УДК 553.8+553.07+622.03

Геолого-структурная характеристика массива глубоких горизонтов месторождения Трубка «Удачная»

Е.В.СЕРЕБРЯКОВ✉, А.С.ГЛАДКОВ

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Как цитировать эту статью: Серебряков Е.В. Геолого-структурная характеристика массива глубоких горизонтов месторождения Трубка «Удачная» / Е.В.Серебряков, А.С.Гладков // Записки Горного института. 2021. Т. 250. С. 512-525. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.4

Аннотация. Для скальных массивов, сложенных крепкими породами, структурная нарушенность является определяющим показателем устойчивости горнотехнических конструкций. Присутствие в массиве пересекающихся структурных элементов снижает прочность пород и приводит к формированию потенциальных структур обрушения. Помимо этого, дизъюнктивные деформации, пронизывающие толщи пород, представляют собой каналы миграции флюидов и соединяют водоносные горизонты в единую систему. Установлено, что наиболее крупные из них – разломы восток-северо-восточного, северо-восточного и северо-западного направлений – формируют кимберлитовмещающий узел трубки «Удачная». Указанные разломы представляют собой зоны повышенной трещиноватости, дробления, тектонического рассланцевания и отличаются от сопряженных участков повышенной деструкцией горного массива. Специфика распределения тектонических трещин в пределах структурно-литологических доменов определяется наличием разноориентированных преобладающих систем тектонической трещиноватости, а также различиями в их количественных показателях. Основные системы с некоторыми исключениями формируют диагональную сеть трещин (северо-восток – северо-запад), свойственную более крупным структурным формам – разломам. Несмотря на отличия в ориентировках падения систем, большая часть из них укладывается в выделенные направления, что характерно как для кимберлитов, так и для осадочных толщ. Общая нарушенность массива, выраженная через объем элементарного блока, наиболее высокая в пределах западного рудного тела. Фрикционные свойства трещинных структур имеют средние значения для подобного класса месторождений. Учет геолого-структурных данных при проектировании и разработке новых горизонтов месторождения позволит соблюсти необходимый баланс между эффективностью и безопасностью проводимых работ.

Ключевые слова: кимберлитовая трубка; модель разломно-блокового строения; трещиноватость; структурная нарушенность массива; устойчивость массива

Введение. Отработка запасов месторождений подземным способом сопряжена с многочисленными рисками возникновения осложнений, обусловленными инженерно-геологическими и гидрогеологическими особенностями строения массива, а также технологическими условиями ведения горных работ [15]. Основными негативными факторами, увеличивающими риск потенциальных осложнений, являются масштабная нарушенность массива трещинами, его обводненность, склонность пород к выветриванию, набуханию или выщелачиванию.

Инженерные свойства горного массива зависят от физико-механических свойств пород, а также от конфигурации, количественных и качественных характеристик трещинной сети [14, 25]. Для скальных массивов, сложенных крепкими породами, структурная нарушенность является определяющим показателем устойчивости горно-технических конструкций [2]. Присутствие в массиве пересекающихся структурных элементов снижает прочность пород и приводит к формированию потенциальных структур обрушения. Поэтому детальная характеристика геолого-структурного строения и оценка нарушенности массива структурными дефектами является важной задачей обеспечения безопасности персонала и оборудования, что имеет первостепенное значение на любой стадии функционирования рудника.

Для массива, вскрытого карьером «Удачный», подобные исследования были произведены ранее, их основные результаты отражены в источниках [6, 7, 8], а также нескольких специализированных тематических отчетах. Однако переход к подземной отработке месторождения требует существенного уточнения структурных данных, а прямая их интерполяция с верхних горизонтов не позволит корректно решить эту проблему. Несмотря на то, что карьерные и шахтные поля разрабатывались последовательно, и взаимовлияние их друг на друга минимально, отработка верхних горизонтов трубки глубоким карьером создала специфические условия в пределах массива, вскрываемого подземным рудником: изменение напряженно-деформированного состояния

(НДС), вызванного разгрузкой массива при выемке горной массы из карьера; изменение физико-механических свойств горных пород, связанное с вариациями НДС и опусканием зоны гипергенеза по мере углубления карьера; наличие аэродинамических связей между открытыми и подземными пространствами через соединительные горные выработки и скважины. Эти факторы оказывают влияние на общую структуру массива, а также его геомеханическое состояние и, соответственно, должны быть учтены при проведении геолого-структурных исследований.

Объект исследования. Кимберлитовая трубка «Удачная» располагается в зоне сочленения Анабарской антеклизы и Тунгусской синеклизы, характеризующихся широким распространением терригенно-карбонатных отложений нижнепалеозойского возраста. Основную часть разреза составляют пористо-кавернозные доломиты и известняки нижнего кембрия – верхнего ордовика, содержащие прослои известковистых алевролитов, мергелей, песчаников, реже конгломератов, гравелитов и карбонатных брекчий [13].

Магматические образования представлены кимберлитами щелочно-ультраосновной формации, слагающих пару сближенных обособленных диатрем: Удачная-Западная и Удачная-Восточная. Начиная с отметки 270 м и до поверхности указанные трубки образуют единое тело размером $895 \times (560-370)$ м. Ниже они разделены сильно деформированной перемычкой осадочных пород. С глубиной расстояние между диатремами заметно возрастает вследствие уменьшения поперечных размеров тел [1, 16].

Западное рудное тело (ЗРТ, Удачная-Западная) на верхних горизонтах имеет эллипсовидную форму, вытянутую в северо-западном направлении, которая на более глубоких горизонтах трансформируется в близизометричную. Размеры тела на уровне –580 м абс. составляют 245×195 м, а на горизонте –1080 м абс. сокращаются до 110×110 м [13, 16].

Восточное рудное тело (ВРТ, Удачная-Восточная) в горизонтальном сечении имеет эллипсовидную форму, слабо вытянутую в северо-восточном направлении, которую она сохраняет до глубоких горизонтов. Размеры диатремы составляют на горизонте –480 м абс. 280×245 м, а на горизонте –1080 м абс. 280×190 м [1, 16].

Диатремы сложены типичным для трубок Якутской алмазоносной провинции комплексом образований: порфировый кимберлит ранних генераций и автолитовая кимберлитовая брекчия заключительных стадий магматизма. В пределах тел присутствует большое количество крупных ксенолитов осадочных пород [1, 16].

Методология. Структурные данные являются ключевыми входными величинами для создания геолого-структурных моделей объектов, а также расчета геомеханических параметров породного массива. Сбор этих данных направлен на получение наиболее полной и всесторонней характеристики структурной нарушенности, под которой понимается совокупность тектонических элементов, распространенных в пределах изучаемого массива. К их числу относят разломы, системы трещин, случайные (рандомные, бессистемные) крупные трещины, плоскости напластования (слоистости). Для объектов, в пределах которых широко развиты пликативные процессы, к перечисленным элементам добавляются складки, будины, кливаж и некоторые другие структурные формы.

В процессе полевой документации (*in situ*) давалась количественная и качественная характеристика всех указанных элементов с обязательным определением показателей (рис. 1).

Рис. 1. Параметры, характеризующие трещиноватый массив горных пород [3, 31]

1 – прочность породы на поверхностях контакта трещины (критерий Бартона – Бэндиша); 2 – степень выветривания; 3 – протяженность; 4 – расстояние между трещинами (интервал); 5 – системы трещин ($J_1, J_2, \dots, J_n$ – первая, вторая, ..., n системы трещин); 6 – ориентация трещины в пространстве (β – угол падения, град.; ψ – азимут падения, град.); 7 – характер поверхности (ровная / волнистая / бугристая, гладкая / шероховатая и др.); 8 – тип горной породы; 9 – ширина раскрытия трещины; 10 – уровень высачивания подземных вод; 11 – элементарный блок (форма, размер); 12 – группы разрывов со смещением (сдвигов) и без смещения; 13 – наличие и материал заполнителя

Также определялись числовые показатели, характеризующие нарушенность массива: частота встречаемости трещин в площадном (количество трещин на квадратный метр) и линейном (количество трещин на погонный метр) вариантах, RQD (показатель качества горной породы). Приведенные характеристики являются важными составными компонентами рейтинговых классификаций горного массива RMR и Q [24, 28].

Характеристика структурной нарушенности массива давалась в точках геолого-структурных наблюдений, расположенных в пределах пройденных, незатаркетированных (на момент проведения исследований) выработках на эксплуатационных горизонтах –365, –380, –398, –425, –445, –465, –480 и –580 м абс. Средние расстояния между пунктами наблюдений в горизонтальной проекции составили 50-200 м, и в вертикальной 10-100 м (в зависимости от расстояний между горизонтами). На участках со сложным геологическим строением (приконтактные зоны, области динамического влияния разрывных нарушений, области интенсивной трещиноватости и др.) расстояния между точками наблюдения сокращались до 10-20 м.

Породный массив месторождения был разбит на ряд доменов (однородных единиц), различающихся особенностями структурного строения и степенью деструкции. Выделены два крупных литологических домена первого порядка – вмещающие терригенно-карбонатные отложения, а также собственно кимберлитовые тела диатрем. Указанные единицы отличаются физико-механическими параметрами, особенностями геологического строения, историей формирования и, соответственно, должны рассматриваться обособленно. В отдельный домен также было выделено межтрубье как область, сформированная в специфических тектоно-магматических условиях. Согласно широко распространенной фреатомагматической модели [21, 26, 27], внедрение кимберлита сопровождается серией взрывов, спровоцированных взаимодействием раскаленной магмы с холодными грунтовыми водами по мере ее подъема. Фреатомагматические взрывы весьма высокоэнергетичны и посредством сверхзвуковых ударных волн оказывают термодинамическое воздействие на вмещающие отложения, что приводит к их фрагментации. Учитывая наличие в строении трубки «Удачная» пары сближенных диатрем, а также нескольких этапов кимберлитового магматизма [10], массив межтрубья вследствие такого воздействия будет отличаться по структурному строению и общей деструкции от соседних областей.

Полученные полевые данные составили основу базы данных разномасштабных структурных элементов, развитых в массиве на участке локализации трубки. Камеральный анализ и интерпретация полученного материала осуществлялись с использованием современных программ статистической и математической обработки и визуализации данных: Dips, Unwedge, Leapfrog, AutoCAD, STRUCTURE (оригинальная разработка лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН).

Результаты геомеханических исследований. *Разломы.* Наиболее крупными структурными формами, зафиксированными в границах месторождения, являются разломы. В пределах платформенных областей, обладающих низкой тектонической активностью, они обычно не имеют единого магистрального сместителя, а представляют собой области интенсивной механической и структурной деформации, в пределах которых развиты серии дизъюнктивов второго порядка: зон повышенной трещиноватости (ЗПТ), дробления (ЗД) и тектонического расщепления (ЗТР) [4, 19]. Подобные зоны широко проявлены в горном массиве месторождения, в большинстве своем в пределах областей экзо-эндоконтакта, а также в межтрубье (рис.2).

Всего в пределах рудника «Удачный» на разных горизонтах было зафиксировано 398 выходов разломных зон, определяющих блоковую делимость массива в крупном масштабе. Общая полярная диаграмма по разломным зонам приведена на рис.3, а.

Анализ диаграммы показывает, что в массиве преимущественно развиты крутопадающие (субвертикальные) разрывы с углами падения, превышающими 60° . Они включают 307 замеров, что составляет 77 % от общего количества разломных зон. Диаграмма, построенная по крутопадающим разломным зонам (рис.3, б), позволяет выделить четыре преобладающих направления развития субвертикальных разломов, три из которых ориентированы в северо-восточных румбах (азимуты простирания $20-30^\circ$, $50-60^\circ$, $80-90^\circ$) и одно в северо-западных (азимут простирания $300-310^\circ$). Наклонные зоны включают 77 замеров (19 % от общего количества зафиксированных разломных зон) и формируют на полярной диаграмме конус трещиноватости, в котором выделяется три максимума интенсивности с координатами $35\angle 50^\circ$, $116\angle 47^\circ$, $233\angle 47^\circ$ (рис.3, в). Субгоризонтальные (пологие) разрывные

Рис.2. Выходы разломных зон в бортах горных выработок: *а* – ЗТР мощностью 2 м в кольцевом штреке ЗРТ на горизонте –320 м абс.; *б* – ЗПТ мощностью 1,2 м в кольцевом штреке ЗРТ на горизонте –320 м абс.; *в* – ЗПТ мощностью 2,5 м в погрузочном заезде на горизонте –365 м абс.

Рис.3. Полярные диаграммы разломных зон рудника «Удачный»: *а* – общая; *б* – для крутопадающих; *в* – для наклонных; *г* – для пологих разломов

нарушения в пределах рудника пользуются меньшей распространенностью, чем субвертикальные и наклонные (рис.3, *г*). Они, как правило, приурочены к толщам пластичных пород (глинистые известняки, мергели), которые в виде небольших по мощности прослоев развиты в основной массе плотных карбонатных отложений.

Построение структурной модели, содержащей информацию о наиболее крупных разрывных структурах, заключалось в прослеживании разломов по выходам в горных выработках на разных

Рис.4. Модель разломно-блокового строения участка локализации трубки «Удачная»: а – вид сверху; б – вид сбоку
1-10 – разломы

участках месторождения с установлением их пространственного положения. Для этого была построена схема, на которой каждый задокументированный выход разломной зоны был визуализирован в виде трехмерного диска, ориентировка которого указывает на простираение, а наклон – на падение разломной зоны. Объектами картирования и прослеживания были осевые плоскости разломов. Под осевой понимается воображаемая плоскость, проходящая через центр разломной зоны. Прямым признаком для проведения плоскости разлома служило выстраивание зафиксированных выходов нарушений одного направления вдоль одной линии на плане или на разрезе. Дополнительными признаками, свидетельствующими о близости разломной зоны (в случаях отсутствия прямых наблюдений выходов разрывных нарушений), являлись существенно более высокая густота одной из систем трещин (по сравнению с другими) в точке наблюдения и наличие интенсивного максимума, соответствующего элементам залегания трассируемой структуры. В качестве опорных использовались выходы, в которых зафиксированы наиболее мощные по ширине разломные зоны. В результате получена следующая модель разломно-блокового строения участка локализации трубки «Удачная» (рис.4).

Анализ полученной модели показал, что общую блоковую делимость массива определяют 11 крупных субвертикальных разломных зон шириной до нескольких десятков – первых сотен метров. Представленные разломы прослежены по выходам в бортах выработок на расстояния более чем 500 м по латерали и более чем на 100 м на глубину, пересекая при этом границы литологических разнородностей. Преобладают три направления развития нарушений: восток-северо-восточное (разломы 1-4), северо-восточное (разломы 5-9) и северо-западное (разломы 10, 11), к узловому сочленению которых приурочена трубка «Удачная». Локализация трубки в разломном узле, создающем область повышенной деструкции земной коры, характерна и для других месторождений Якутской алмазонасной провинции [12, 18, 19].

Формирование и активизация разломной кимберлитоконтролирующей структуры трубки «Удачная» происходило в несколько этапов, отличающихся главенствующим полем тектонических напряжений. На первом этапе была активизирована мощная зона разрывов восток-северо-восточной ориентировки (разломы 1-4), контролирующая серию дотрубочных кимберлитовых жил и сателлитных тел порфирирового кимберлита [8, 10]. Второй этап ознаменовался внедрением основного объема кимберлита трубок в сегментах разрывов восток-северо-восточной ориентировки, сопряженных с нарушениями северо-западного простирания (разломы 10, 11). Об активизации разрывов восток-северо-восточного направления свидетельствует наличие крупного апофиза на юго-востоке ЗРТ, который приурочен к осевой плоскости разлома 4. На продолжении этого разлома на юго-восточном фланге ВРТ наблюдается область резкого изменения контуров рудного тела с формированием s-образного изгиба в плане. Различия в морфологии рудных тел на участках контакта с рудовмещающим разломом 4 могут объясняться тем, что внедрение кимберлитовых тел происходило не одномоментно, а в результате как минимум двух этапов, причем ВРТ внедрялось несколько раньше, чем ЗРТ. Согласно U-Pb-датирования перовскитов из кимберлитов, возраст формирования восточной диатремы 367 ± 3 и 367 ± 5 млн лет, а западной диатремы 361 ± 4 и 353 ± 5 млн лет [20]. Наконец, на третьем этапе на фоне смены действующего поля напряжений были активизированы сегменты северо-западных разломов, что привело к внедрению позднепалеозойские-раннемезозойские дайки долеритов и жилы калиевого трахита мелового возраста [10].

Таким образом, разрывная структура месторождения, отраженная в модели разломно-блокового строения (рис.4), существовала до этапа внедрения рудных тел. В период среднепалеозойской тектоно-магматической активизации, пик которой пришелся на фаменский ярус верхнего девона, отдельные сегменты разрывов формировали области локального растяжения, которые заполнялись кимберлитовым материалом. Поскольку указанные в модели направления разломов фиксируются в пределах рудных тел в их современном положении, это свидетельствует о более молодых этапах активизации разломной структуры, с подновлением старых и формированием новых парагенезисов разрывов [6, 7]. На многих из них, преимущественно в пределах экзо-эндоконтактной зоны, наблюдается большое количество следов разнонаправленных перемещений – зеркал и борозд скольжения. Кинематика перемещений отвечает преимущественно сбросам, реже – сбрососдвигам. Максимальные амплитуды смещений, зафиксированные в пределах подземных горных выработок, пройденных в междутрубье, составляют 1,5 м, при этом, по данным бурения скважин, массив междутрубья имеет клавишное грабенообразное строение с максимальной сбросовой амплитудой смещения по разломам около 140 м [7].

Несмотря на достаточно густую сеть точек геолого-структурных наблюдений, нарушения второго порядка, которые определяют внутреннее строение крупных разломных зон, зачастую удается проследить лишь на первые десятки метров. Небольшая их протяженность, а также возможные взаимные смещения затрудняют увязку между собой разрывов с разных гипсометрических уровней, что на данном уровне знаний не позволяет разработать единую модель второстепенных разломных зон. Поэтому для каждого эксплуатируемого горизонта составлены трехмерные схемы второстепенных разломов, где нарушения также представлены осевыми плоскостями (рис.5).

Протяженность второстепенных разрывов в большинстве случаев ограничена более крупными разломами, входящими в модель разломно-блокового строения, либо границами литологических доменов. Они осложняют общее тектоническое строение месторождения и формируют блочную делимость массива на более низком масштабном уровне. Безусловно, общее количество зафиксированных на том или ином горизонте нарушений зависит во многом от объема горных

Рис.5. Погоризонтные планы положения главных (серый) и второстепенных (красный цвет) разломов

работ и количества пройденных выработок, доступных для наблюдения. Однако даже существующий объем информации позволяет сделать вывод о том, что для областей развития осадочных отложений характерна более высокая упорядоченность и выдержанность направлений преобладающих разрывов. Так на горизонтах –380, –425 м абс. фиксируются несколько зон разрывов, объединяющих серии сонаправленных сближенных разломов. Подобная упорядоченность не характерна для внутрирудных областей кимберлитовых тел, где пространственное распределение второстепенных нарушений можно охарактеризовать как хаотичное.

Тектоническая трещиноватость. Горный скальный массив в идеализированном виде представляет собой дискретный материал, состоящий из блоков горных пород, отделенных друг от друга структурными дефектами, т.е. естественными дефектами, имеющими нулевой или низкий предел прочности на разрыв [17]. К их числу относятся разломы, системы трещин, плоскости расланцевания, зоны выветрелых или измененных пород и др. Размеры и форма блоков зависят от пространственных ориентировок, количества и масштабных характеристик (размеров) структурных дефектов. В границах крупных блоков за фрагментацию массива отвечают структуры низких рангов – трещины и их системы, а также элементы слоистости.

Рис.6. Полярные диаграммы трещиноватости для выделенных структурно-литологических доменов: *а* – западное рудное тело; *б* – восточное рудное тело; *в* – межтрубье; *з* – вмещающие отложения

Для каждого выделенного структурно-литологического домена построена полярная диаграмма, показывающая ориентировку тектонической трещиноватости, распространенной в его границах (рис.6).

Анализ диаграмм показывает, что пространственная ориентировка и интенсивность трещиноватости в пределах каждого домена имеет существенные отличия, подтверждая тем самым правильность их выделения как обособленных по структурному строению участков массива. Максимальные различия наблюдаются при сравнении диаграмм по кимберлитам (рис.6, *а*, *б*) и осадочным отложениям (рис.6, *в*, *з*). Для структурных диаграмм по кимберлитам характерно наличие многочисленных рассеянных максимумов плотности трещин различной интенсивности, что свидетельствует о присутствии в массиве большого количества разноориентированных дизъюнктивов, фрагментирующих массив на многогранные блоки (рис.6). Обусловлено это тем, что по своему структурному строению кимберлиты являются комбинированными массивами, в которых в разных пропорциях содержатся слоистые и неслоистые компоненты [9]. Таким массивам присуща полигенная трещиноватость, сформированная трещинами разного генезиса. В первую очередь это радиально-кольцевая (коническая) трещиноватость, характерная для интрузивов центрального типа. На представленных диаграммах (рис.6, *а*, *б*) радиальные трещины выражены серией субвертикальных максимумов по периферии диаграммы. Конические трещины образуют конус изолиний плотности, сформированный наклонными дизъюнктивами. Помимо этого, в пределах рудных тел на последующих этапах тектонической активизации формируются вторичные парагенезы тектонических трещин.

Для осадочных отложений характерно более концентрированное распределение трещин преимущественно по периферии большого круга диаграммы, что говорит о преобладании в массиве субвертикальных разрывов. Также на каждой диаграмме наблюдается максимум в центральной части, отвечающий пологим, субгоризонтальным трещинам (диастромам), развитым по поверхностям напластования вдоль стратиграфических границ пород с разными реологическими свойствами [6, 8]. Подобная комбинация трещин является естественной отдельностью для слоистых стратифицированных массивов.

Путем выделения наиболее интенсивных максимумов трещиноватости на диаграммах определены основные системы трещин, формирующие блочность массива в мелком масштабе. Данные

ориентировок систем трещин в областях выделенных структурно-литологических доменов сведены в табл.1.

Таблица 1

Ориентировки систем трещин, выделенных в границах структурно-литологических доменов рудника «Удачный»

Домен	Азимут падения/угол падения основных систем трещин			
ЗРТ	192 $\angle$ 80°	108 $\angle$ 63°	24 $\angle$ 51°	253 $\angle$ 82°
ВРТ	135 $\angle$ 80°	87 $\angle$ 72°	33 $\angle$ 78°	313 $\angle$ 76°
Межглубье	347 $\angle$ 87°	79 $\angle$ 2°	49 $\angle$ 82°	
Вмещающие	143 $\angle$ 87°	246 $\angle$ 1°	210 $\angle$ 87°	115 $\angle$ 88°

Основные системы с некоторыми исключениями формируют диагональную сеть трещин (северо-восток – северо-запад), что характерно и для более крупных структурных форм – разломов (см. рис.4). Несмотря на отличия в ориентировках падения систем, большая часть из них укладывается в выделенные направления, что характерно как для кимберлитов, так и для осадочных толщ.

Для визуализации количественных показателей структурной нарушенности построена трехмерная блочная модель распределения параметра частоты трещин в площадном варианте N , который показывает общую деструкцию породного массива тектоническими трещинами (рис.7).

Радиус сферы поиска при моделировании был принят равным 40 м, что позволило учесть средние расстояния между точками наблюдений, а также избежать неограниченной экстраполяции на участках, где расстояния между точками превышают радиус поиска. По вертикали модель ограничена отметками –290 и –600 м абс., по латерали – контурами горных выработок на горизонтах –320, –365, –465 м абс. В указанном объеме расположено максимальное количество точек наблюдения, используемых при моделировании. Модель построена с использованием структурного тренда, который определен исходя из направлений развития главных разломов, включенных в модель разломно-блокового строения (см. рис.4). Для пространственной интерполяции использован алгоритм, основанный на радиально-базисной функции [30, 22].

Значения параметра N (количество трещин на 1 м²) для исследуемого массива колеблются в пределах 4-20 тр./м². Далее значения, превышающие 15 тр./м², исключены из выборки как ураганные. Они характерны для зон интенсивного тектонического расщепления, зафиксированных в единичных точках наблюдения. Оставшиеся значения разделены на три условных интервала: 4-7 тр./м² – с низкой, 7-12 тр./м² – со средней, 12-15 тр./м² – с высокой частотой трещин.

Общая, достаточно неоднородная, картина распределения показателя N характеризуется наличием локальных очагов повышенных значений, имеющих линейную пространственную ориентировку. Данные максимумы подчеркивают положение некоторых из главных разрывных структур. Наиболее контрастно проявлен интенсивный максимум восток-северо-восточной ориентировки на юго-восточном фланге западного рудного тела, фиксирующий положение разломов 4, 8 и 9 (рис.7). По его осевой линии прослеживается крупный апофиз ЗРТ, имеющий аналогичное с разломом 4 простирание, что позволяет предположить контроль положения данного апофиза выделенным разрывным нарушением. Остальные разломы в поле распределения показателя частоты трещин выделяются не так отчетливо. Наблюдаются участки, где повышенные значения N располагаются в пространстве между несколькими сближенными разрывами, как, например, на юго-западном фланге ЗРТ. Здесь выделяется блок, сформированный разломами 2, 3 и 5, в пределах которого общая нарушенность массива трещинами заметно выше, чем в сопредельных областях. Учитывая, что каждый разлом характеризуется областью динамического влияния, т.е. областью интенсивной механической и структурной деформации, на участках сближения разломов происходит наложение этих зон, которое приводит к увеличению общей нарушенности массива трещинами. Аналогичная картина наблюдается на участках взаимного пересечения разломов, что имеет место в центральной части ВРТ, где сформирован максимум в узловом пересечении разломов 6, 3, 9 и 11, а также для юго-восточного фланга ВРТ, в пределах которого максимум частоты трещин приурочен к узлу разломов 4, 7 и 11.

Рис. 7. Блочная модель распределения показателя N в околотрубном пространстве: a – горизонтальный срез модели по горизонту -320 м абс.; b – фрагменты модели со значениями N выше 12 тр./м², вид сверху; c – вид с юго-запада

Положение некоторых аномалий не позволяет связать их с разломными структурами. В большинстве они приурочены к областями экзо- и эндоконтакта. Высокие значения частоты тектонической трещиноватости в приконтактной зоне являются результатом тектоно-магматических процессов, сопровождающих внедрение трубки, а также последующих этапов ее структурной перестройки. На этих участках широко развиты зоны повышенной трещиноватости, а также крупные единичные трещины с открытыми полостями (зияние до нескольких сантиметров), по которым происходит дренаж рассолов, вследствие чего формируются достаточно крупные пустоты выщелачивания. Максимальные значения параметр N имеет на участках высоких градиентов изменения морфологии рудных тел. Это юго-восточная часть западного рудного тела, где наблюдается крупный апофиз восток-северо-восточной ориентировки, а также юго-восточная часть восточного рудного тела, в пределах которой фиксируется резкое изменение контуров рудного тела с формированием s-образного изгиба в плане (рис.7, б). Участок изгиба контура находится на продолжении разлома 4, по которому простирается апофиз ЗРТ, что может указывать на единство их происхождения.

Обсуждение. Инженерно-геологические свойства скального горного массива зачастую намного больше зависят от системы тектонических элементов внутри горной массы, чем от физико-механических свойств самой породы, а знание количественных показателей трещиноватости часто более важно, чем знание типов, участвующих в массиве пород. «Несмотря на то, что само по себе вещество горной породы может быть прочным или массивным, или и то, и другое, система трещин создает значительную ослабленность и жидкостную проводимость» [23]. Как показывают полученные геолого-структурные данные, массив месторождения в достаточной степени нарушен разномасштабными тектоническими элементами. Наиболее крупные из них – разломы, разбивают массив на серию блоков, различной конфигурации и размеров. Учитывая преобладающую роль разрывных нарушений диагонального направления (северо-восток – северо-запад) блоки, вычлняемые ими, зачастую имеют форму параллелепипеда, реже ромба или трапеции. Зоны влияния разломов представляют собой аномальные по прочностным и деформационным характеристикам области. Их наличие приводит к увеличению общей проницаемости пород, что влечет за собой повышенный приток подземных вод, которые на месторождении представлены Среднекембрийским водоносным комплексом с крепкими и весьма крепкими кислыми рассолами, содержащими потенциально взрывоопасные гомологи метана [5, 16]. Результирующими взаимодействиями мигрирующих подземных флюидов и дренирующей структуры, представленной совокупностью разломов, систем трещин и единичных трещин, являются пустоты выщелачивания. Они в большинстве своем располагаются в зонах влияния разломов как в кимберлитах, так и в доломитах, а также по периферии рудных тел. С позиции геомеханического состояния массива данные структуры не являются критическими для его устойчивости, однако они могут являться накопителями флюидов, в том числе газонасыщенных.

Менее масштабные структурные формы – трещины и системы трещин – формируют элементарную блочность массива, отвечающего за его фрагментацию и устойчивость. Размер элементарного блока – один из главных входных параметров при расчете среднего размера отбитой горной массы. При взрыве массив преимущественно фрагментируется на естественные блоки, ограниченные имеющимися трещинами. Многочисленными исследованиями установлено, что «...чем интенсивнее трещиноватость пород и, соответственно, меньше размер элементарного блока, тем лучше они дробятся взрывом, и тем реже должна быть сетка взрывных скважин и меньше удельный расход взрывчатых веществ для получения требуемой кусковатости горной массы» [9]. Поэтому оценка данного параметра и определение особенностей его изменчивости в объеме породного массива является важной составляющей проектирования рациональных параметров буровзрывных работ при массовых взрывах. По усредненным значениям существенно большими размерами элементарных блоков обладает западное рудное тело (табл.2).

Согласно существующей классификации, блоки ЗРТ относятся к большим по объему [29]. Для остальных доменов получены приблизительно одинаковые значения объемов блоков, колеблющиеся в пределах $0,07-0,11 \text{ м}^3$, что по классификации относится к средним блокам.

Таблица 2

Усредненные значения количественных показателей трещиноватости по доменам

Домен	Количество замеров	Процент от общего числа замеров	Среднее расстояние между трещинами в массиве, м	Объем элементарного блока, м ³	Объемная частота трещин, тр./м ³
Вмещающие	100	50,76	0,1177	0,107863	12,3125
ВРТ	24	12,18	0,120833	0,069253	11,54708
ЗРТ	44	22,34	0,190909	0,352318	9,120455
Межтрубье	29	14,72	0,127586	0,084834	11,11966

Несмотря на существенные отличия в объемах блоков для кимберлитов, в пределах западного и восточного рудных тел наблюдается неравномерная фрагментация массива на элементарные блоки. Имеются участки, где развиты системы трещин с низкой густотой либо единичные крупные трещины, которые разбивают массив кимберлита на крупные блоки (до 2-3 м в поперечнике). При этом сами блоки, вычленяемые трещинами, являются относительно монолитными, т.е. слабонарушенными более мелкой скрытой тектонической трещиноватостью. Для таких участков характерны высокие показатели RQD, достигающие 90-95 %. Подобные области слабой нарушенности массива трещинами являются основным источником негабаритов при стандартных параметрах буровзрывных работ.

С позиции геомеханического состояния массивы, имеющие высокие средние размеры элементарных блоков при прочих равных (сопротивление сдвигу по трещине, шероховатость, волнистость, выдержанность, заполненность минеральным заполнителем), обладают большей устойчивостью, чем массивы, состоящие из небольших блоков. Следует отметить, что данное утверждение справедливо только в том случае, когда размер элементарного блока меньше размера выработки, что обуславливает возможность обрушения. В целом, фрикционные свойства трещинных структур имеют средние значения для подобного класса месторождений. В кимберлитах преобладают трещины умеренно волнистые с гладкой и слегка шероховатой поверхностью. Для трещин, распространенных во вмещающих отложениях, характерны более прямолинейные и гладкие поверхности, что вызвано широким развитием субгоризонтальных диастром. Несмотря на то, что кимберлиты являются быстро выветривающимися породами [11], стенки трещин имеют свежую, реже легкую степень выветрелости, что соответствует общей выветрелости массива внутри породных блоков.

Наиболее крупные плоскости трещин расположены по периферии рудных тел, непосредственно по контакту кимберлита и вмещающих отложений. Учитывая субвертикальный характер контакта и минимальные значения прочности на сдвиг для зеркал скольжения, данные участки массива имеют пониженную устойчивость.

Большинство системных трещин, как в кимберлите, так и во вмещающих отложениях относятся к числу закрытых с зиянием до первых миллиметров. Для единичных случайных крупных трещин ширина раскрытия может составлять несколько сантиметров. Они, как правило, развиты в межтрубье, где по ним наблюдается обильный водопиток в виде излива или интенсивного каплепа. В качестве минерального заполнителя части трещин в кимберлите выступают продукты вторичной минерализации – кальцит, барит, кварц в ассоциации с сульфидами – пиритом, марказитом. Мощность заполнителя не превышает первые сантиметры, что не ограничивает каких-либо движений по трещине и не оказывает существенного влияния на общую устойчивость массива.

К числу негативных факторов, снижающих фрикционные свойства трещинных структур, помимо перечисленных, следует отнести нефте- и битумопроявления, широко развитые в массиве месторождения и главным образом сконцентрированные в пределах вмещающих пород. Наличие участков обильного проявления углеводородов негативно влияет на состояние горного массива. Обладая высокими смазочными свойствами нефть и битум существенно уменьшают сцепление (сопротивление сдвигу) структурных блоков, что может увеличить потенциал их обрушаемости.

Заключение. Таким образом, проведенные исследования были направлены на количественную и качественную характеристику разномасштабных структурных элементов, развитых в породном и рудном массиве месторождения. Установлено, что наиболее крупные элементы – разломы – формируют

кимберлитовмещающий узел, состоящий из дизъюнктивов трех направлений развития: восток-северо-восточное, северо-восточное и северо-западное. Разломы не имеют единых сместителей, а представляют собой области повышенной трещиноватости, дробления, тектонического расслаивания и выделяются на фоне остальных участков горного массива существенно увеличенной деструкцией субстрата. В пределах четырех структурно-литологических доменов определены преобладающие системы тектонических трещин. Подсчитаны основные количественные показатели структурной нарушенности массива. Построена трехмерная модель распределения параметра N , который показывает общую деструкцию породного массива тектоническими трещинами. Совокупное использование полученных геолого-структурных характеристик с геологическими, гидрогеологическими и горно-техническими данными позволит вести отработку месторождения с соблюдением баланса между эффективностью и безопасностью проводимых работ. Безусловно, этих данных может быть недостаточно для уверенного прогнозирования структурной нарушенности и геомеханического состояния массива на более глубокие горизонты рудника. Для решения этой задачи необходимо продолжать изучение трещиноватости/нарушенности по мере углубления рудника с привлечением большего количества информации, полученной опережающими методами.

Авторы выражают глубокую признательность главному геологу Удачинского ГОКа Г.П.Шмарову, заместителю главного геолога по подземному руднику Д.И.Тамарадзе, а также участковым геологам подземного рудника за помощь в проведении исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Атлас коренных месторождений алмазов Якутской кимберлитовой провинции / С.И.Костровицкий, З.В.Специус, Д.А.Яковлев и др. Мирный: АЛРОСА, 2015. 480 с.
2. Борщ-Компониц В.И. Практическая механика горных пород. М.: Горная книга, 2013. 322 с.
3. Бушков В.К. Применительная практика кинематического анализа устойчивости при обосновании параметров основных конструктивных элементов борта карьера // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 10. С. 30-42. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-10-0-30-42
4. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Прикладной аспект / К.Ж.Семинский, А.С.Гладков, О.В.Лунина, М.А.Тугарина. Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения РАН, Филиал «Гео», 2005. 291 с.
5. Дроздов А.В. Горно-геологические и технологические проблемы при строительстве подземного рудника «Удачный» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 2. С. 125-131.
6. Дроздов А.В. Горно-геологические особенности глубоких горизонтов трубки Удачной // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 3. С. 153-165.
7. Дроздов А.В. Особенности строения многофазных кимберлитовых трубок (на примере трубки Удачной) / А.В.Дроздов, А.И.Мельников // Маркшейдерия и недропользование. 2009. № 1. С. 31-38.
8. Дроздов А.В. Оценка структурно-тектонической обстановки на трубке «Удачная» для отработки глубоких горизонтов месторождения / А.В.Дроздов, А.И.Мельников, И.Б.Бокий // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2014. Т. 1. № 1. С. 91-97.
9. Дунаев В.А. Геологические факторы, влияющие на взрываемость горных пород при открытой разработке полезных ископаемых / В.А.Дунаев, В.А.Ермолов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 1999. № 1. С. 11-16.
10. Егоров К.Н. Структурно-вещественная эволюция системы кимберлитовых тел трубки Удачная / К.Н.Егоров, А.И.Мельников // Руды и металлы. 2013. № 1. С. 53-59.
11. Захаров Е.В. Снижение энергии разрушения горных пород под влиянием морозного выветривания // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. № 4. С. 157-165.
12. Картирование скрытых сдвиговых кимберлитоконтролирующих структур в Накынском поле / П.А.Игнатов, К.Ю.Бушков, А.В.Толстов, Ю.Т.Яныгин // Проблемы прогнозирования и поисков месторождений алмазов на закрытых территориях, 18-20 марта, 2008, Мирный, Россия. Якутск: Изд-во Якутского научного центра СО РАН, 2008. С. 325-331.
13. Колганов В.Ф. Горно-геологические особенности коренных месторождений алмазов Якутии / В.Ф.Колганов, А.Н.Акишев. Мирный: Мирнинская городская типография, 2013. 568 с.
14. Латышев О.Г. Влияние нарушенности горных пород на их свойства и состояние / О.Г.Латышев, О.О.Казак // Известия Уральского государственного горного университета. 2017. Вып. 4 (48). С. 62-65. DOI: 10.21440/2307-2091-2017-4-62-65
15. Особенности отработки коренных месторождений алмазов в сложных горно-геологических условиях восточного сектора Арктики / Е.В.Скляр, С.В.Алексеев, К.Н.Егоров и др. // Фундаментальные исследования Президиума РАН. 2015. URL: <http://www.ras.ru/FStorage/FileInfo.aspx?catalogId=bc1f245b-9bf7-419c-b15c-292b9c4bf031&id=42ea960d-52f1-4259-886a-eda0e6bcac6e> (дата обращения 21.01.2021).
16. Рассолы глубоких горизонтов кимберлитовой трубки Удачная / С.В.Алексеев, Л.П.Алексеева, А.С.Гладков и др. // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 4. С. 1235-1253. DOI: 10.5800/GT-2018-9-4-0393
17. Руководство по проектированию бортов карьера / Под ред. Д.Рида, П.Стейси. Екатеринбург: Правовед: Полиметалл, 2015. 527 с.

18. *Серебряков Е.В.* Трехмерные структурно-вещественные модели формирования кимберлитовых трубок Нюрбинской и Ботуобинской (Якутская алмазоносная провинция) / Е.В.Серебряков, А.С.Гладков, Д.А.Кошкарев // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10. № 4. С. 899-920. DOI: 10.5800/GT-2019-10-4-0448
19. Тектонофизические исследования при алмазопоисковых работах / А.С.Гладков, С.А.Борняков, А.В.Манаков, В.А.Матросов. М.: Научный мир, 2008. 175 с.
20. U-Pb возраст рутила из ксенолита эколита кимберлитовой трубки Удачная / А.Л.Рагозин, Д.А.Зедгенизов, В.С.Шацкий и др. // Доклады Академии наук. 2014. Т. 457. № 2. С. 213-216. DOI: 10.7868/S0869565214200249
21. A Phreatomagmatic Kimberlite: The A418 Kimberlite Pipe, Northwest Territories, Canada / L.A.Porritt, J.K.Russell, H.McLean et al. // Proceedings of 10th International Kimberlite Conference. New Delhi, Springer, 2013. Vol. 2. P. 97-108. DOI: 10.1007/978-81-322-1173-0_7
22. Comparing Leapfrog Radial Basis Function and Kriging. Seequent. May 19, 2000. URL: <https://www.seequent.com/comparing-leapfrog-radial-basis-function-and-kriging> (дата обращения 21.01.2021).
23. *Goodman R.E.* Engineering geology. Rock in engineering construction. John Wiley & Sons. New York, 1993. 432 p.
24. *Hoek E.* The Hoek-Brown failure criterion and GSI – 2018 edition / E.Hoek, E.T.Brown // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2018. Vol. 11. Iss. 3. P. 445-463. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.08.001
25. *Jakubec J.* Role of defects in rock mass classification // Proceedings of the Seventh International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction, 13-15 May, 2013, Perth, Australia. Australian Centre for Geomechanics, 2013. P. 337-344. DOI: 10.36487/ACG_rep/1304_21_Jakubec
26. *Kurszlaukis S.* Formation of «Tuffisitic Kimberlites» by phreatomagmatic processes / S.Kurszlaukis, V.Lorenz // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2008. Vol. 174. Iss. 1-3. P. 68-80. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2007.12.047
27. *Lorenz V.* Root zone processes in the phreatomagmatic pipe emplacement model and consequences for the evolution of maar-diatreme volcanoes / V.Lorenz, S.Kurszlaukis // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2007. Vol. 159. Iss. 1-3. P. 4-32. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2006.06.019
28. *Palmstrom A.* Combining the RMR, Q, and RMI classification systems // Tunnelling and Underground Space Technology. 2009. Vol. 24. Iss. 4. P. 491-492. DOI: 10.1016/j.tust.2008.12.002
29. *Palmstrom A.* Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD) // Tunnelling and Underground Space Technology. 2005. Vol. 20. Iss. 4. P. 362-377. DOI: 10.1016/j.tust.2005.01.005
30. 3-D geological modelling using new Leapfrog Geothermal software / S.Alcaraz, R.Lane, K.Spragg et al. // Proceedings Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering 31 January – 2 February, 2011, Stanford, California, USA. Stanford University, 2011. Vol. 31. P. 1-6.
31. *Wyllie D.C.* Foundations on Rock: 2nd edition. London, Taylor and Francis, 1999. 401 p.

Авторы: **Е.В.Серебряков**, канд. геол.-минерал. наук, младший научный сотрудник, serebryakov.e.v@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7280-7784> (Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия), **А.С.Гладков**, канд. геол.-минерал. наук, заведующий лабораторией, gladkov@crust.irk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7744-8979> (Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 19.01.2021.

Статья принята к публикации 27.07.2021.