

УДК 549.324.35, 552.18 (571.53/55), 550.42, 552.311

РЕНТГЕНОВСКАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ КАК МЕТОД РЕКОНСТРУКЦИИ 3D-ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯННЫХ СУЛЬФИДОВ И ШПИНЕЛИДА В ПЛАГИОДУНИТАХ ЙОКО-ДОВЫРЕНСКОГО ИНТРУЗИВА

© 2019 г. Д.В. Корост¹, А.А. Арискин^{1,2,*}, И.В. Пшеницын^{1,2}, А.Н. Хомяк¹

¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Воробьевы Горы, 1, Москва, 119234, Россия*

² *Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН
ул. Косыгина, 19, Москва, 119991, Россия*

**E-mail: ariskin@rambler.ru*

Поступила в редакцию 12.01.2019 г.;
Получена после доработки 05.02.2019 г.;
Принята к публикации 08.02.2019 г.

Представлена методология применения рентгеновской компьютерной томографии (КТ) для изучения структурно-морфологических особенностей сульфидоносных ультрамафитов Йоко-Довыренского расслоенного массива в Северном Прибайкалье (Бурятия, Россия). На примере плагиодунитов предложен надежный метод разделения зерен сульфидов и шпинелида, позволяющий получить статистические характеристики 3D-распределения и размера этих фаз. Показано, что метод объемных реконструкций применим при крайне низких содержаниях сульфидов – до 0.1–0.2 мас.%. Установлены различия стереологических моделей для разноразмерных сульфидных обособлений, в нескольких случаях с признаками ориентировки, указывающей на направление перколяции и аккумуляции сульфидных жидкостей. С этим согласуется морфология наиболее крупных выделений сульфидов, вогнутые участки которых примыкают к поверхности кристаллов кумулозного оливина, при одновременном вращении в зерна пойкилитового плагиоклаза. Детализация этих особенностей полезна для установления сигналов инфильтрации и участков концентрирования протосульфидных жидкостей в сильно закристаллизованных кумулозных системах.

Ключевые слова: рентгеновская компьютерная томография, рассеянные сульфиды, шпинелид, интрузив, объемное распределение, инфильтрация сульфидных жидкостей

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5903274401-419>

ВВЕДЕНИЕ

Комплексы магматических пород основного и ультраосновного состава являются важнейшим ресурсом никеля, меди, платины, палладия, ряда других переходных и благородных металлов. Поведение этих элементов при дифференциации мафит-ультрамафитовых магм обычно контролируется сульфидной фазой, которая является их главным концентратом. По этой причине исследованиям условий зарождения, пространственного перераспределения и накопления сульфидов в лавовых потоках и интрузивных телах придается решающее значение при решении проблем образования и выработке критериев поиска

магматогенных Cu-Ni-ЭПГ месторождений (Naldrett, 2004; Maier, 2005; Лихачев, 2006; Holwell, McDonald, 2010; McCuaig et al., 2010; Ripley, Li, 2013). Известные примеры включают крупные расслоенные массивы (такие как Бушвельд, Стиллуотер или Мончеплутон) и менее мощные тела, проявленные нередко, как часть вулcano-плутонических комплексов, например интрузивы Норильского района, Дулутского комплекса в США или Печенги в Мурманской области России (Cawthorn, 2005; Barnes, Lightfoot, 2005; Смолькин и др., 2004; Krivolutskaia, 2016). Геолого-тектоническая обстановка, текстуры пород в рудоносных горизонтах и строение рудных тел в таких объ-

ектах различаются. Их принято разделять на четыре основные группы (Barnes et al., 2017): (1) стратиформные горизонты, включающие сульфиды, рассеянные в разнообразных кумулатах расслоенных интрузивов, в частности ЭПГ-риффы (PGE-reefs); (2) вкрапленные (глобулярные — globular) и сидеронитовые (или сетчатые — net-textured) руды в относительно маломощных телах, представляющих закристаллизованные реликты магмоподводящих систем; (3) скопления сульфидов в коматиитовых потоках, также связанных с проводниками ультраосновных магм; (4) зоны минерализации по периферии интрузивных тел, представленные переходами от рассеянных сульфидов до вкрапленных руд (например, Ariskin et al., 2018b; Karykowski et al., 2018). Особый тип представляет месторождение комплекса изверженных пород Садбери (Онтарио, Канада), сформированное в пределах крупной ударной структуры (Naldrett, 2004).

Независимо от текстурных особенностей рудоносных пород и масштабов накопления сульфидов, все эти проявления связаны общим процессом силикатно-сульфидной несмесимости, которая возникает на разных стадиях эволюции интрузивных магм и их гетерофазовых производных — кумулатов. Начало сульфидной ликвации задает последовательность рудообразующих процессов, включающих эффективную экстракцию, перенос и концентрирование меди, никеля, ЭПГ и других халькофильных элементов в продуктах дифференциации магм (Naldrett, 2011). Магматическая природа и состав этих исходных сульфидных жидкостей предопределяют последующую историю кристаллизации и субсолидусных преобразований протосульфидного вещества, в конечном минеральном составе которого преобладают пирротин/троилит, пентландит и халькопирит ± кубанит разных генераций (Спиридонов, 2010). Таким образом, информация о сульфидно-жидкостной предыстории рудоносных систем может сохраняться в морфологии сложных сульфидных агрегатов (капли, первичные прожилки, сетчатые структуры и другие формы) и их валовом составе. Морфология сульфидных обособлений является отображением совокупности физических процессов, связанных с переносом и накоплением протосульфидных жидкостей в поровом пространстве частично закристаллизованных кумулатов (Ariskin et al., 2016; Barnes et al., 2017). Тогда как средневзвешенный химиче-

ский состав сульфидов отражает эволюцию этого многокомпонентного Cu-Ni-Fe-ЭПГ прекурсора по мере прогрессирующей несмесимости (Campbell, Naldrett, 1979; Ariskin et al., 2018c) или в процессах посткумулусной кристаллизации с последующим отделением поздних, существенно медистых, Cu-Ni-Fe сульфидных фракций (Mungall, 2002; Синякова, Косяков, 2012; Синякова и др., 2017).

Существующие модели сульфидно-силикатной несмесимости достаточно точно предсказывают диапазон термодинамических параметров (T - fO_2 -летучие), отвечающих за появление сульфидов в мафит-ультрамафитовых системах (Li, Ripley, 2009; Fortin et al., 2015), включая состав исходных существенно Ni-Fe сульфидных жидкостей (Ariskin et al., 2013). Этот факт инициировал разработку эффективных алгоритмов моделирования условий насыщения сульфидом и эволюции содержаний ЭПГ и других халькофильных элементов в магматических расплавах и сульфидных фазах (Kiseeva, Wood, 2013, 2015; Ariskin et al., 2016, 2018a, 2018b; Арискин и др., 2017). Однако главные вопросы рудообразования касаются конкретных механизмов сегрегации, переноса и накопления сульфидного вещества в магматических породах. В последние годы достигнут значительный прогресс в понимании природы этих транспортных явлений, с учетом взаимосвязи физических параметров сульфидных жидкостей с реологическими свойствами расплавно-кристаллической среды, в которой формируются первые сульфидные глобулы и обособления (Robertson et al., 2016; Barnes et al., 2017). Важную роль в развитии этого направления сыграли эксперименты по поровой миграции сульфидных расплавов в оливиновых кумулатах в сочетании с анализом механизмов микроглобулярного и макросегрегационного осаждения конденсированных сульфидов в гетерогенной матрице (Mungall, Su, 2005; Chang, Mungall, 2009). Результаты экспериментов показали, что эффективность массопереноса и первичного накопления сульфидов в магматических породах зависит не только от состава систем, но также проницаемости кумулатов на стадии их формирования и в посткумулусных процессах, вероятно, вплоть до полного затвердевания пород (Mungall, 2002). Фундаментальный вывод состоит в том, что, несмотря на низкую смачиваемость сульфидной жидкостью силикатных фаз (что формально препятствует перемеще-

нию глобуль размером более интеркумулусных пор), высокая плотность сульфидов относительно породообразующих минералов приводит к локальной гидродинамической неустойчивости сульфидных сегрегаций (Robertson et al., 2016), способных к объемной инфильтрации вниз – сквозь сеть поровых каналов, заполненных интеркумулусным расплавом (Chang, Mungall, 2009).

Последствия этих процессов зафиксированы не только в морфологических особенностях сульфидных обособлений, но также в текстурах кумулатов и распределении сульфидных фаз по разрезам дифференцированных лавовых потоков, расслоенных интрузивов и ассоциирующих гипабиссальных тел (Keays et al., 2011; Holwell, Keays, 2014; Ariskin et al., 2016, 2018b). Методы современной рентгеновской компьютерной томографии (далее КТ) открывают возможности для идентификации и количественного описания этих структурно-петрографических характеристик (Baker et al., 2012; Pearce et al., 2017). Перспективность подобных подходов продемонстрировали исследования рудоносных пород из платинометалльных горизонтов Бушвельда и Стиллуотера (Godel et al., 2006), коматиитов Западной Австралии (Barnes et al., 2008) и обогащенных сульфидами ультрамафитов из интрузива Мирабелла в Восточной Бразилии (Barnes et al., 2011).

Последовательное развитие КТ-исследований и их распространение на широкий круг рудоносных объектов привело к разработке особой методологии исследований сульфидоносных пород, сочетающих разнообразие рентгеновских методов визуализации 3D-структур и возможностей элементного 2D-картирования фрагментов пород с вкраплениями сульфидов (Barnes et al., 2016, 2017). В настоящей статье приводятся первые результаты КТ-исследований сульфидоносных ультрамафитов из основания Йоко-Довыренского массива в Северном Прибайкалье, полученные при помощи инструментальных систем, обеспечивающих данные различного разрешения и значимости. Учитывая, что систематические работы по рентгеновской компьютерной томографии магматических пород в России только начинаются, мы приводим основы компьютерной микротомографии, акцентируя внимание на методических проблемах, связанных с трудностями разделения шпинелида и сульфида, а также интерпретации 3D-распределений сульфидных фаз в образцах.

МЕТОДОЛОГИЯ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ БАЗА КТ-ИССЛЕДОВАНИЙ

Главная задача рентгеновской компьютерной томографии горных пород – неинвазивное изучение объектов с целью получения трехмерных моделей их текстуры, определения структурных соотношений, морфологии и особенностей распределения рентгеноконтрастных фаз. Преимущества и ограничения этих методов по сравнению с использованием двумерных представлений магматических пород в виде шлифов и аншлифов рассмотрены в работе (Baker et al., 2012). При этом обращается внимание, что экстраполяция 2D-информации на объемный “образ” породы может приводить к существенным искажениям относительно реальных 3D-структур и распределений за счет вариаций формы и размера конкретных минеральных зерен и их скоплений. КТ-исследования позволяют минимизировать эти неопределенности путем использования образцов разного размера (обычно от соразмерных со стандартным керном до малых фрагментов и мини-керна объемом ~50–100 мм³) и в вариациях разрешения от первых сотен до нескольких микрон. Эти различия определяют специфику рентгеновской макро- и микротомографии, рассмотренной в настоящей работе.

Основы и технология применения методов КТ. Основными узлами компьютерного томографа являются: источник рентгеновских лучей, непосредственно объект изучения, через который проходят испускаемые источником лучи, и детектор, фиксирующий уровень излучения, непоглощенного объектом (рис. 1). Отдельное двумерное изображение, отвечающее интенсивности рентгеновского излучения после прохождения последнего через изучаемый образец, называется *теневой проекцией*. основополагающий принцип компьютерной томографии заключается в получении множества таких проекций с различных углов обзора, поэтому, в отличие от классической рентгеновской радиографии, здесь помимо проекции образца фиксируется информация о пространственном положении изучаемого объекта, источника и детектора. Большинство современных томографов относятся к приборам третьего поколения, в которых объект исследований помещается в поле обзора детектора (как правило, рентгеновской камеры), а теневые проекции аккумулируются как результат последующего пошагового вращения

образца вокруг своей оси (Feldkamp, 1986). При этом при каждом повороте фиксируется отдельная проекция.

Яркость, традиционно визуализируемая различными градациями серого, на рентгеновской теневой проекции отражает ослабление рентгеновского излучения, за счет эффектов рассеивания и поглощения сигнала (рентгеновская абсорбция), прошедшего через образец. Ослабление сигнала зависит от плотности и состава вещества¹, из которого состоит изучаемый объект. Описывается этот эффект законом Ламберта–Бера, определяющим ослабление монохроматического пучка света при распространении его в поглощающей среде (Rontgen, 1989):

$$I(x) = I_0 e^{(-\mu x)},$$

где I_0 – начальная интенсивность рентгеновского излучения, x – толщина слоя вещества, через которое проходит излучение, μ – показатель поглощения среды. При этом надо учитывать, что при прохождении рентгеновского излучения через образец поглощение может быть сопряжено с четырьмя видами взаимодействия: фотоэлектрическое поглощение, комптоновское рассеяние, образование электрон-позитронных пар и когерентное рассеяние Рэлея (Halmshaw, 1991). В случае геологических объектов, когда применяются источники с энергией до 100–200 КэВ, основным процессом, определяющим ослабление рентгеновского излучения, является фотоэлектрическое поглощение. На практике информация о процессах, протекающих при ослаблении излучения, необходима для последующей корректной обработки данных. Известно, что фотоэлектрическое поглощение пропорционально Z^{4-5} , тогда как в случае комптоновского рассеяния, возникающего при энергии излучения 5–10 МэВ, последнее пропорционально Z . В результате такой разницы эффектов лучи, обладающие меньшей энергией, оказываются более чувствительными к различиям в составе образца, по сравнению с излучениями большей энергии. Например, кварц и калиевый полевой шпат характеризуются близкими значениями плотности (2.65 и 2.59 г/см³ соответственно), но на малых энергиях излучения поглощение μ для этих

двух минералов будет значительно различаться из-за присутствия в составе КППШ “более тяжелых” атомов калия. Режимы съемок на разных энергиях излучения полезны для повышения рентгеновского контраста отдельных минеральных фаз в теневых проекциях.

Принципы реконструкции данных КТ. Каждая из теневых проекций, полученных в результате съемки образца, имеет точную пространственную привязку. Это позволяет провести восстановление или так называемую “реконструкцию” данных, которая сводится к пересчету серии полученных рентгенограмм в набор плотностных рентгеновских сечений, отображающих внутреннюю структуру объекта. Фактически, это математическая операция преобразования исходных рентгенограмм в двумерные плотностные рентгеновские срезы. Наиболее распространенный алгоритм реконструкции – обратное проецирование с фильтрацией, когда изначальный массив данных подвергается операции конволюции. При этом интенсивность излучения на исходных рентгенограммах переводится в КТ-плотность (в форме распределения оттенков серого на срезах), разрешение которой зависит от используемой компьютерной системы, а каждая теневая проекция последовательно накладывается на сетку координат в соответствии с ее положением при съемке (рис. 1).

Оборудование. В настоящей работе были использованы три инструментальные КТ-системы, выбор которых обусловлен характером решаемых петрологических задач. При этом учитывалось, что объективная оценка качества и необходимости использования конкретного рентгеновского томографа должна опираться не столько на технические параметры прибора, но, прежде всего, – на особенности объекта исследований в условиях конкретного эксперимента. Эмпирический опыт показывает, что главные параметры съемок, как правило, недостижимы в своих экстремумах одновременно. С одной стороны, наиболее высокое разрешение на уровне первых микрон требует длительных (до 10–20 ч) съемок даже для малых фрагментов пород, поэтому такая детализация практически невозможна для крупных образцов. С другой стороны, текстурные особенности крупных образцов лучше изучать с использованием “более быстродействующих” систем относительно низкого разрешения (сотни микрон). При этом надо учитывать, что высокий контраст по рентге-

¹ В качестве характеристики состава обычно используется параметр Z , представляющий средневзвешенное “атомное число” данного материала.

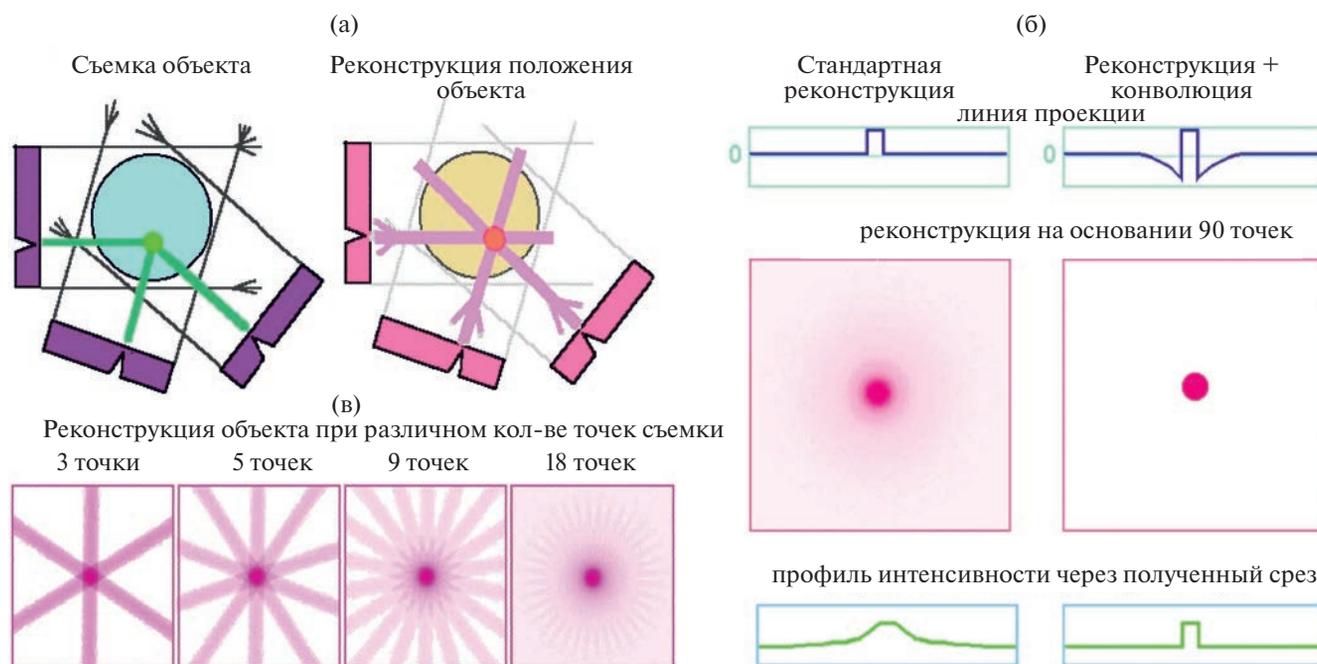


Рис. 1. Схема рентгеновской съемки и реконструкции данных КТ-исследований. (а) – принцип реконструкции положения образца; (б) – пример использования процедуры конволюции, (в) – влияние количества точек съемки на данные реконструкции.

новскому поглощению минеральных фаз нельзя получить при высоких энергиях излучения.

Последовательность съемок. *На первом этапе* наиболее крупные и потенциально важные образцы сульфидоносных пород (размером до $7 \times 7 \times 20$ см) сканировались при помощи томографа РКТ-180 (производства компании ГЕОЛОГИКА, Новосибирск), который был разработан для изучения полноразмерного скважинного керна и обеспечивает достаточно быструю съемку цилиндрических образцов – до 4–6 м за день. Разрешение данных, в зависимости от выбранных режимов работы камеры приемника, составляло 100–200 мкм. Визуальный анализ теневых проекций позволил получить представление о внутреннем строении этих объектов и выделить наиболее перспективные образцы и/или их участки с разной степенью накопления и пространственного распределения сульфидных фаз. Таким образом, была сформирована серия наиболее информативных образцов для более детального изучения. *На втором этапе* они исследовались на сканере Phoenix v|tome|x m300 (GE, США). Увеличение времени съемок и последовательные реконструкции с построением 3D-моделей привели к значительным качественным улучшениям полученной информации: разрешение для различных по размеру образцов составило от 40 до 70 мкм,

а контрастность данных позволила уверенно выделять большинство рентгеноконтрастных компонентов пород. *На третьем этапе* из отдельных образцов этой выборки были дополнительно выбурены 10-мм цилиндры, съемка которых проводилась на сканере SkyScan-1172 (Bruker, Германия), что позволило получить стеки данных с разрешением около 3 мкм.

Проведенные съемки включали для каждого образца от 1000 (этап I) до 4000 (этап III) плоскостных срезов, из которых при помощи пакета программ компании SkyScan (DataViewer, CTAn, CTVol, CTVox) производился пересчет рентгенограмм в плотностные сечения, отображающие строение объекта. Значительная разность в плотности алюмохромита ($4.5\text{--}4.8$ г/см³) и сульфидов (халькопирит ~ 4.2 , пирротин/троилит $4.6\text{--}4.7$ и пентландит $4.6\text{--}5.0$ г/см³) относительно породообразующих силикатов ($2.6\text{--}3.4$ г/см³) гарантировала реальную картину распределения наиболее плотных фаз в масштабе от нескольких десятков до первых сантиметров, вплоть до разрешения порядка первых микрон (см. ниже).

ОБРАЗЦЫ ДЛЯ КТ-ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящей работе представлены результаты изучения нескольких образцов ультрамафитов Йоко-Довыренского расслоенно-

го массива в Северном Прибайкалье (далее “Довырен”), которые, несмотря на убогую сульфидную минерализацию, представляют интерес как маркеры ранних стадий силикатно-сульфидной несмесимости при кристаллизации примитивных довыренских кумулатов (Арискин и др., 2018). Это проявляется в Cu-Ni и ЭПГ-геохимии данных пород, признаках пересыщенности кумулатов сульфидом относительно серы, растворенной в инерткумуляном расплаве, и характере пространственного распределения халькофильных элементов относительно других горизонтов в придонной части и расслоенной серии массива (Ariskin et al., 2018b, 2018c). Ниже приводятся основные особенности стратиграфической последовательности довыренских пород.

Строение и минерализация Йокко-Довыренского массива. Этот интрузив расположен примерно в 60 км к северу от СВ оконечности озера Байкал и проявлен в виде субпластового тела, простирающегося с юго-запада на северо-восток на расстоянии около 26 км (Конников, 1986; Кислов, 1998). Мощность массива варьирует от 1.3–2.2 км на краях до 3.4 км в центральной части; падение близко к вертикальному. Это наиболее крупное из тел Довыренского интрузивного комплекса, который имеет возраст 728 млн лет и представляет вулканоплутоническую формацию, известную как Сыннырско-Довыренский комплекс (Арискин и др., 2009). В его состав (помимо плутона) входят комагматичные силлы и вулканыты (Арискин и др., 2013, 2015; Орсов и др., 2018). Строение Довырена хорошо изучено в наиболее мощной центральной части, где более 90% разреза слагает контрастная последовательность пород, которую можно соотнести с Расслоенной серией (рис. 2). Она включает зоны плагиоклазсодержащих и адкумулясных дунитов внизу (~970 м), различной меланократовости троктолиты в средней части (~950 м) и залегающие выше габброиды, которые варьируют от оливиновых габбро до оливиновых и оливинсодержащих габброноритов (~1050 м). Нижняя часть Расслоенной серии переходит в горизонт плагиоклазовых перидотитов (фактически сильно оливиновых габброноритов, 150–200 м), которые вблизи нижнего контакта сменяются пикритоидными породами (“пикродолеритами”) и закаленными габброноритами. Верхнюю часть Расслоенной серии венчают существенно безоливиновые пижонитсодержащие габбро и лейкогаббро-

нориты (около 200 м), к которым относятся и прикровельные тонкозернистые фации эндоконтакта.

Cu-Ni-сульфидная минерализация Довырена представлена горизонтами и участками рассеянных сульфидов, неравномерно распределенными по разрезу – от нижних до прикровельных горизонтов (Кислов, 1998; Толстых и др., 2008; Ariskin et al., 2016, 2018b). Содержание сульфида в отдельных породах может локально достигать 7–10 мас.%. В ультрамафитовых силлах и дайках габброноритов ниже подошвы интрузива, а также апофизах из главного тела отмечены проявления богатых вкрапленных и сидеронитовых руд с содержанием сульфида до 30% (Кислов, 1998).

Выбор представительных образцов. Объектом КТ-исследований явились убого и слабо минерализованные плагиодуниты из ~150 м горизонта в нижней части разреза Довырена (Ariskin et al., 2016), который выделяется по возросшим содержаниям в породах Cu, Ni, Pd, Pt, Au и других халькофильных элементов (рис. 2). Эти породы отнесены нами ко второму типу относительно примитивных плагиоперидотитов в основании массива, которые представляют переходные разности между плагиоклазовыми лерцолитами и плагиоклазсодержащими дунитами с повышенным содержанием алюмохромита (Арискин и др., 2018). Малосульфидная минерализация плагиодунитов проявлена в виде редких вкраплений сульфидов в пространстве между зернами кумульного оливина – как часть интеркумуляной ассоциации, где резко доминируют пойкилитовые зерна плагиоклаза (см. изображения шлифов на рис. 2). Сульфидные фазы представлены мелкими (0.1–0.3 мм) полиминеральными агрегатами или более крупными (до 1 мм) зернами, сложенными пентландитом (до 80–95%) и пирротинном (продукты кристаллизации Mss с широкими вариациями отношения Fe : Ni) и редко халькопиритом. Встречаются сростания более крупных зерен сульфидов с флогопитом.

Концентрация S в плагиодунитах сравнима с данными для пород из зоны закалки, хотя последние содержат существенно больше интеркумулясных фаз (табл. 1). Иными словами, в нормированном (на массу интеркумуляса) выражении плагиодуниты содержат существенно больше серы. Более того, сравнение с прогнозными оценками SCSS (“Sulfur Content at Sulfide Saturation” (Campbell, Naldrett, 1979))

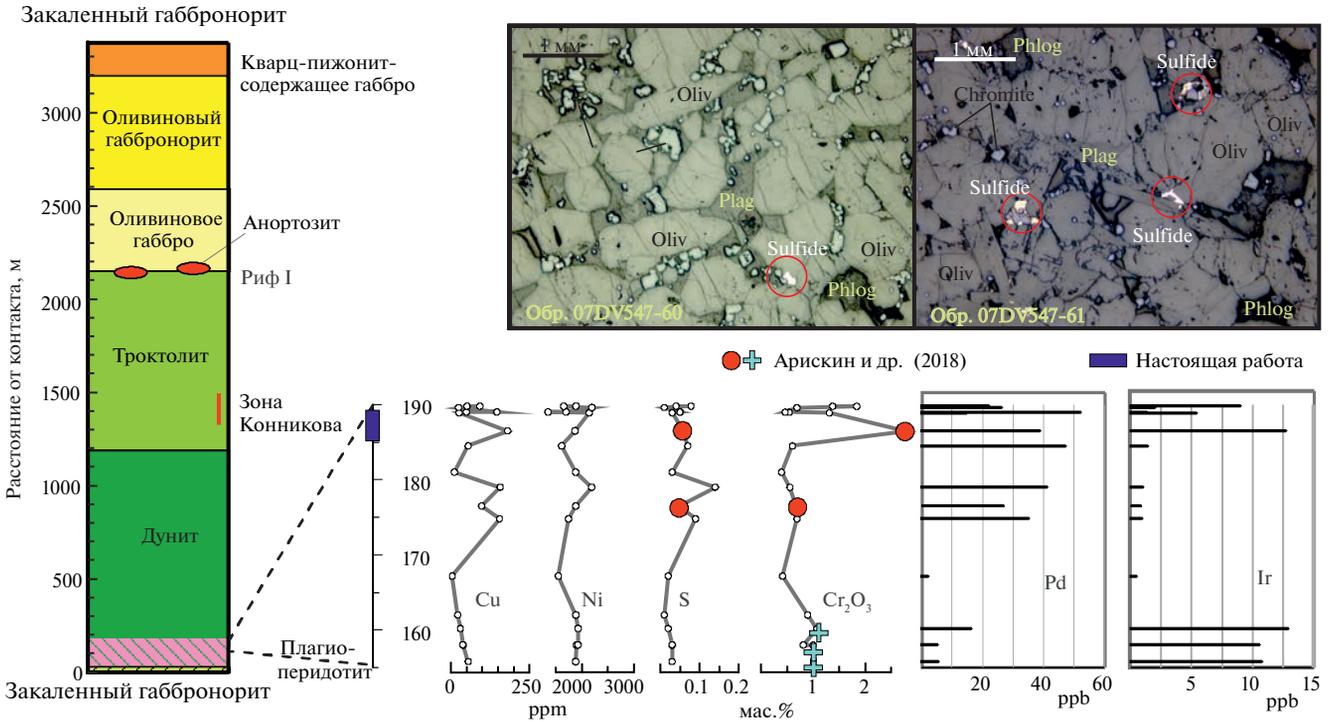


Рис. 2. Сводный разрез Йоко-Довыренского массива в центральной части (Ariskin et al., 2016, 2018b), распределение Cu, Ni, S, Cr₂O₃ и ЭПГ в зоне перехода от плагиоперидотитов к плагиоклазосодержащим дунитам и микрофотографии представительных образцов плагиодунитов 07DV547-60 и -61 в отраженном цвете. Голубые крестики представляют плагиоперидотиты I типа или “плагиоцеролиты”, тогда как другие – синий (прямоугольник) и красные (кружки) символы – плагиоперидотиты II типа или “плагиодуниты” (Арискин и др., 2018), согласно сложившейся терминологии регионального описания этих пород (Кислов, 1998).

в довыренской магме показывает, что эти нормированные концентрации заметно превышают возможные пределы растворимости сульфидной серы в магматическом расплаве (Ariskin et al., 2018b). Это означает, что убогая минерализация плагиодунитов не могла сформироваться *in situ*, за счет локального выделения сульфидных фаз из кристаллизующегося интеркумулусного расплава. Мы полагаем, что в данном горизонте имело место незначительное по массе, но геохимически значимое накопление сульфидов, вероятно, как результат миграции несмесиной сульфидной жидкости из области зарождения на более высоких уровнях – сквозь поровое пространство нижележащих затвердевающих кумулатов. Это согласуется с положительными корреляциями содержаний легких платиноидов, S и Te для пород из основания Довырена, включая пикродолериты с поверхности контакта и другие слабо минерализованные породы подошвы массива (Ariskin et al., 2018c). Таким образом, плагиодуниты с рассеянной сульфидной минерализацией представляют удобный объект для томографических исследований, ориентированных на поиск структурных признаков

перколяции и накопления малых порций примитивных сульфидных расплавов.

Другая важная особенность этих пород – повышенные (относительно других сульфидоносных ультрамафитов) концентрации Ir, Ru и родия, которые коррелируют с максимально высоким (по сравнению с другими сульфидоносными породами) содержанием хрома (см. распределение Ir и Cr₂O₃ на рис. 2). Подобные корреляции связаны с накоплением в породах шпинелида, который является фазой-концентратором тяжелых платиноидов, определяя поведение этих элементов на стадии предшествующей и сопряженной с началом силикатно-сульфидной несмесиности (Арискин и др., 2018). Эта особенность опре-

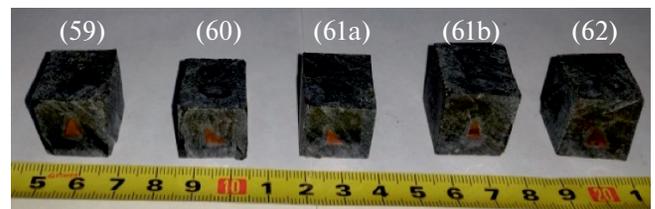


Рис. 3. Фотографии кубообразных образцов плагиодунитов (13DV547-59, -60, -61a, -61b, -62), приготовленных для детальных КТ-исследований (табл. 1).

Таблица 1. Петрохимические характеристики и содержания халькофильных металлов в пикродолерите из зоны закалки и представительных плагиодунитах

№ пп	Номер образца	<i>h</i> , м	S, мас.%	Cr ₂ O ₃ , мас.%	Cu	Ni	Ir	Ru	Rh	Pd	Pt	Au
Пикродолерит из зоны закалки на нижнем контакте интрузива												
1	DV30-1	0.4	0.05	0.17	70	555	1.07	3.13	0.75	8.44	7.12	1.52
Плагиодуниты												
2	13DV547-59	186										
3	13DV547-60	187	0.06	2.78	180	1868	12.8	49.9	19.0	39.0	59.5	1.70
4	13DV547-61	188										
5	13DV547-62	189	0.03	1.31	25	2140	5.46	22.3	8.12	14.9	23.6	0.75
6	07DV124AB	190	0.05	0.47	48	1353	1.36	6.96	3.50	52.4	8.8	0.69

Примечание. Полу жирным шрифтом выделены образцы, изученные методами КТ; *h* – расстояние от нижнего контакта массива (в метрах). Содержания ЭПГ и золота даны в мг/т (ppb, лаборатория GEOLABS, Онтарио, Канада). Полные составы обр. DV30-1, 13DV547-60 и -62 с пределами обнаружения элементов приведены в работе (Арискин и др., 2018). Данные о составе обр. 13DV547-59 и -61 отсутствуют, состав обр. 07DV124AB показан как представительный для опробованного интервала. Состав обр. DV30-1 можно рассматривать как аппроксимацию исходной довыренской магмы (Арискин и др., 2018).

деляет необходимость решать на тех же образцах проблему пространственного разделения шпинелида и присутствующих в резко подчиненных количествах сульфидов, что является неординарной задачей КТ-исследований.

Выбор конкретных образцов для решения поставленных задач включал две стадии. Сначала, на предварительном этапе, проводилось сканирование довыренских ультрамафитов с использованием томографа низкого разрешения РКТ-180. Эти результаты были проанализированы на предмет микротрещиноватости и наличия/отсутствия сульфидных фаз. Полученные данные явились основанием для окончательного выбора четырех пород из трехметрового интервала в основании плагиодунитового горизонта (табл. 1). Для микротомографических исследований с разрешением 40–70 мкм было приготовлено пять кубообразных образцов с длиной ребра ~2 см (рис. 3), включая обр. 13DV547-59, -60, -61a, -61b и -62 (рис. 3). В последующем для более детального изучения с разрешением около 3 мкм из них выбуривались цилиндры диаметром 10 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для каждого из пяти изученных образцов были получены первичные стеки, состоящие из 2–3 тыс. рентгеноплотностных срезов,

на основании которых выделены отдельные рентгеноконтрастные компоненты. Эти данные использованы для стереологических реконструкций и визуализации соответствующих трехмерных моделей. Параллельно проведена статистическая обработка закономерностей распределения этих компонентов, включая оценки объемного содержания, распределения по размеру, связанности и морфологические характеристики.

Исследования с разрешением 40–70 мкм.

По данным КТ на кубических образцах уверенно выделяются три рентгеноконтрастные фазовые ассоциации²: оливин (примерно 80% от объема, вероятно с примесью каебок пироксена), преимущественно плагиоклаз (в редких случаях с флогопитом) и хромшпинелид с исчезающе малым количеством сульфида, см. демонстрационный разноплотностной срез обр. 13DV547-59 на рис. 4. Несмотря на умеренную контрастность, последовательная обработка подобных стеков при помощи программы STAn

² На начальном этапе КТ-исследований термин “фаза” используется применительно к смеси компонентов (иногда разного минерального вида), которые при данных условиях съемки имеют близкие характеристики рентгеновского поглощения, например, ассоциации оливин ± пироксен или шпинелид + сульфид. Возможность разделения шпинелида и сульфида как самостоятельных минеральных фаз появляется в процессе съемки при высоком разрешении.

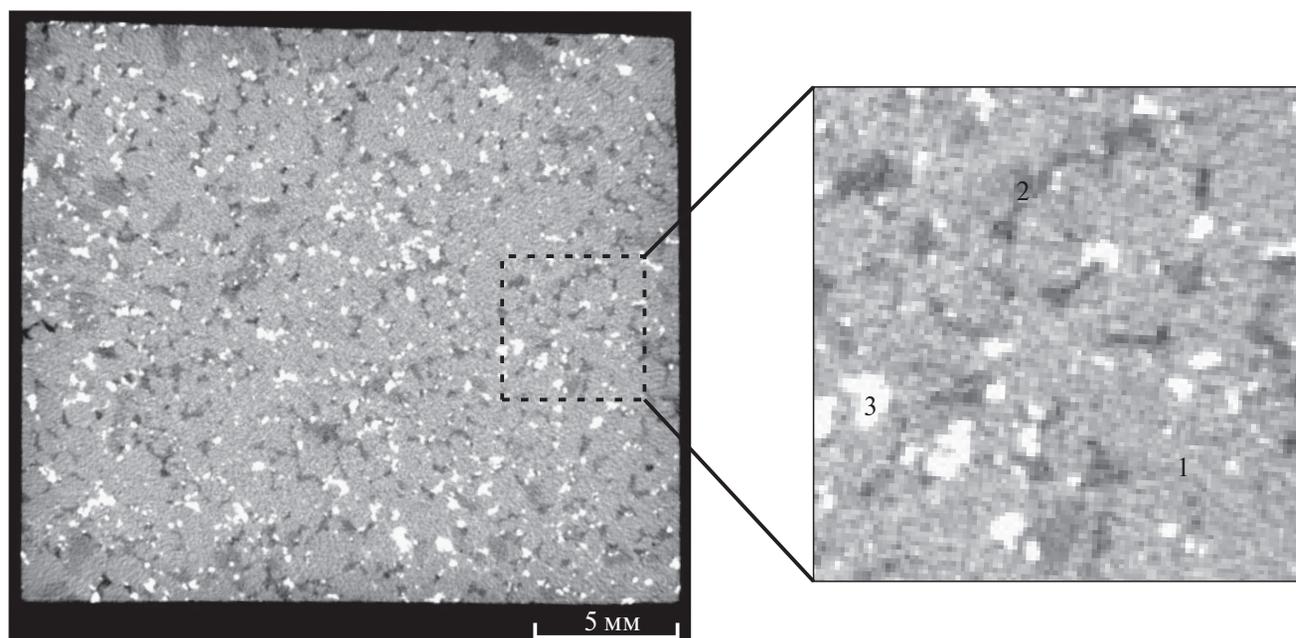


Рис. 4. Пример отдельного рентгеноплотностного среза кубического обр. 13DV547-59 при съемке с разрешением 40–70 мкм. На увеличенном фрагменте обозначены: светлосерая фаза 1 (оливин), темносерая фаза 2 (плагиоклаз) и белого цвета фаза 3 (шпинелид).

в пакете SkyScan позволяет получить стереологические модели образцов, демонстрирующие пространственное распределение трех выделенных рентгеноконтрастных фаз – условно, фазы 1 (оливин), фазы 2 (плагиоклаз) и фазы 3 (шпинелид). На рис. 5а–5в показано объемное распределение плагиоклаза, шпинелида и результат их совмещения на одной проекции в случае изучения того же обр. 13DV547-59. При анализе подобных стереограмм надо учитывать, что особенностью 3D-моделей, спроецированных на плоскость, является кажущееся полным заполнение объема при содержании фазы более 5–10%. Именно так выглядит распределение

плагиоклаза на рис. 5а, поскольку его количество в плагиодунитах по результатам SIPW пересчетов варьирует в пределах 13–15 об.% (Ariskin et al., 2018). Этот факт объясняет отсутствие аналогичной проекции для оливина, которая представляла бы кубический объект, полностью залитый одним фоном. Отметим также, что при заданном разрешении фаза 3 включает только интеркумулусный шпинелид и не учитывает микровключений в оливине, большинство которых меньше 20–30 мкм. По этой же причине группы относительно мелких включений шпинели в пойкилитовом плагиоклазе (см. изображения шлифов на рис. 2)

Таблица 2. Содержания рентгеноконтрастных компонентов в кубических образцах плагиодунитов при съемке с разрешением 40–70 мкм

Номер образца	Оливин ± редкий пироксен	Плагиоклаз + подчиненные количества флогопита		Шпинелид ± редкие сульфиды
	объемное содержание, %	объемное содержание, %	связанность, %	объемное содержание, %
13DV547-59	79.0	13.8	90	7.2
13DV547-60	81.8	15.5	92	2.7
13DV547-61a	83.2	13.3	91	3.5
13DV547-61b	81.8	15.8	95	2.4
13DV547-62	81.7	15.6	95	2.7

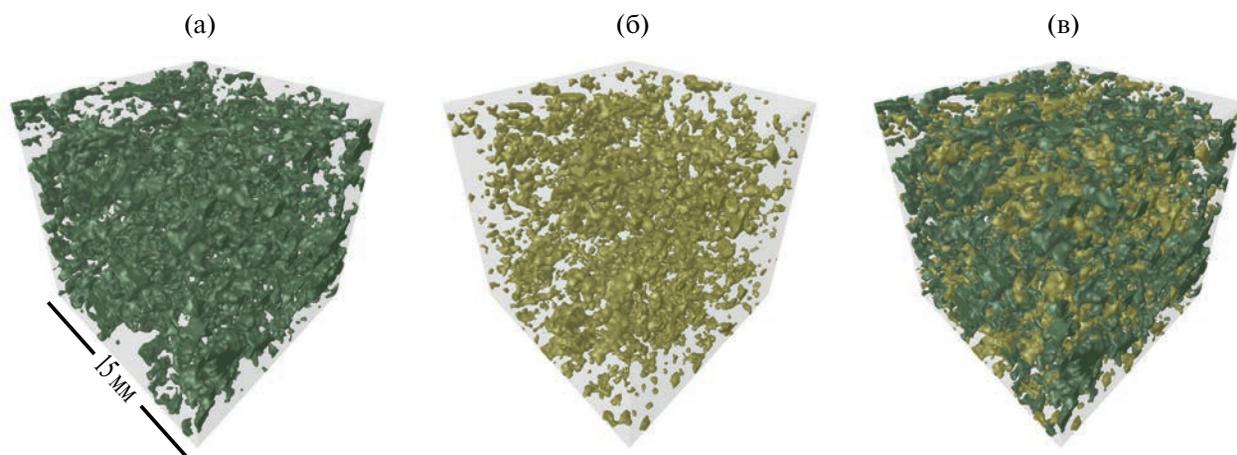


Рис. 5. Примеры 3D-моделей для рентгеноконтрастных порообразующих компонентов плагиодунита обр. 13DV547-59 при съемке с разрешением 40–70 мкм. (а) – зеленая фаза 2 (плагиоклаз), (б) – фаза 3 (шпинелид), (в) – сопряжение объемных распределений плагио-клаза и шпинелида.

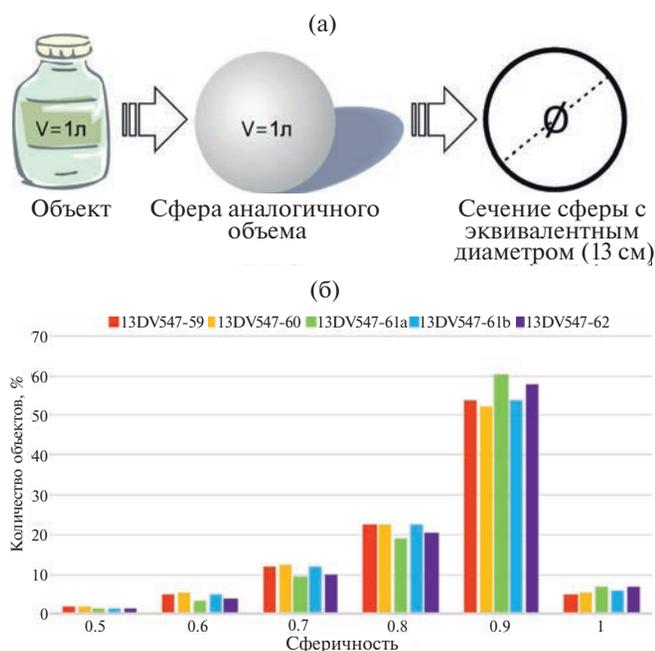


Рис. 6. Графический пример расчета эквивалентного диаметра объекта неправильной формы (а) и гистограммы распределения кластеров и кристаллов фазы 3 (шпинелида) по их сферичности в кубических образцах (б).

на рентгенограммах, как правило, сливались в одно целое.

Возможности программы STAn в пакете SkyScan позволяют рассчитать средние объемные содержания рентгеноконтрастных фаз и показатели их *связанности* в изученных образцах (табл. 2)³. Важный результат этого цифрового анализа состоит в том, что пойки-

литовый (в двумерных сечениях) плагиоклаз в объемном представлении практически нацело связан в единую разветвленную систему, заполняя пространство между кристаллами оливина. Об этом свидетельствуют высокие значения связанности для плагиоклаза – 90–95% (табл. 2). Таким образом, весь плагиоклаз можно рассматривать как продукт кристаллизации *in situ* в интеркумулусе, а заполненный им объем – как своего рода “слепок” порового пространства оливиновых кумулатов, ранее заполненных магматическим расплавом. В то же время фаза 3 (шпинелид + редкие сульфиды) представлена множеством (в среднем первые тысячи) отдельных объектов (рис. 5б).

Для элементов шпинелида был также выполнен статистический анализ их формы и размера. Оценка формы отдельных объектов производилась по их относительной *сферичности* (это отношение S_1/S_2 , где S_2 – поверхность частицы, а S_1 – поверхность шара того же объема). Оказалось, что большинство этих объектов характеризуются значениями сферичности от 0.85 до 0.95 (рис. 6). Эти оценки отражают близкую к изометричной форму объемных скоплений (кластеров) зерен шпинелида в интеркумулусе (см. изображение левого шлифа на рис. 2).

Для статистического сравнения размеров отдельных элементов шпинелида, имеющих несколько различную форму, используется другая производная КТ-исследований – так называемый *эффективный диаметр*. Этот параметр трактуется как диаметр условной сферы, имеющей объем, идентичный объему

³ Под связанностью понимается доля наиболее крупного единого объекта в общем объеме данной фазы.

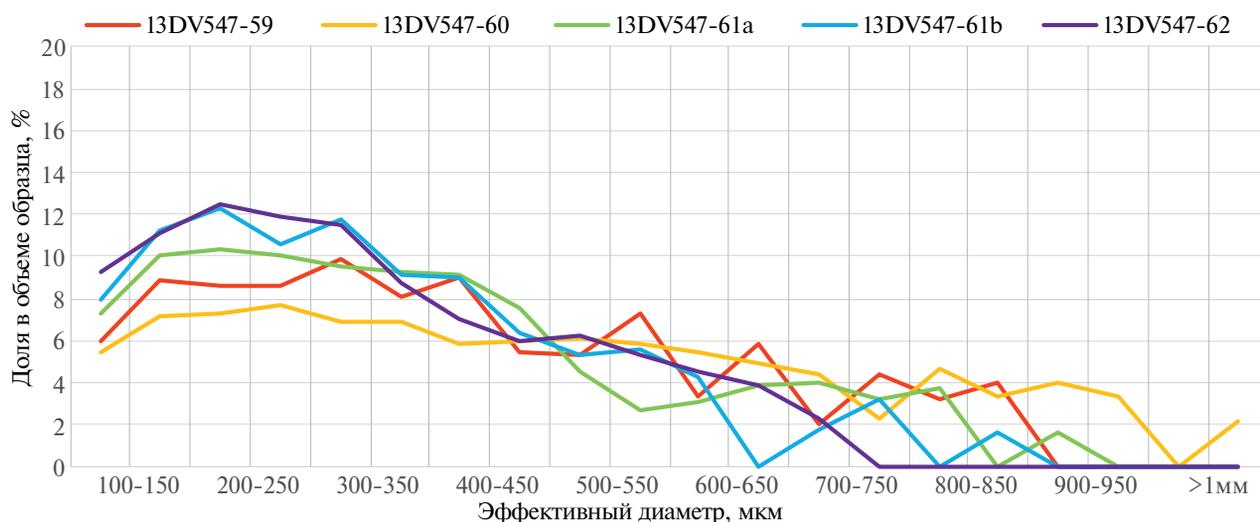


Рис. 7. Графики распределения по размеру отдельных частиц “шпинелида” (кристаллы + кластеры зерен) в кубических образцах.

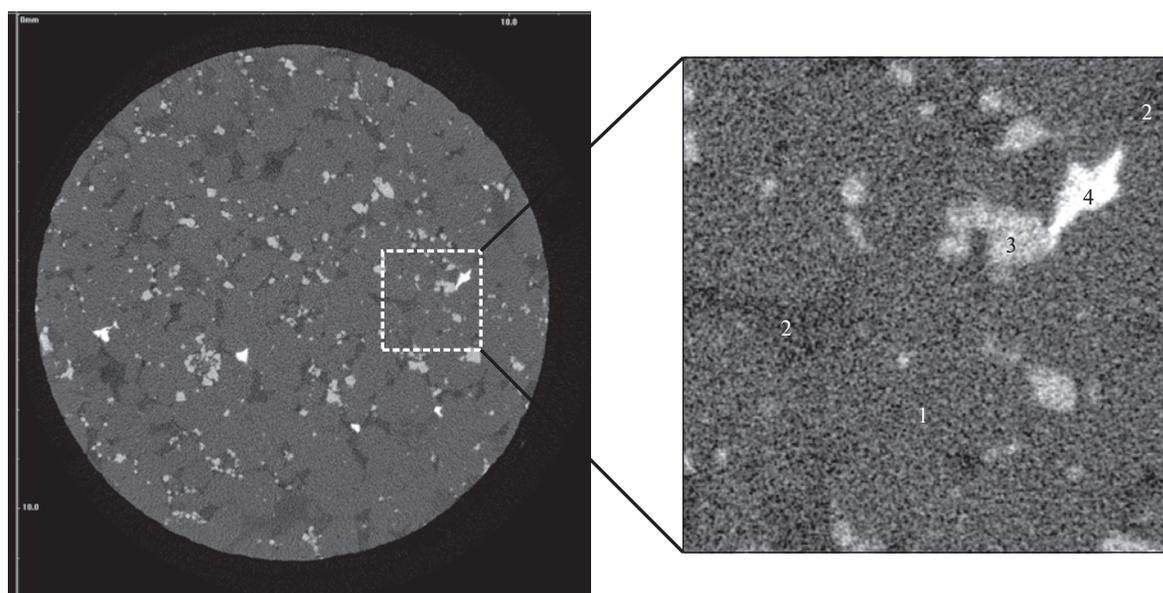


Рис. 8. Пример рентгеноплотностного среза для цилиндрического образца плагидунита 13DV547-62 (диаметром 10 мм) при съемке с разрешением около 3 мкм. На увеличенном фрагменте обозначены: фаза 1 (оливин), фаза 2 (плагноклаз), фаза 3 (шпинелид) и фаза 4 (сульфид).

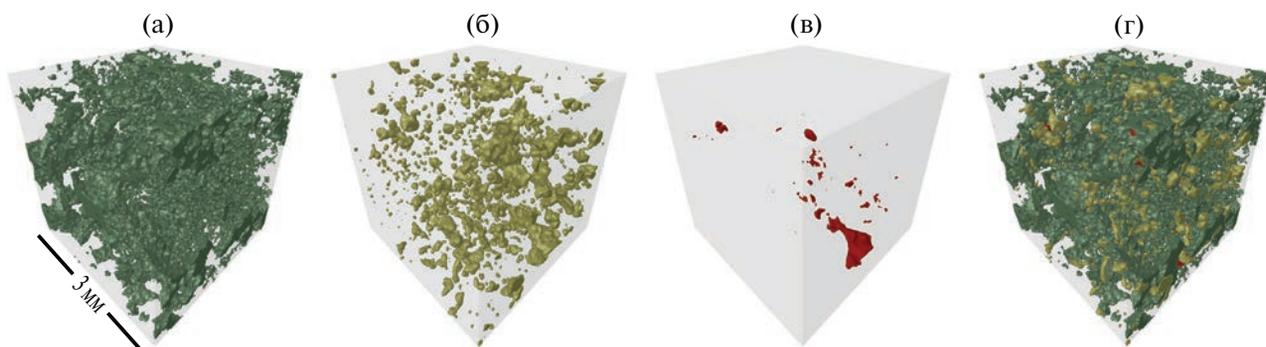


Рис. 9. Примеры 3D-моделей для рентгеноконтрастных породообразующих компонентов плагидунита обр. 13DV547-62 при съемке с разрешением около 3 мкм. (а) – фаза 2 (плагноклаз), (б) – фаза 3 (шпинелид), (в) – фаза 4 (сульфид) и (г) – совмещенное распределение плагноклаза, шпинелида и сульфида.

выбранного объекта (рис. 6а). Оказалось, что большинство объектов, отнесенных к шпинелиду имеют линейные размеры около 100–400 мкм (рис. 7). Столь значительный средний размер для выделенных элементов этого минерала характеризует не отдельные зерна, а их компактные скопления в условиях разрешения проведенных съемок (см. выше).

Исследования с разрешением около 3 мкм. Для более детального сканирования из кубических образцов выбуривались мини-керны диаметром 10 мм, которые изучались при максимально высоком разрешении в условиях понижения центральной энергии источника. Данные КТ по результатам этих съемок позволяют выделить уверенно уже не три, а четыре рентгеноконтрастные фазы, которые проявлены на плоскостных сечениях для обр. 13DV547-62 и отвечают оливину (фаза 1), плагиоклазу (фаза 2), реальному шпинелиду (фаза 3) и сульфиду (фаза 4), см. рис. 8. По этому примеру не трудно заметить, что для данной серии экспериментов характерно некоторое снижение рентгеновского контраста между оливином и плагиоклазом, при одновременной возможности надежно идентифицировать две высокоплотные фазы – алюмохромистую шпинель (Арискин и др., 2018) и сульфид. Таким образом, наблюдаемое улучшение результата по рентгеновскому поглощению объясняется двумя взаимосвязанными факторами – повышением пространственного разрешения и уменьшением энергии источника, что приводит к доминированию эффекта фотоэлектрического рассеивания.

На рис. 9а–9г показано распределение плагиоклаза, шпинелида, сульфида и результат их совмещения на одной проекции в объеме кубика с ребром 2 мм, цифровым образом вырезанного из цилиндра. Здесь обращает внимание лентообразная сопряженность сульфидных обособлений (рис. 9в), которую можно рассматривать как след локальной инфильтрации сульфидной жидкости сквозь поровое пространство кумулатов (Ariskin et al., 2016). Интересно, что к окончанию этого протяженного кластера приурочена наиболее крупная сульфидная сегрегация. Отсутствие данных о пространственной ориентировке образца не позволяет сделать вывод, являются ли подобные структурные соотношения отражением процесса формирования этой сегрегации или ее распада в гравитационном поле (Robertson et al., 2016).

Объемные содержания четырех главных фаз минералов и связанности плагиоклаза в цилиндрических 10-мм образцах приведены в табл. 3. Подобно образцам кубической формы, в них установлена высокая связанность плагиоклаза (94–97%), однако оценки содержания фаз в объеме изученных образцов несколько разнятся – в интервале 1.5–5 об.% для оливина, 1.5–3% для плагиоклаза и 0.1–2.6% для шпинелида. Эти вариации можно объяснить неоднородностью исходных кубических образцов, при этом определенный вклад вносят отличия в детальности съемок и размере изученных объектов. Оценки объемного содержания сульфидов в плагиодунитах с убогой минерализацией удовлетворительно согласуются с данными о содержании серы в породах: например, для породы с 0.06 мас.% S в обр. 13DV547-60 (табл. 1) при среднем содержании S в сульфиде 35 мас.% имеем не более $0.06/0.35 = 0.17$ мас.% сульфида в образце. При пересчете массовых процентов на объемные (с учетом высокой плотности сульфида) получим несколько выше 0.1 об.%, что согласуется с оценкой 0.07 об.% по данным КТ-исследований (табл. 3).

При анализе сферичности и распределения по размерам для зерен и кластеров шпинелида, элементы, составляющие эту фазу, были объединены с элементами сульфидной фазы, учитывая ее пренебрежимо малое количество. Это сделало возможным прямое сопоставление данных на цилиндрических и кубических образцах, где разделить сульфиды и шпинелиды не удалось. Оценки сферичности этих элементов при съемках на разных образцах при разном разрешении в целом оказались близки, но не идентичны (сравните гистограммы на рис. 6 и 10). Количество кластеров с высокими коэффициентами сферичности в интервале 0.8–1 в случае кубических образцов при относительно низком разрешении в среднем превышает 90% (рис. 6), тогда как на высоком разрешении для цилиндрических образцов имеем около 80% (рис. 10). Это указывает на то, что результаты КТ на высоком разрешении позволяют разделить часть кластеризованных элементов, хотя при этом не удается достичь детальности при использовании оптической микроскопии (рис. 2).

Гораздо контрастнее различаются распределения оценок “среднего” (эквивалентного) размера элементов шпинелида, особенно в диапазоне 100–400 мкм и для максималь-

Таблица 3. Содержания рентгеноконтрастных компонентов в цилиндрических образцах плагиодунитов при съемке с разрешением около 3 мкм

Номер образца	Оливин	Плагиоклаз		Шпинелид	Сульфид
	объемное содержание, %	объемное содержание, %	связанность, %	объемное содержание, %	объемное содержание, %
13DV547-59	84.48	10.80	94	4.60	0.12
13DV547-60	80.73	14.10	97	5.10	0.07
13DV547-61a	86.15	10.00	95	3.80	0.05
13DV547-61b	84.95	11.90	96	3.10	0.05
13DV547-62	80.35	17.00	97	2.60	0.05

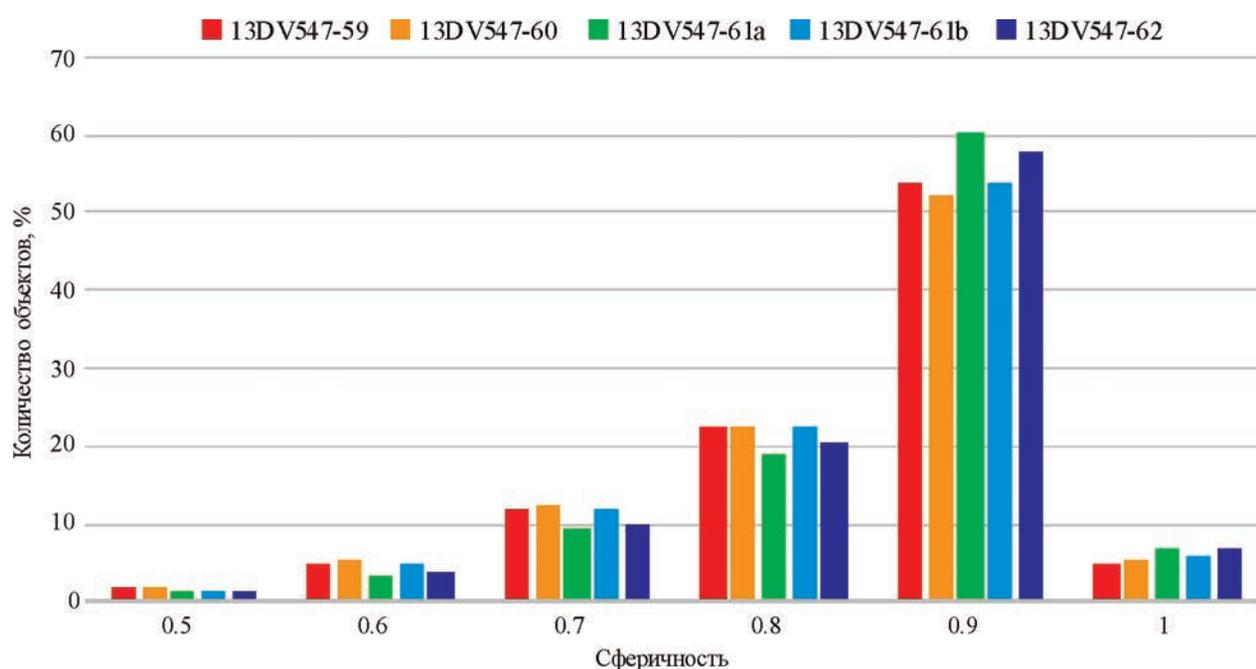


Рис. 10. Гистограммы распределения отдельных элементов комбинированной фазы (шпинелид + сульфид) по их сферичности в цилиндрических образцах.

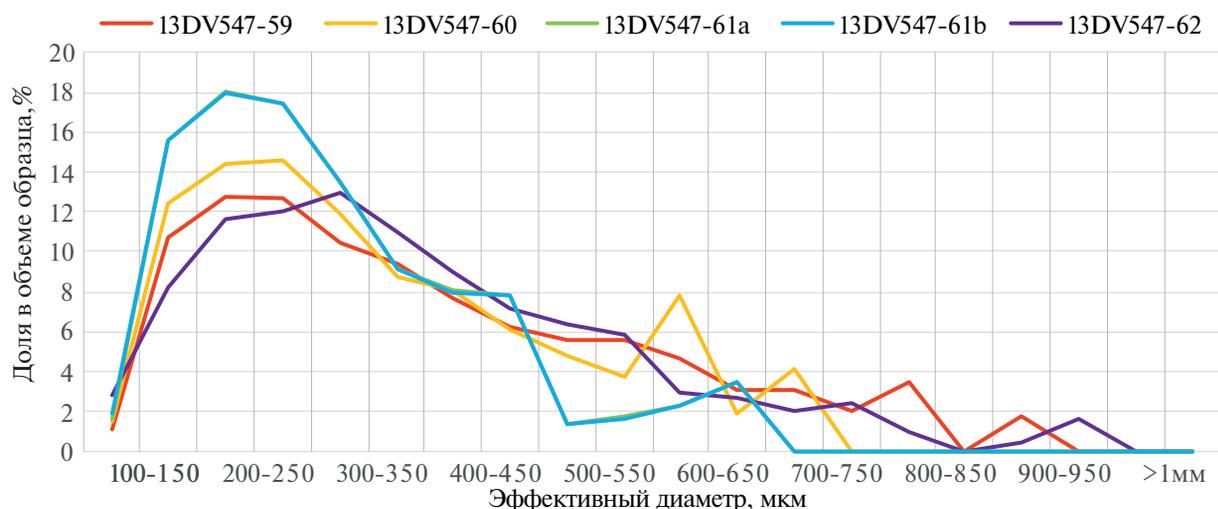


Рис. 11. Графики распределения частиц комбинированной фазы (шпинелид + сульфид) по размеру в цилиндрических образцах.

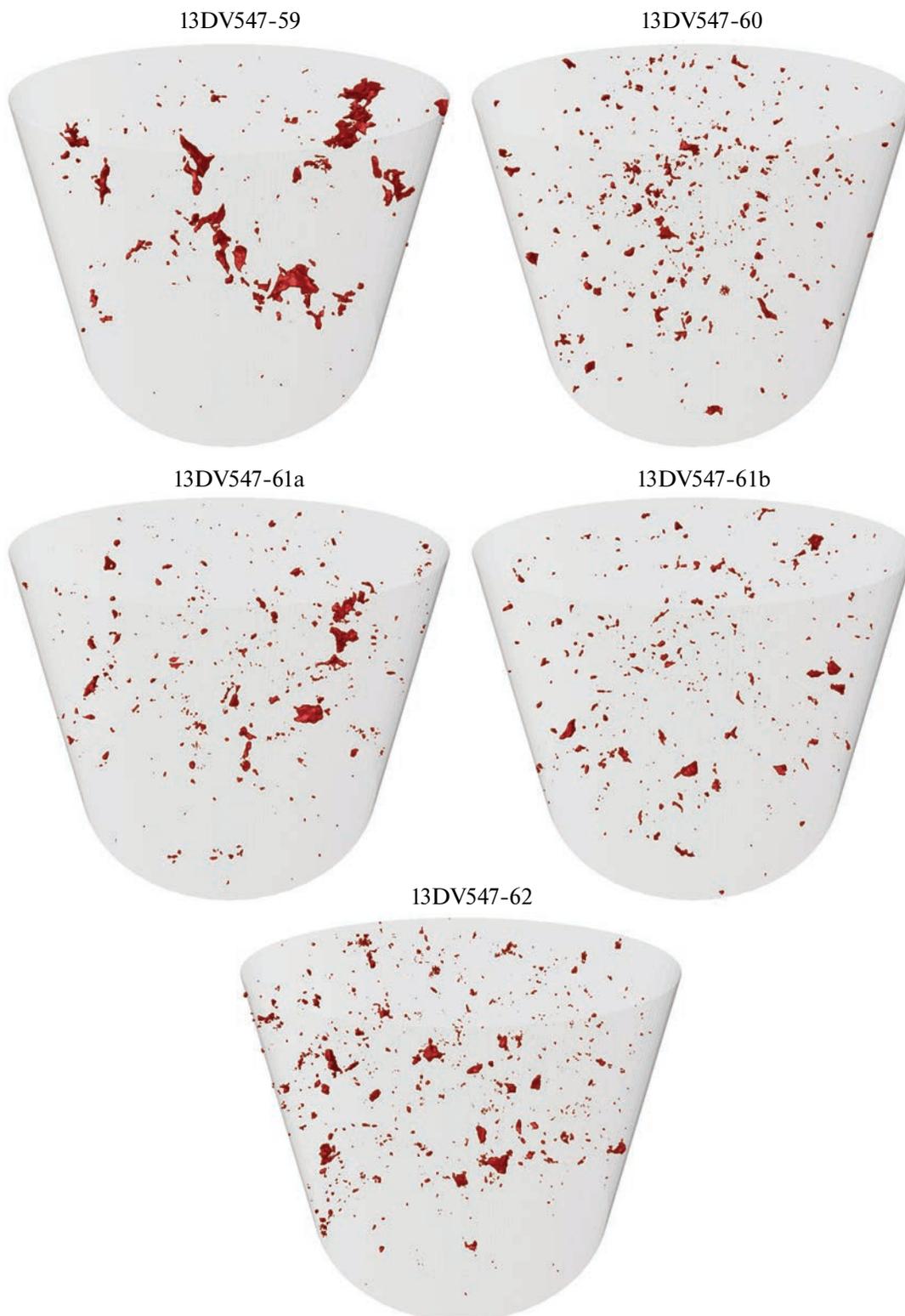


Рис. 12. Трехмерные модели распределения сульфидных частиц в объеме изученных цилиндрических образцов. Диаметр цилиндров — 10 мм. Номера образцов отвечают серии 13DV547-nn (табл. 1). Анимации объемного распределения сульфидов в образцах 13DV547-59 и 13DV547-62 представлены в виде приложений ESM_1.pdf и ESM_2.pdf на сайте <http://link.springer.com>



Рис. 13. Трехмерные модели наиболее крупных частиц сульфидной фазы в изученных образцах плагиодунитов.

ных размеров свыше 700 мкм (сравните рис. 7 и 11). В случае кубических образцов кривые распределения размеров в первом интервале выглядят монотонными, демонстрируя тренд последовательного понижения примерно от 12% для элементов с размером 150–200 мкм до 8% при 350–400 мкм (рис. 7). В случае цилиндрических образцов при более высоком разрешении на подобных кривых появляется четко выраженный экстремум, отвечающий 16–18% элементам с размером примерно от 150 до 300 мкм и резкое снижение кластеров размером более 700 мкм (рис. 11). Очевидно, это отражает тот факт, что при более высоком разрешении искусственно объединенные кластеры удается разделить на фрагменты меньшего размера, в том числе отвечающие реальным наиболее крупным зернам шпинелида (см. изображения шлифов на рис. 2).

Распределение и морфология сульфидных зерен в плагиодунитах. Тот факт, что содержание сульфидных фаз в изученных образцах крайне мало и составляет сотые доли

процента (табл. 3), позволяет визуализировать морфологическое разнообразие сульфидных элементов, наиболее крупные из которых (до 1 мм в сечении) отмечены в цилиндрических обр. 13DV547-59 и -61a (рис. 12). Приведенные здесь трехмерные реконструкции демонстрируют различия в пространственном распределении сульфидов: для обр. 13DV547-60, -61b и -62 характерно более равномерное распределение зерен по размеру и заполнению объема, тогда как обр. 13DV547-59 и -61a демонстрируют не только присутствие наиболее крупных сегрегаций, но также признаки их ориентировки – подобно показанной на рис. 9в. При этом наиболее крупные сульфидные обособления отмечены на самом низком стратиграфическом уровне, обр. 13DV547-59 (табл. 1). Морфология этих крупных зерен разнообразна – во всех случаях представляя неправильной формы разветвленные агрегаты, вогнутые фрагменты которых указывает на обволакивание зерен породообразующих оливина и плагиоклаза (рис. 13).

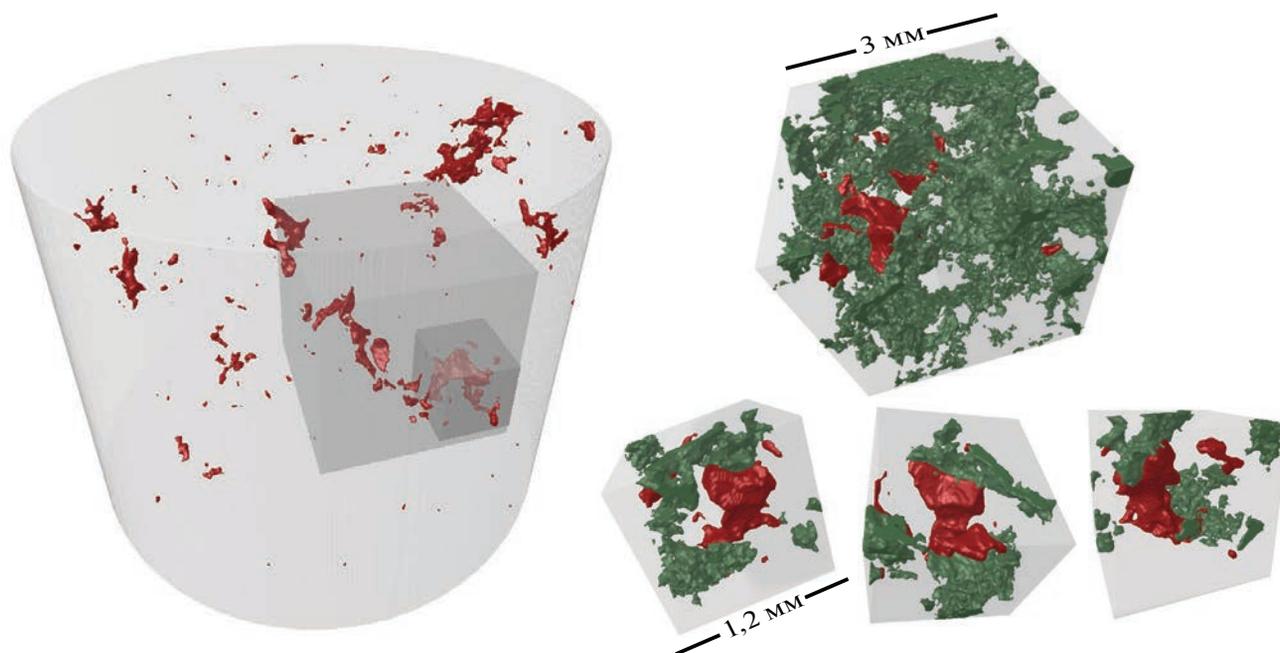


Рис. 14. Трехмерные модели соотношений интеркумулясного плагиоклаза (зеленый) и крупных сульфидных образований (красный) в объеме обр. 13DV547-59.

Такая форма оставляет мало сомнений, что эти обособления являются продуктами кристаллизации исходных сульфидных жидкостей, которые концентрировались в определенных участках — между зерен кумулюсного оливина и плагиоклаза, кристаллизовавшегося *in situ*, вероятно, параллельно прогрессирующей силикатно-сульфидной несмеси. Это подтверждает пространственная ассоциация сульфидов с другими фазами интеркумулуса, прежде всего плагиоклазом. Как пример, на рис. 14 представлены стереологические соотношения крупных сульфидных частиц с плагиоклазом для нескольких кубообразных участков, вырезанных электронным образом из цилиндрического обр. 13DV547-59 (рис. 12). Эти результаты наглядно показывают, что в объеме породы сульфидные обособления образуют с плагиоклазом участки непрерывной разветвленной сети, выполняющей пространство между зёрнами кумулюсного оливина (рис. 14). Эти наблюдения согласуются с предположением, что подобные соотношения интеркумулюсных фаз представляют запись условий образования, инфильтрации и миграции сульфидных расплавов сквозь поровое пространство кристаллизующихся кумулюсов (Barnes et al., 2017).

ВЫВОДЫ

(1) Рассмотрены практические аспекты применения методов рентгеновской компьютерной макро- и микротомографии для изучения структурных особенностей и морфологии зерен сульфидов и шпинелида в слабо минерализованных ультрамафитах — на примере плагиодунитов Йоко-Довыренского расслоенного массива. Показано, что, варьируя разрешение и энергию источника, удается надежно разделить эти фазы в объеме породы и представить для них статистически обоснованные структурно-петрографические характеристики. Установлено, что этот подход приводит к реальным оценкам количества сульфидных фаз, вплоть до крайне низких содержаний порядка 0.1–0.2 мас. %.

(2) Визуальный анализ стереологических моделей распределения сульфидных фаз позволяет предполагать наличие определенной ориентировки разноразмерных сульфидных обособлений (рис. 9в) и приуроченность наиболее крупных выделений сульфидов к кон-

тактам с поверхностью кристаллов кумулюсного оливина (рис. 13), при одновременных вращающихся в зерна пойкилитового (интеркумулюсного) плагиоклаза (рис. 14).

(3) Форма и распределение наиболее крупных сульфидных обособлений указывают на предысторию сульфидных жидкостей, которые концентрировались в остаточном поровом пространстве кристаллизующихся кумулюсов, иногда образуя цепочки — как след своеобразных каналов повышенной проницаемости.

(4) Детализация морфологических особенностей и расшифровка физических причин формирования подобных структур полезны для реконструкции сигналов инфильтрации и концентрирования первично-магматических сульфидных жидкостей в сильно закристаллизованных кумулюсных системах.

(5) Перспективным направлением современной петрологии представляется корреляция результатов подобных КТ-исследований с геохимическими особенностями поведения халькофильных элементов (включая ЭПГ) при дифференциации мафит-ультрамафитовых магм в крупных магматических камерах (Арискин и др., 2017; Ariskin et al., 2018c).

Благодарности. Авторы благодарят Г.С. Николаева (ГЕОХИ РАН, Москва) и Е.В. Кислова (ГИН СО РАН, Улан-Удэ) за помощь при проведении полевых исследований и сборе образцов. Мы также выражаем признательность В. Туркову и К. Рязанцеву (ГЕОХИ РАН, Москва) за подготовку аншлифов и препаратов для КТ-исследований. Содержательные дискуссии со Стивом Барнсом (Steve Barnes, CSIRO Mineral Resources, Perth, Australia) во многом инициировали направленность данного проекта.

Источники финансирования. Работа поддержана грантом Российского научного фонда № 16-17-10129.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арискин А.А., Конников Э.Г., Данюшевский Л.В., и др. Довыренский интрузивный комплекс: проблемы петрологии и сульфидно-никелевой минерализации // Геохимия. 2009. Т. 47. № 5. С. 451–480.
- Арискин А.А., Конников Э.Г., Данюшевский Л.В., и др. Геохронология Довыренского интрузивного комплекса в Неопротерозое (Северное Прибайкалье, Россия) // Геохимия. 2013. № 11. С. 955–972.

- Арискин А.А., 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.
- Арискин А.А., 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.
- Арискин А.А., Николаев Г.С., Данюшевский Л.В., и др.* Геохимические свидетельства фракционирования платиноидов иридиевой группы на ранних стадиях дифференциации довыренских магм // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 5. С. 573–588.
- Кислов Е.В.* Йоко-Довыренский расслоенный массив. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского научного центра, 1998. 265 с.
- Конников Э.Г.* Дифференцированные гипербазит-базитовые комплексы докембрия Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1986. 127 с.
- Лихачев А.П.* Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения. М.: Эслан, 2006. 496 с.
- Орсоев Д.А., Мехоношин А.С., Э.Г. Канакин С.В., и др.* Габбро-перидотитовые силлы верхнерифейского Довыренского интрузивного комплекса (Северное Прибайкалье, Россия) // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 5. С. 589–605.
- 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 (Геохимия). 2017. Т. 477. № 4. С. 470–474.
- Смолькин В.Ф., Федотов Ж.А., Нерадовский Ю.Н., и др.* Расслоенные интрузии Мончегорского рудного района: петрология, оруденение, изотопия, глубинное строение. Части 1 и 2. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2004. 487 с.
- Спиридонов Э.М.* Рудно-магматические системы Норильского рудного поля // Геология и геофизика 2010. Т. 51. С. 1356–1378.
- Толстых Н.Д., Орсоев Д.А., Кривенко А.П., Изох А.Э.* Благороднометалльная 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., Bychkov K.A., Nikolaev G.S., Barmina G.S.* The COMAGMAT-5: Modeling the effect of Fe-Ni sulfide immiscibility in crystallizing magmas and cumulates // Journal of Petrology. 2018a. V. 59. № 2. P. 283–298.
- Ariskin 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. 2018b. 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. 2018c. V. 56. № 13. P. 1322–1340.
- Baker D.R., Mancini L., Polacci M., et al.* An introduction to the application of X-ray microtomography to the three-dimensional study of igneous rocks // Lithos. 2012. V. 148. P. 262–276.
- Barnes S.-J., Lightfoot P.C.* Formation of magmatic nickel-sulfide ore deposits and processes affecting their copper and platinum-group element contents // Eds. Hedenquist J.W., Thompson J.F.H., Goldfarb R.J. and Richards J.P. Economic Geology. 2005. 100th Anniversary Volume. P. 179–213.
- 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., Osborne G., Cook D., et al.* The Santa Rita nickel sulfide deposit in the Fazenda Mirabela Intrusion, Bahia, Brazil: geology, sulfide geochemistry and genesis // Economic Geology 2011. V. 106. P. 1083–1110.
- 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 Reviews. 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 // American Mineralogist. 2017. V. 102. P. 473–506.
- 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.
- Cawthorn R.G.* Contrasting sulphide contents of the Bushveld and Sudbury Igneous Complexes // Mineralium Deposita. 2005. V. 40. P. 1–12.
- 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 and Planetary Science Letters. 2009. V. 286. P. 14–22.

- Feldkamp L.A., Jesion G.* 3-D X-ray computed tomography // *Rev. Prog. Quant NDE*. 1986. V. 5A. P. 555–566.
- 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 // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2015. V. 160. P. 100–116.
- Godel B., Barnes S.-J., Maier W.D.* 3-D 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 // *Journal of Petrology*. 2006. V. 47. P. 1853–1872.
- Halmshaw R.* *Non-Destructive Testing*. London: Edward Arnold, 2nd edition, 1991. 323 p.
- 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 Reviews*. 2010. V. 54. № 1. P. 26–36.
- Keays R., Lightfoot P., Hamlyn P.* Sulfide saturation history of the Stillwater Complex, Montana: chemostratigraphic variation in platinum group elements // *Mineralium Deposita*. 2011. V. 47. P. 151–173.
- Kiseeva E.S., Wood B.J.* A simple model for chalcophile element partitioning between sulphide and silicate liquids with geochemical applications // *Earth and Planetary Science Letters*. 2013. V. 383. P. 68–81.
- Kiseeva E.S., Wood B.J.* The effects of composition and temperature on chalcophile and lithophile element partitioning into magmatic sulphides // *Earth and Planetary Science Letters*. 2015. V. 424. P. 280–294.
- Karykowski B.T., Maier W.D., Groshev N.Y., et al.* Critical controls on the formation of contact-style PGE-Ni-Cu mineralization: Evidence from the Paleoproterozoic Monchegorsk Complex, Kola Region, Russia // *Economic Geology*. 2018. V. 113. P. 911–935.
- Krivolutskaya N.A.* Siberian traps and Pt-Cu-Ni deposits in the Noril'sk Area. New York–Dordrecht–London: Springer Cham Heidelberg, 2016. 364 p.
- Li C., Ripley E. M.* Sulfur contents at sulfide-liquid or anhydrite saturation in silicate melts: empirical equations and example applications // *Economic Geology*. 2009. V. 104. P. 405–412.
- Maier W.D.* Platinum-group element (PGE) deposits and occurrences: Mineralization styles, genetic concepts, and exploration criteria // *Journal of African Earth Sciences*. 2005. V. 41. P. 165–191.
- McCuaig T.C., Beresford S., Hronsky J.* Translating the mineral systems approach into an effective exploration targeting system // *Ore Geology Reviews*. 2010. V. 38. P. 128–138.
- 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., Su Shanguo* Interfacial tension between magmatic sulfide and silicate liquids: constraints on kinetics of sulfide liquation and sulfide migration through silicate rocks // *Earth and Planetary Science Letters*. 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* // Ed. C. Li and E.M. Ripley. *Magmatic Ni-Cu and PGE deposits: geology, geochemistry and genesis: reviews in economic geology*. Denver: Society of Economic Geologists, 2011. V. 17. P. 1–50.
- Pearce M.A., Godel B.M., Fisher L.A., et al.* *Microscale data to macroscale processes: a review of microcharacterization applied to mineral systems* // Eds. Gessner K., Blenkinsop T.G., Sorjonen-Ward P. *Characterization of Ore-Forming Systems from Geological, Geochemical and Geophysical Studies*. Geological Society London. Special Publications. 2017. V. 453. <https://doi.org/10.1144/SP453.3>.
- Ripley E.M., Li C.* Sulfide saturation in mafic magmas: is external sulfur required for magmatic Ni-Cu-(PGE) ore genesis? // *Economic Geology*. 2013. V. 108. P. 45–58.
- 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 // *Journal of Petrology*. 2016. V. 56. P. 2445–2472.
- Rontgen W.* *Über eine neue Art von Strahlen (Concerning a new type of radiation)* // *Annual Review of Physical Chemistry*. New Series. 1989. V. 64. P. 1–37.

**X-RAY COMPUTED TOMOGRAPHY AS A METHOD
OF RECONSTRUCTION OF 3D-CHARACTERISTICS OF
DISSEMINATED SULFIDES AND SPINEL IN PLAGIODUNITES
FROM THE YOKO-DOVYREN INTRUSION**

D.V. Korost¹, A.A. Ariskin^{1,2,*}, I.V. Pshenitsyn^{1,2}, A.N. Khomyak¹

¹ *Lomonosov Moscow State University
119234, Moscow, Russia*

² *Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences
119991, Moscow, Russia*

**E-mail: ariskin@rambler.ru*

The paper describes a methodology of applying X-ray computed tomography (CT) in studying textural–morphological characteristics of sulfide-bearing ultramafic rocks from the Yoko-Dovyren layered massif in the northern Baikal area, Buryatia, Russia. The dunites are used to illustrate the applicability of a reliable technique for distinguishing between grains of sulfides and spinel. The technique enables obtaining statistical characteristics of the 3D distribution and size of the mineral phases. The method of 3D reconstructions is demonstrated to be applicable at very low concentrations of sulfides: no than 0.1–0.2 vol %. Differences between 3D models are determined for sulfide segregations of different size, in some instances with features of their orientation suggesting the direction of percolation and accumulation of the sulfide liquids. These data are consistent with the morphology of the largest sulfide segregations, whose concave parts adjoin the surface of the cumulus olivine and simultaneously grow into grains of the poikilitic plagioclase. Detailed information of these features is useful to identify fingerprints of infiltration and concentration of protosulfide liquids in highly crystallized cumulate systems.

Keywords: X-ray computed tomography, disseminated sulfides, spinel, intrusion, 3D distribution, infiltration of sulfide liquids

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5903274401-419>