulfide droplets in a mafic dike from Uruguay: Implications for the origin of Cu-Ni-PGE sulfide deposits // *Economic Geology*. 2004. V. 99. P. 365–376
- Robertson J.C., Barnes J.S., Le Vaillant M. Dynamics of magmatic sulphide droplets during transport in silicate melts and implications for magmatic sulphide ore formation // *J. Petrol.* 2016. V. 56. P. 2445–2472.
- Taylor L.A., Finger L.W. Structural refinement and composition of mackinawite // Carnegie Institution of Washington Geophysical Laboratory Annual Report. 1970. V. 69. P. 318–322.
- Tsujimura T., Kitakaze A. New phase relations in the Cu-Fe-S system at 800°C; constraint of fractional crystallization of a sulfide liquid // *N. Jb. Mineral. Mh.* 2004. V. 10. P. 433–444.
- Vishnevskiy A.V., Cherdantseva M.V. Merenskyite and other precious metal minerals in sulfide blebs from the Rudny ultramafic-mafic intrusion, northwest Mongolia // *Canad. Mineral.* 2016. V. 54. P. 519–535.

Morphology, Mineralogy and Composition of Sulfide Droplets in Picrodolerite from the Near-Bottom Apophyses of the Yoko-Dovyren Layered Intrusion

I. V. Pshenitsyn^{1,2,#}, A. A. Ariskin^{1,2}, G. S. Nikolaev², E. V. Kislov³,
D. V. Korost¹, V. O. Yapaskurt¹, and S. N. Sobolev¹

¹Faculty of Geology, Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

²Vernadsky Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

³Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude 670047, Russia

#e-mail: lotecsi@gmail.com

The results of studies of sulfide globules in picrodolerites from the bottom apophysis of the Yoko-Dovyren massif (Northern Transbaikalia) are presented. The structural features of these rocks indicate crystallization under conditions of rapid magma cooling. Their composition is similar to the composition of quenched olivine gabbro-norites from the lower contact of the massif. Using methods of X-ray computed tomography we found many drop-like globules (ranging in size from 2 to 15 mm) in one of the samples. The largest globule was drilled out and studied in detail. This made it possible to clarify its structure, which includes the main spheroid and the surrounding halo of disseminated sulfides. Using the average compositions for the main sulfide phases and their relative proportions, significant differences were found in the average chemical composition of the main drop and the surrounding halo, which is richer in copper. The bulk (with halo) composition can be considered as an approximation of the initial sulfide liquid formed near the quenching zone of the gabbro-norite apophysis from the main intrusive chamber. The copper content in the initial sulfide corresponds to the results of thermodynamic modeling (COMAGMAT-5 program) of the geochemistry of primitive sulfides in ultramafites from the base of the massif. The differences in the composition of the halo and the main drop indicate the possibility of local migration (on the scale of the first mm) of residual sulfide liquids enriched with copper at the stage of differentiation of the protosulfide melt. As the physical mechanism of halo formation, it is assumed that the latest sulfide fraction is pressed into the pore space of rapidly crystallizing olivine orthocumulates.

Keywords: Yoko-Dovyren massif, picrodolerite, X-ray computed tomography, sulfide drops, protosulfide liquid