

УДК 553.075

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗОЛОТОНОСНЫХ ПРОЖИЛКОВ В ШТОКВЕРКАХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДРАЖНОЕ (ВОСТОЧНАЯ ЯКУТИЯ)

Дмитрий Васильевич Сивков^{1,2✉}, Андрей Федорович Читалин²

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; sivkovdmitrij@yandex.ru[✉]

² ООО «Институт геотехнологий», Москва, Россия; a.chitalin@igeotech.ru

Аннотация. Приведены результаты геолого-структурного анализа, а также выявления закономерностей распределения, пространственной ориентировки и возрастных взаимоотношений золотоносных кварц-сульфидных прожилков в пределах кварцевых штокверков центральной части месторождения Дражное (Тарынское золоторудное поле). В качестве исходных данных использованы результаты прямых наблюдений в обнажениях и ориентированном керне разведочных скважин. По результатам анализа выделены системы кварцевых жил и прожилков, характеризующиеся большой мощностью и высоким содержанием золота. Реконструирована ориентировка осей тектонических напряжений на рудном этапе, в течение которого проходило формирование золотоносных кварцевых штокверков.

Ключевые слова: штокверк, структурный анализ, керн, месторождения золота, тектонические напряжения, жили, прожилки

Для цитирования: Сивков Д.В., Читалин А.Ф. Закономерности распределения золотоносных прожилков в штокверках центральной части месторождения Дражное (Восточная Якутия) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 2. С. 40–48.

DISTRIBUTION PATTERNS OF GOLD-BEARING VEINS IN STOCKWORKS IN THE CENTRAL PART OF THE DRAZHNUE DEPOSIT (EASTERN YAKUTIA)

Dmitry V. Sivkov^{1,2✉}, Andrey F. Chitalin²

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; sivkovdmitrij@yandex.ru[✉]

² Institute of Geotechnology LLC, Moscow, Russia; a.chitalin@igeotech.ru

Abstract. The paper presents the results of geological and structural analysis and identification of distribution patterns and spatial orientation of gold-bearing quartz-sulfide veins within quartz stockworks in the central part of the Drazhnoe deposit (Taryn gold field). The results of direct observations in outcrops and exploration drillholes oriented core were used as input data. Based on the results of the analysis, high thickness and high gold content systems of quartz veins and veinlets were identified. The orientation of tectonic stress axes during the ore phase, during which gold-bearing quartz stockworks were formed, was reconstructed.

Key words: stockwork, structural analysis, core, gold deposits, tectonic stresses, veins, veinlets

For citation: Sivkov D.V., Chitalin A.F. Distribution patterns of gold-bearing veins in stockworks in the central part of the Drazhnoe deposit (Eastern Yakutia). *Moscow University Geol. Bull.* 2022; 2: 40–48 (In Russ).

Введение. Цель исследования — выявление закономерностей распределения, пространственной ориентировки золотоносных кварц-сульфидных прожилков в кварцевых штокверках месторождения Дражное на востоке Тарынского золоторудного поля (ТЗРП) в Республике Саха (Якутия). Исследование проведено на основе материалов геолого-структурной документации керна разведочных структурных (с отбором ориентированного керна) скважин месторождения Дражное.

Тектоника и золоторудная минерализация ТЗРП. Тарынское золоторудное поле расположено на востоке Республики Саха (Якутия) в Оймяконском районе на 70 км южнее пос. Усть-Нера — административного центра района.

ТЗРП сложено смятыми в складки верхнетриасовыми и нижнеюрскими флишевыми образованиями и принадлежит Верхне-Индигирскому мегасинклиниорию Яно-Колымской складчатой системы.

Все известные в пределах ТЗРП жильно-прожилковые рудопроявления приурочены к соскладчатым сдвигово-взбросам северо-западного простирания, которые выражены зонами дробления и смятия в области динамического влияния глубинного Адыча-Тарынского разлома (АТР) северо-западного простирания. Эти разрывные нарушения имеют преимущественно крутое падение на северо-восток. В работе [Аристов и др., 2006] установлена приуроченность наиболее крупных и богатых золотокварцевых жил к узлам пересечения АТР с

поперечными разрывными нарушениями северо-восточного простириания.

Результаты анализа разномасштабных геологических карт, а также линеаментного анализа территории ТЗРП [Сивков и др., 2020] свидетельствуют о том, что поперечные по отношению к АТР разломы представлены преимущественно сдвигами.

Структура месторождения Дражное. Структура месторождения Дражное детально изучена специалистами ООО «Институт геотехнологий», которые в 2016–2019 гг. выполняли работы по геологическому сопровождению геологоразведочных работ и оценке запасов методом блочного моделирования [Читалин и др., 2018]. В рамках работ выполнены также комплексные структурно-геологические, геохимические, минералого-петрографические и петротомографические исследования, что позволило уточнить выводы предшественников и создать трехмерную структурно-кинематическую модель месторождения. Установлен структурно-тектонический (сдвигово-взбросовый) контроль формирования золоторудных жил и штокверков на месторождении Дражное в восточной части ТЗРП.

Месторождение Дражное приурочено к северо-восточному крылу и замыканию Тарынского синклиналии, сложенной терригенными образованиями верхнего триаса. В пределах месторождения выявлена система крутопадающих минерализованных тектонических нарушений северо-западного простириания (рис. 1), а также сопряженные с последними или секущие их седловидные и наклонные кварцевые штокверки и жилы.

Штокверковые рудные залежи сложены слабосерицитизированными и окварцованными песчанистыми алевролитами с разным количеством (в среднем 5–10% об. кварца) кварцевых прожилков лестничного, реже сетчатого и послойного типов мощностью до 5 см. Седловидные рудные залежи имеют пологое залегание ($15\text{--}45^\circ$), вытянуты в север-северо-западном направлении и расположены в разрезе на нескольких уровнях. Они приурочены к пологим и наклонным зонам смятия, дробления и густой трещиноватости в интенсивно дислоцированных алевролитах [Аристов и др., 2009].

Золотая минерализация максимально проявлена лишь в ядрах некоторых кварцевых штокверков, окруженных ореолами пиритизации, на участках вторичного изгибаивания взбросо-сдвигов северо-западного простириания более поздними поперечными складками и на пересечениях их правосторонними взбросо-сдвигами северо-восточного простириания.

При документации керна разведочных скважин, в процессе картирования карьера, а также в бореевых обрывах р. Б. Тарын за пределами рудных участков выявлено множество дорудных сокладчатых кливажных взбросов и сдвигово-взбросов северо-западного простириания (рис. 1). Эти разломы на этапе рудообразования были активизированы и контролировали формирование золотоносных кварц-сульфидных штокверков [Читалин и др., 2018; Сивков и др., 2020].

Согласно современной структурно-кинематической схеме месторождения Дражное [Читалин и др., 2018], оси складок ранней стадии первого этапа деформации простираются в северо-западном направлении, локально изгибаясь в плане в складки северо-восточного простириания, возникшие на поздней стадии первого этапа в зоне динамического влияния глубинного Адыча-Тарынского разлома (АТР) левого сдвигово-взброса. Таким образом, АТР заложился, вероятно, на поздней стадии первого этапа деформационного события в виде широкой зоны сгущения преимущественно левосторонних сдвигово-взбросов северо-западного простириания (продольные сколы Риделя, R). На этой же стадии образовались и сопряженные, преимущественно правосторонние сдвигово-взбросы северо-восточного простириания (поперечные сколы Риделя, R'), локализованные со структурным шагом в несколько километров по простирианию АТР. Узлы пересечения сколов R и R' предопределили положение

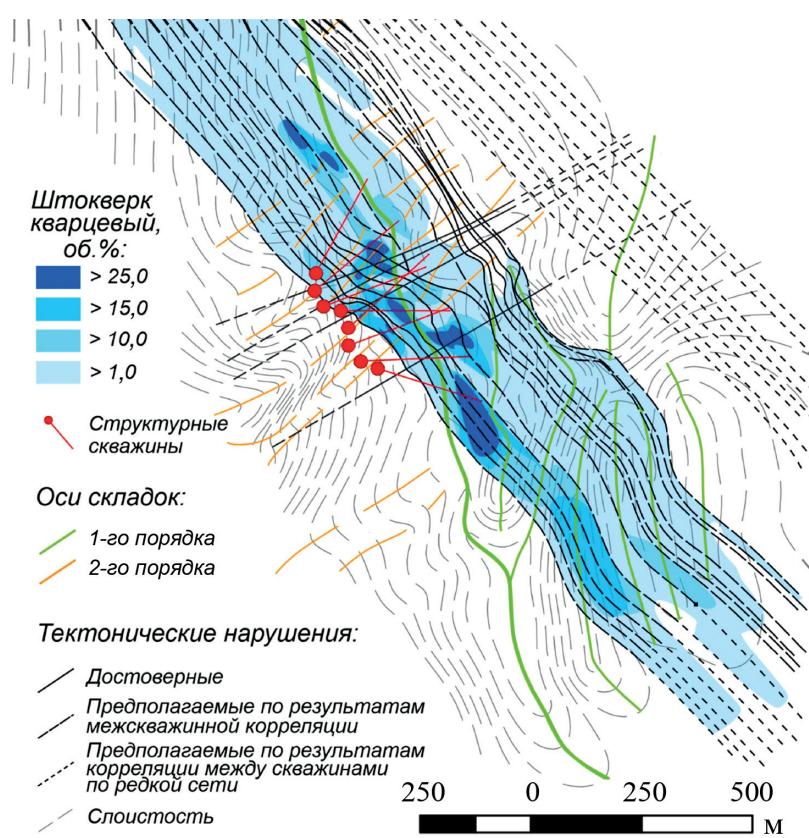


Рис. 1. Структурная карта участка Дражный

будущих рудоносных штокверков (рис. 1). На втором («рудном») этапе деформации направление вектора горизонтального сжатия сменилось на северо-западное–юго-восточное [Читалин и др., 2018; Сивков и др., 2020]. Сформировалась узкая рудоконтролирующая зона левосдвиговых деформаций северо-западного простириания. В ее пределах образовались складки северо-восточного простириания, ориентированные под углами 45–60° к оси сдвиговой зоны, что указывает на их формирование в обстановке транстенсии — простого сдвига и растяжения. Рудоконтролирующая сдвиговая зона пересекает под углом 20° зону дорудного Адыч-Тарынского разлома. В зоне наложенного сдвига второго этапа деформации были активизированы разломы первого этапа, образовались левосторонние вторичные сдвиги Риделя северо-западного простириания. На участках сопряжения окончаний кулисных сдвигов Риделя и между ними (на участках аномально высоких напряжений 2-го порядка) сформировались рудоносные штокверковые структуры, которые по механизму образования можно сравнить с валообразными структурами локального сжатия (*push-up*) в аналоговых тектонофизических моделях сдвиговых зон [Читалин и др., 2018; Фролова и др., 2016].

На месторождении выделяются системы круто-падающих рудонасыщенных прожилков и жил, а также пологие и субгоризонтальные жилы и прожилки, заполнившие синрудные приразломные трещины отрыва и дорудные соскладчатые сколы, приоткрывавшиеся вблизи активизированных дорудных разломов в условиях горизонтального сжатия и вертикального растяжения. На рудном этапе деформации в условиях «надвигового» поля напряжений (горизонтальное сжатие — вертикальное растяжение), кроме приразломных жил и прожилков, сформировались протяженные наклонные лentoобразные кварцевые штокверки надвиговой кинематики и сопряженные с ними субгоризонтальные штокверки вертикального растяжения. Оевые части штокверков растяжения часто выполнены богатыми золотом мощными кварцевыми жилами. Эти аркообразные штокверки пересекают дорудную складчато-разрывную структуру. Богатые золотом рудные интервалы кварцевых штокверков расположены на разных гипсометрических уровнях в пределах гипотетического рудного канала, пересекающего систему лестничных аркообразных штокверков в их замковых частях, где сконцентрированы богатые золотом мощные кварцевые жилы [Читалин и др., 2018].

Золотоносные штокверки имеют пластинообразную форму и полого падают на юго-запад и северо-восток, реже залегают субгоризонтально. Внутренняя структура штокверка представлена главным образом наклонными (до субгоризонтальных) кварцевыми и карбонат-кварцевыми жилами, выполняющими трещины отрыва, а также прожилками, выполняющими трещины скальвания.

В результате анализа стереограмм ориентировки трещин и прожилков, построенных по результатам документации структурного бурения с отбором ориентированного керна, установлено сходство элементов залегания ориентировки основных преобладающих систем трещин и прожилков на участке Дражный. Это свидетельствует о том, что различные участки месторождения находились в зоне динамического влияния близких по ориентировке рудоконтролирующих разрывных нарушений, а существующая инфраструктура нарушений на более позднем этапе была заполнена гидротермальными растворами.

Материалы и методы исследования. Для выяснения закономерностей распределения золотоносных прожилков в штокверковых тел с использованием результатов структурного бурения с отбором ориентированного керна в пределах центральной части месторождения [Чикатуева, Сивков, 2018].

В качестве исходных данных для анализа ориентировок прожилков использованы результаты замеров элементов залегания жил и прожилков в ориентированном керне по восьми структурным наклонным (зенитный угол 20°) скважинам (рис. 1), пробуренным на территории участка Дражный. Глубина скважин до 270,0 м.

Методика структурного моделирования жил и прожилков в пределах штокверковых тел. Учитывая ярко выраженный структурно-тектонический контроль оруденения в пределах месторождения Дражное, для выявления закономерностей пространственного распределения гидротермальных жильно-прожилковых образований необходимо детальное исследование геологической структуры рудных тел. С этой целью для создания детализированной трехмерной модели внутренней структуры штокверковых тел на участках максимальной концентрации золота было проведено массовое моделирование прожилков в среде ГГИС *MicroMine* и последующее изучение их геолого-структурных позиций [Чикатуева, Сивков, 2018].

В качестве основы для построения трехмерной модели кварц-карбонатных прожилков использована база данных структурных замеров, сформированная в процессе геолого-структурной документации ориентированного керна. База данных содержит результаты ряда замеров, на основе которых восстанавливается пространственное положение прожилков и жил в естественном залегании, в том числе замеры их ориентировки: углы α и β , а также величины истинной мощности прожилков или жил [Call et al., 1982].

По результатам измерения условных углов ориентировки прожилков в керне — углов их наклона по отношению к оси керна (α) и азимутов падения (β), замеряемых по образующей керна в плоскости его поперечного сечения по часовой стрелке от условно-

го нулевого азимута — линии низа керна, и с учетом данных инклинометрии скважин с использованием ГГИС Micromine — были обработаны результаты структурных замеров: рассчитаны величины истинных углов и азимутов падения прожилков. Такое преобразование проводится для координат каждой из трех координатных осей по формулам:

$$x_1 = x + 0,5M\cos(DIP - 90) \cos(AZ - 90),$$

$$y_1 = y + 0,5M\sin(AZ - 90) \cos(DIP + 90),$$

$$z_1 = z + 0,5M\cos(DIP),$$

$$x_2 = x - 0,5M\cos(-DIP - 90) \cos(-AZ - 90),$$

$$y_2 = y + 0,5M\sin(AZ - 90) \cos(-DIP + 90),$$

$$z_2 = z - 0,5M\cos(DIP),$$

где x_1, y_1, z_1 — координаты центра верхнего контакта; x_2, y_2, z_2 — координаты центра нижнего контакта; x, y, z — координаты центра прожилка (по результатам структурной документации керна); M — мощность прожилка или жилы в единицах измерения координат (м); DIP — величина угла падения; AZ — величина истинного азимута падения.

Физический смысл такого преобразования заключается в создании двух точек на расстоянии, равном половине истинной мощности от точечного замера (геометрического центра интервального замера), в двух направлениях, перпендикулярных азимутам падения и простирации. Каждая из созданных точек лежит в плоскости верхнего (x_1, y_1 и z_1) и нижнего (x_2, y_2 и z_2) контактов прожилка.

Плоскости, соответствующие верхнему и нижнему контакту, при этом будут иметь элементы залегания согласно замеру, а расстояние между плоскостями по нормали будет соответствовать истинной мощности прожилка.

На следующем этапе вдоль ствола скважины проводилось моделирование ограничивающего цилиндра с заданным радиусом. Подобный цилиндр играет роль ограничивающей поверхности для контактов жил. При ограничении обеих плоскостей контактов и ограничивающего цилиндра образуется замкнутое в объеме тело жилы или прожилка.

Присвоение атрибутов содержания Au, а также мощности прожилков и жил каждой модели проводили на основании результатов геолого-структурной документации и опробования соответствующих интервалов керна.

Конечный результат вышеописанных построений — модель прожилкования, представляющая собой совокупность объемных тел жил, обладающих элементами залегания и мощностью, которые указаны в базе данных структурных замеров.

Результаты исследований и их обсуждение. На рис. 2, г представлена стереограмма, рассчитанная по 1543 замерам трещин в пределах участка Дражный по результатам структурного бурения (с отбором

ориентированного керна). Выделяются четыре максимума плотности замеров ориентировок трещин, которые можно объединить в две структурные ассоциации:

1) системы дорудных трещин 1-й структурной ассоциации — азимут падения (аз. пд.) 230° , угол падения ($\angle_{\text{пд.}}$) 60° и аз. пд. 45° , $\angle_{\text{пд.}} 10^\circ$ (обе системы показаны черным на стереограмме) — образованы в условиях наклонного сжатия с северо-востока и юго-запада. Также к этой структурной ассоциации можно отнести субпослойные трещины;

2) системы 2-й структурной ассоциации — аз. пд. 150° , $\angle_{\text{пд.}} 30^\circ$ (красное на стереограмме) и аз. пд. 320° , $\angle_{\text{пд.}} 40^\circ$ (синее) — образованы в условиях субгоризонтального сжатия с юго-востока и северо-запада.

Выделенные системы дорудных трещин отчетливо фиксируются в бортах карьера на участке Дражный (рис. 2, а).

Выявление системрудных прожилков и их парагенезов. Результаты геолого-структурного анализа свидетельствуют о существовании четырех систем жил и прожилков, которые в свою очередь были объединены в два относительно разновозрастных структурных парагенеза. К первому — слабозолотоносному — структурному парагенезу отнесены кварцевые жилы и прожилки юго-западного и северо-восточного падения.

Ко второму — золотонасыщенному — структурному парагенезу были отнесены прожилки и жилы северо-западного и юго-восточного падения. К прожилкам этих систем приурочены видимые выделения золота и пирита 3-й (золотоносной) генерации [Чикатуева, Сивков, 2018; Чикатуева, Ситкевич, 2019]. Очевидно, что прожилки выполняют дорудные трещины соответствующих структурных ассоциаций (рис. 2).

Отметим, что выделение двух пар сопряженных систем прожилков и отнесение их к разновозрастным структурным парагенезам достаточно условное и предварительное, оно должно быть подтверждено данными о кинематике прожилков. Как известно, сопряженные системы трещин скальвания, согласно [Гзовский, 1975], это трещины, образовавшиеся одновременно в одном и том же поле напряжений на одном этапе (стадии) деформации. Трещины отрыва, возникшие на этом же этапе (стадии) деформации в том же поле напряжений (отрывы могут возникнуть и раньше сколов), образуют структурную ассоциацию с трещинами скальвания. Если при развитии трещин скальвания происходит их раскрытие и заполнение прожилками, то эти прожилки также входят в состав структурной ассоциации этого этапа (стадии) деформации. При этом минеральный состав разноориентированных прожилков, образующих структурную ассоциацию, должен быть одинаковым.

В случае же образования прожилков при раскрытии уже существующих дорудных трещин, сопряженность прожилков должна определяться с

учетом кинематики раскрытия трещин и минерального состава.

Методика построения диаграммы мощность–содержание–ориентировка. В пределах участка Дражный выполнен анализ пространственного распределения кварц–сульфидных прожилков разной ориентировки, характеризующихся высоким содержанием золота и большой истинной мощностью. При выполнении подобного анализа построена диаграмма зависимости между мощностью прожилков, содержанием золота и их ориентировкой в пространстве на основе прямоугольной диаграммы матрицы (в осях координат азимут падения — угол падения), впервые предложенной П.Н. Николаевым [Николаев, 1977, 1992]. Диаграмма представляет собой своего рода развертку общепринятой круговой стереограммы, где вдоль горизонтальной оси слева направо отсчитывается азимут падения жилы или

прожилка ($0\text{--}360^\circ$), а по вертикальной оси снизу вверх, соответственно, — его угол падения ($0\text{--}90^\circ$). Построение подобных диаграмм возможно в любой современной ГИС или САПР и проводится в локальной системе координат.

Использование прямоугольных диаграмм позволяет отразить одновременно несколько характеристик ориентированных объектов. Главное их преимущество заключается в возможности применения общепринятых методов интерполяции тех или иных величин, которыми обладают ориентированные объекты (мощность, содержание золота, сульфидов и т. д.), что обычно не представляется возможным при работе со стереографическими проекциями. Подобная методика была использована А.Ф. Читалиным на месторождении золота Бестюбе в Северном Казахстане для выявления ориентировки и генети-

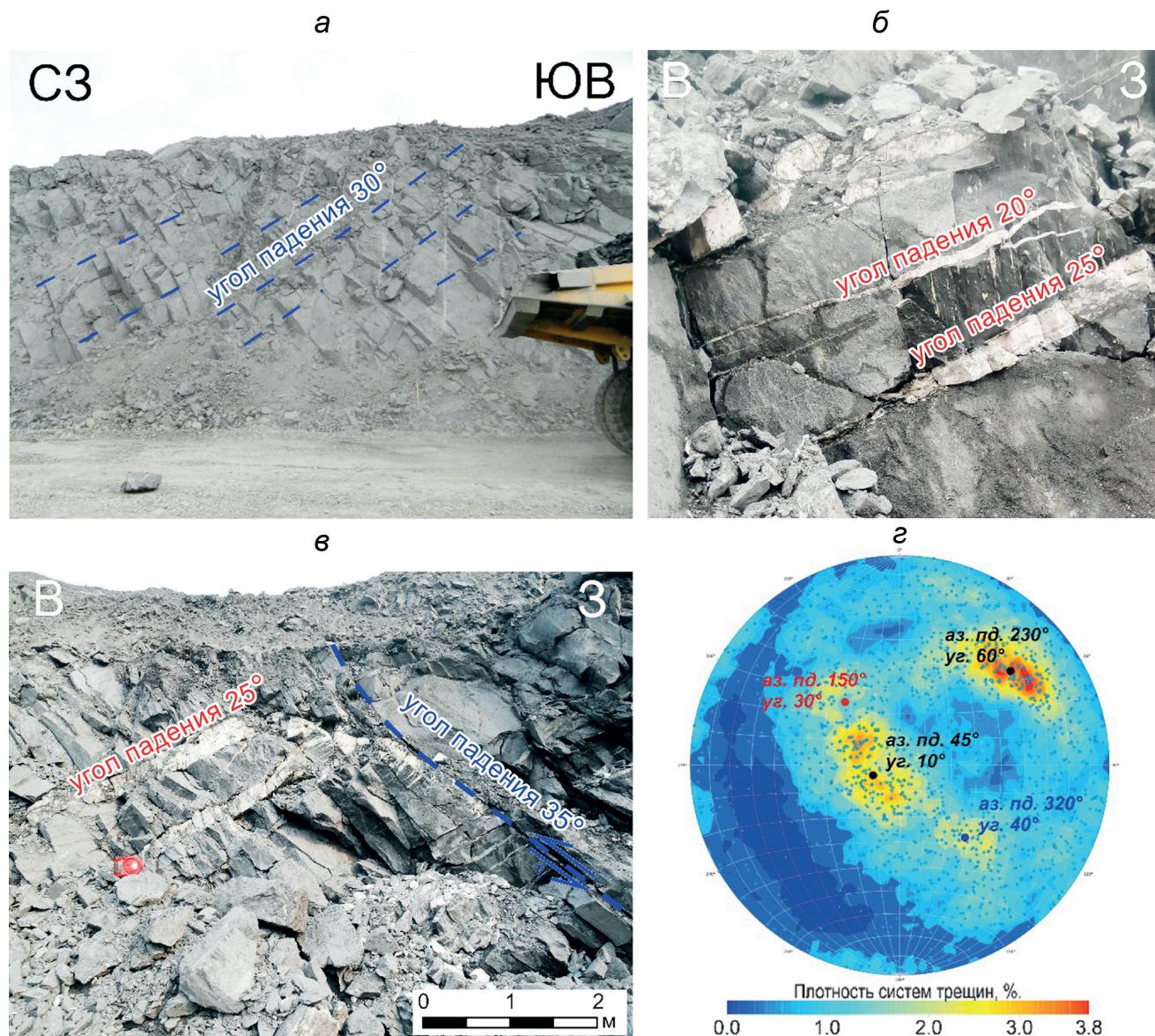
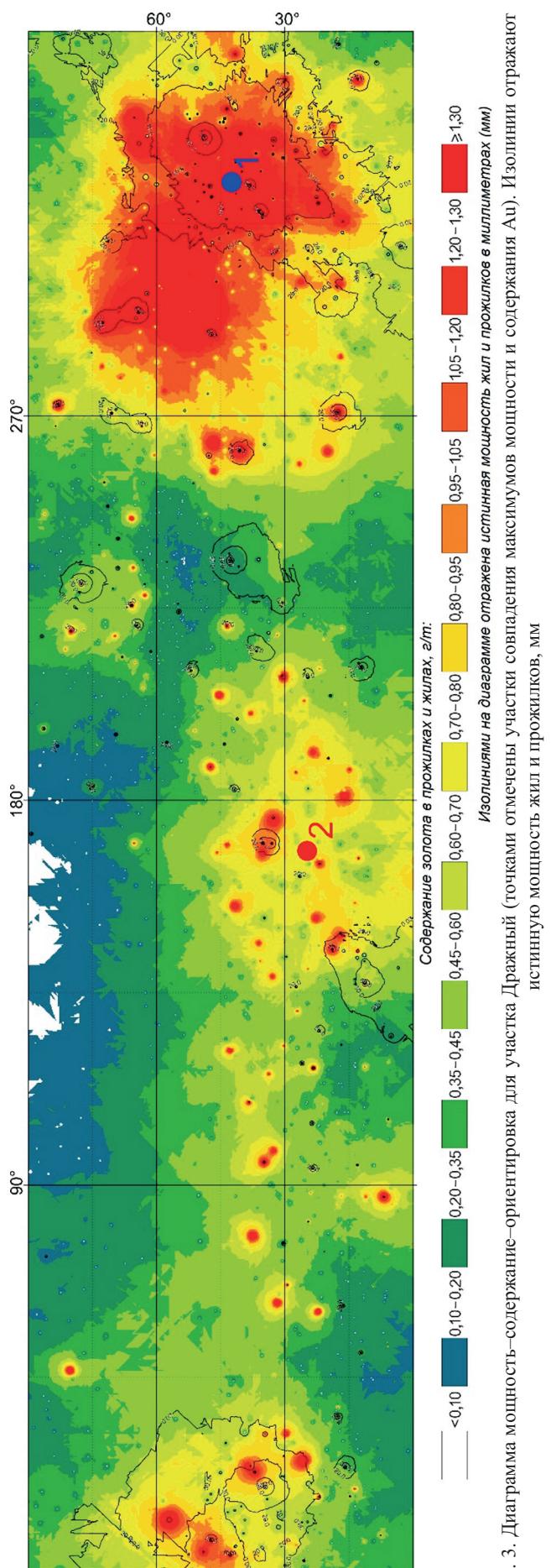


Рис. 2. Система дорудных сколов в северо-восточной стенке карьера (фото А.Ф. Читалина) (а); рудные прожилки в южной стенке карьера, выполняющие трещины отрыва, которые оперяют надвиг (фото Д.В. Сивкова) (б, в); стереограмма трещиноватости участка Дражный (нижняя полусфера, 1543 замера) (г)



ческого типа богатых золотом кварцевых жил или их фрагментов [Читалин, 1992].

После определения ориентировок систем кварцевых прожилков по плотностным максимумам на диаграмме-матрице выделяли системы с максимальными мощностью и концентрацией золота для последующего определения ориентировки направления максимального растяжения на этапе отложения золота продуктивной стадии. Предполагается, что перпендикулярно оси растяжения максимально раскрывались перпендикулярно ориентированные к ней трещины, которые заполнялись кварцевыми прожилками с максимальной мощностью и высоким содержанием золота (при условии, что золото отлагалось в трещинах в том же поле напряжений и на этом же этапе (стадии) деформации, а не было наложено на прожилки позже в ином поле напряжений).

На рассчитанную таким образом диаграмму-матрицу выносили все замеры элементов залегания прожилков в пределах участка. Помимо величин угла и азимута падения, каждая точка, соответствующая замеру элементов залегания жилы или прожилка, содержала в виде атрибута информацию о содержании золота и истинной мощности. На основании вынесенных таким образом на диаграмму точечных данных в системе координат азимут—угол падения в ГИС ESRI ArcGIS проводилась интерполяция величин содержания золота и мощности прожилков методом обратных взвешенных расстояний со степенью 2. Полученные путем интерполяции данные о содержании золота выносили на диаграмму в виде цветной заливки, а данные о мощности прожилков — в виде изолиний. Представление информации в подобном виде дает возможность выявить системы прожилков, характеризующиеся наибольшей мощностью и одновременно наиболее насыщенные золоторудной минерализацией, и, что самое главное, позволяет определить их пространственную ориентировку. В рассматриваемом случае нас будут интересовать участки совпадения максимумов мощности прожилков и максимумов содержания золота в этих прожилках.

В работе ось сжатия (наибольшее из сжимающих или наименьшее из растягивающих главное нормальное напряжение, по [Гзовский, 1975]) была обозначена σ_3 , а ось растяжения (наибольшее из растягивающих или наименьшее из сжимающих главное нормальное напряжение) — σ_1 . (Такое обозначение осей главных нормальных напряжений было принято в СССР и используется в РФ, но в международной практике структурного анализа обозначения осей прямо противоположны.)

Анализ мощности и золотоносности систем прожилков. На диаграмме для участка Дражный (рис. 3) выделяются две области совпадения максимумов концентрации золота и жильно-прожилковых образований максимальной мощности: 1) аз. пд. 325°, \angle пд. 45°; 2) аз. пд. 170°, \angle пд. 25°. Эти максимумы соответствуют двум системам жил и прожилков.

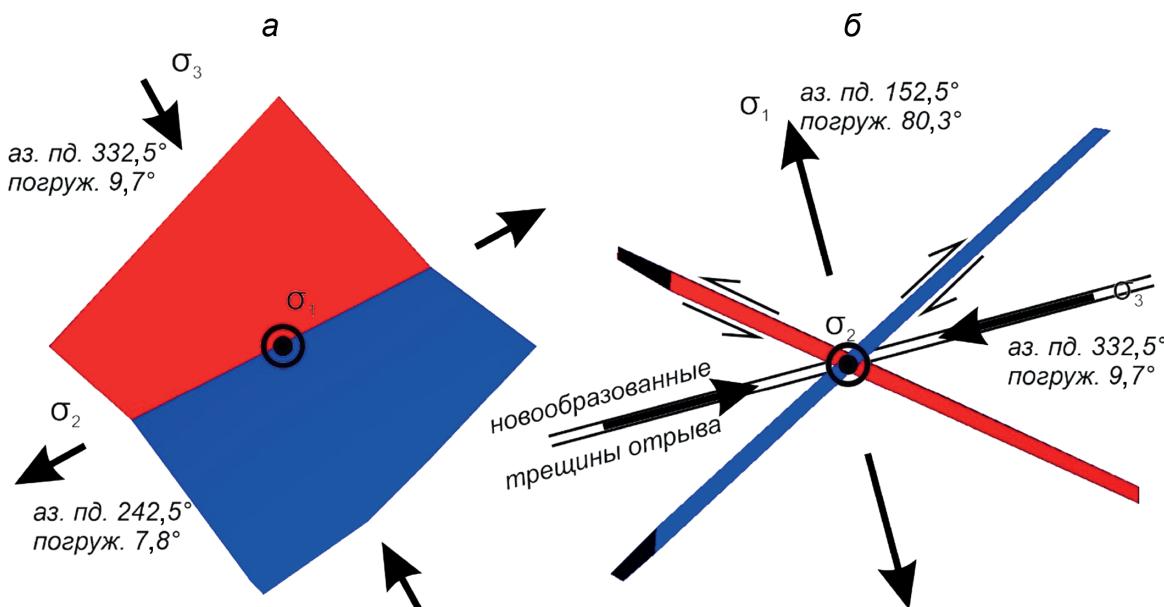


Рис. 4. Схематическая реконструкция полей напряжений на участке Дражный: вид сверху (а), вид на северо-восток (б). Синее — система жил и прожилков с элементами залегания аз. пд. 325° , $\angle \text{пд.} 45^{\circ}$; красное — аз. пд. 170° , $\angle \text{пд.} 25^{\circ}$

Как упоминалось выше, среди систем кварцевых жил и прожилков в пределах штокверков на всем месторождении Дражное, согласно [Чикатуева, Сивков, 2018], выделяются два относительно разновозрастных парагенеза:

1) структурный парагенез 1: система 1-1, пологие (аз. пд. $350-(0-60)^{\circ}$, $\angle \text{пд.} 0-40^{\circ}$), и система 1-2, крутые (аз. пд. $200-260^{\circ}$, $\angle \text{пд.} 40-70^{\circ}$);

2) структурный парагенез 2: система 2-1, пологие (аз. пд. $80-150^{\circ}$, $\angle \text{пд.} 0-30^{\circ}$), и система 2-2, крутые (аз. пд. $290-320^{\circ}$, $\angle \text{пд.} 30-70^{\circ}$).

Обе выделенные в пределах участка Дражный системы кварцевых прожилков соответствуют второму (позднему золотонасыщенному) парагенезу.

Реконструкция полей напряжений этапа образования золотоносных прожилков. Результаты реконструкции полей напряжений (рис. 4) показали, что ось сжатия σ_3 погружалась под углом 10° на северо-запад по азимуту $\sim 330^{\circ}$; ось растяжения σ_1 была ориентирована субвертикально под углом 80° и погружалась на юго-юго-запад по азимуту 150° ; ось σ_2 погружалась на юго-запад по азимуту $\sim 240^{\circ}$ под углом $\sim 8^{\circ}$. Обе системы нарушений образуют структурный парагенез дорудных систем трещин скальвания. На рудном этапе, в процессе описываемого деформационного события при субгоризонтальном сжатии и субвертикальном растяжении, существовавшие наклонные трещины скола были частично раскрыты, залечивались мощными жилами выделенных систем и приобрели (сдвигово-)взбросовую и надвиговую кинематику. При этом в процессе субвертикального растяжения формировались также новообразованные субгоризонтальные трещины отрыва, выполненные кварцевыми прожилками с высокой концентрацией золота (рис. 4, б).

Подобное взаиморасположение основных несущих золотую минерализацию систем жильно-про-

жилковых образований укладывается в представления о формировании рудных штокверков в условиях «надвигового» поля напряжений (субгоризонтальное сжатие, субвертикальное растяжение) на втором «рудном» этапе деформаций.

Повышенная золотоносность крутопадающей системы в сравнении с пологой свидетельствует, вероятно, о ее роли в качестве основной рудоконтролирующей структуры. В свою очередь большой разброс максимумов мощности–золотоносности (рис. 3) для рудоподводящей системы свидетельствует, вероятно, о многостадийном характере поступления золотоносного флюида в инфраструктуру АТЗ [Сивков и др., 2021].

Согласно [Читалин и др., 2018], именно на более позднем (рудном) этапе деформации в условиях «надвигового» поля напряжений (горизонтальное сжатие, вертикальное растяжение), кроме приразломных жил и прожилков, сформировались протяженные наклонные и сопряженные с ними субгоризонтальные кварцевые штокверки. Для наклонных штокверков, как правило, характерна сдвигово-взбросовая или надвиговая кинематика (рис. 5, а).

Заключение. По результатам проведенных исследований кварцевых штокверков, распространенных на участке Дражный, удалось выделить системы жил и прожилков, характеризующиеся как достаточно большой мощностью, так и высоким содержанием золота, а также определить их пространственную ориентировку.

В строении штокверков участка Дражный выделяются системы северо-восток–юго-западного простириания (северо-западное падение) крутопадающих и северо-восток–юго-западного простириания (юго-восточное падение) пологих (субгоризонтальных) жил, обе системы характеризуются повышенной мощностью и высокой золотоносностью (рис. 5, б).

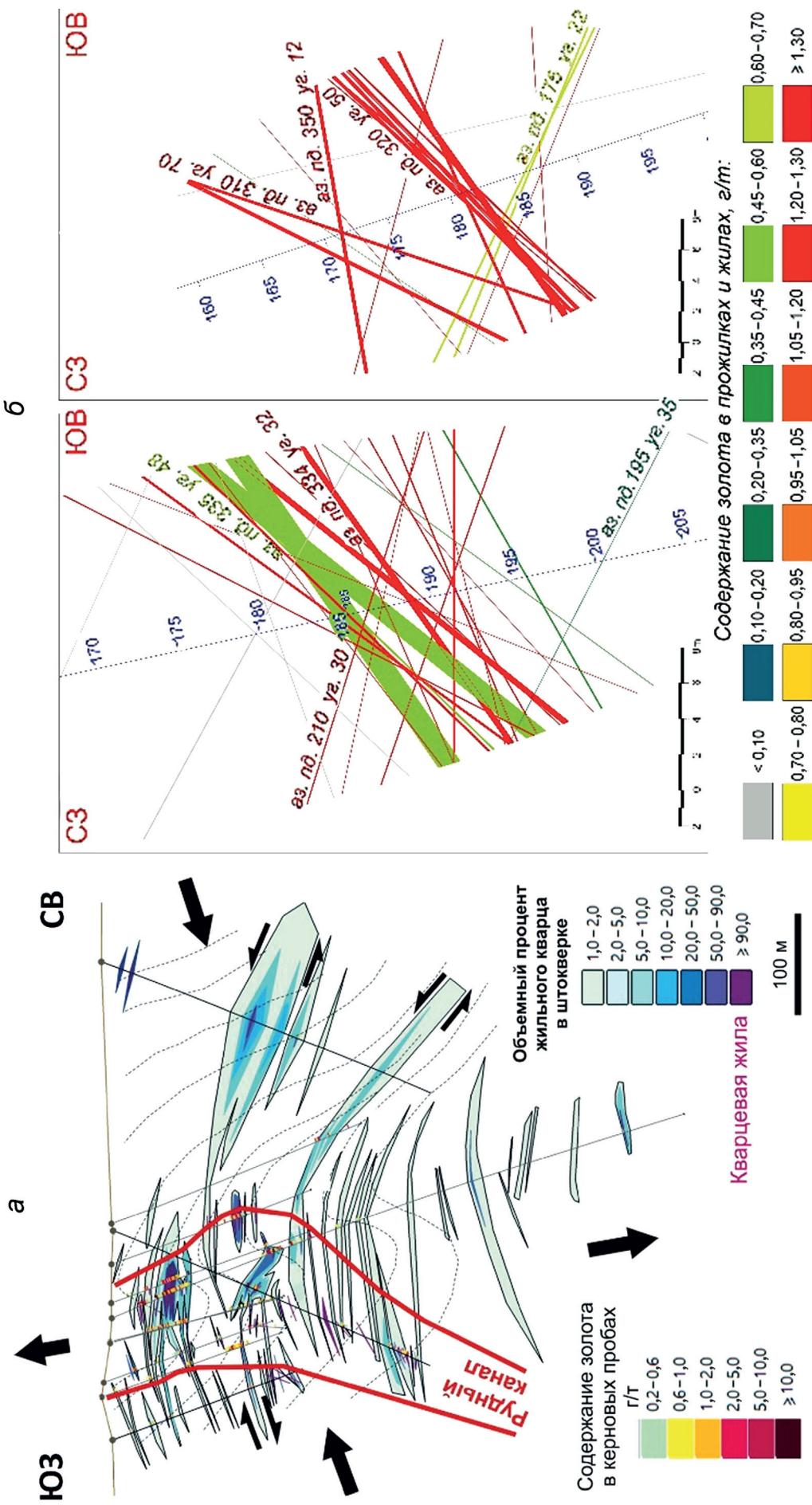


Рис. 5. Структурная интерпретация рудных залежей месторождения Дражное, по [Читалин и др., 2018] (а); пунктиром показана слоистость, стрелками — сжатие и растяжение, полустрелками — кинематика штокверков; разрез через трехмерную модель прожилкования в центральной части месторождения Дражное (б), вид на северо-восток (б) в плоскости куста скважин

Характерное расположение полюсов жильно- прожилковых образований на диаграммах свидетельствует в пользу формирования штокверков в условиях надвигового поля напряжений на втором (рудном) этапе деформации — субгоризонтальное сжатие с северо-запада и юго-востока и, соответственно, субвертикальное растяжение. При подобном сжатии происходило формирование серии наклонных взбросов, заполняемых рудным веществом, а также раскрытие и заполнение прожилками всех существовавших на тот момент дорудных трещин. Этот вывод не противоречит предложенной ранее [Читалин и др., 2018] структурной модели формирования штокверков месторождения Дражное как локальных структур горизонтального выдавливания push-up, образовавшихся на участках сочленения кулисных сдвигов в обстановке транспрессии. Результаты исследований уточняют эту модель — в трехмерном пространстве реконструируется ориентировка осей главных тектонических напряжений на рудном этапе формирования рудоносных штокверков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аристов В.В. Перспективы выявления крупных богатых золотокварцевых месторождений в Тарынском рудно-rossыпном узле // Разведка и охрана недр. 2009. № 6. С. 3–11.

Аристов В.В., Задорожный Д.Н., Имамединов Б.Н. и др. Факторы локализации золото-кварцевых месторождений Тарынского рудно-rossыпного узла. М., 2006. 200 с.

Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.

Крючков А.В. Поисковые работы на рудное золото в пределах центральной части Тарынского рудно-rossыпного узла. Республика Саха (Якутия). Якутск, 2008.

Николаев П.Н. Методика статистического анализа трещин и реконструкция полей тектонических напряжений // Изв. вузов. Геология и разведка. 1977. № 12. С. 113–127.

Николаев П.Н. Методика тектонодинамического анализа. М.: Недра, 1992. 263 с.

Очеретенко И.А., Троценко В.В. Стереографические проекции в структурной геологии. Л.: Недра, 1978. 135 с.

Сивков Д.В., Прокофьев В.Ю., Чикатуева В.Ю. Новые данные об условиях формирования золотой минерализации месторождения Дражное (Республика Саха–Якутия, Россия) по результатам исследования флюидных включений // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2021. № 1. С. 42–49.

Таким образом, внутренняя структура рудоносных штокверков представлена структурным парагенезом разрывов надвиговой и взбросовой кинематики — это наклонные до субгоризонтальных кварцевые и карбонат-кварцевые жилы, а также прожилки, заполнившие раскрытые дорудные трещины скола.

Предполагается, что раствор поступал в существующую инфраструктуру разлома по крутопадающим открывшимся трещинам, заполняя также граничащие с ними пологие трещины отрыва и открывшиеся сколы, с чем связано преобладание пологих жил и прожилков.

Практическое значение полученных выводов заключается в том, что при разведке месторождений штокверкового типа пространственную ориентировку наиболее золотоносных прожилков в штокверках необходимо учитывать при составлении программы разведочного бурения для уточнения геометрии разведочной сети, ориентировки разведочных скважин, а также при создании геологической и ресурсной моделей.

Сивков Д.В., Читалин А.Ф., Дергачев А.Л. Применение линеаментного анализа для выявления закономерностей локализации золотого оруденения на территории Тарынского рудного поля в Республике Саха (Якутия) // Исследование Земли из космоса. 2020. Вып. 1. С. 3–19.

Фролова Н.С., Корбутяк А.Н., Мишакина А.А., Корпач С.В. Развитие деформаций в зонах сдвига: результаты физического моделирования с использованием песка // Четвертая тектонофиз. конф. в ИФЗ РАН. Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Мат-лы докл. Т. 2. М: ИФЗ, 2016. С. 385–392.

Чикатуева В.Ю., Сивков Д.В. Моделирование золоторудных штокверков по данным ориентированного керна: Тез. докл. Майнекс 2018. М., 2018.

Читалин А.Ф. Микроструктура кварцевых жил золоторудного месторождения // Научно-технические достижения и передовой опыт в области геоэкологии и разведки недр: Инф. сб. Вып. 6. М., 1992. С. 12–22.

Читалин А.Ф., Воскресенский К.И., Гришин Е.М. и др. Структурно-кинематическая модель золоторудного месторождения Дражное // Геофизика. 2018. Вып. 3. С. 106–114.

Call R.D., Savyly J.P., Pakalins R. A simple core orientation technique // Proceed. of the Third Intern. Conf. on Stability in Surface Mining. Vancouver, Soc. of Mining Engineers of AIME. N. Y., 1982. P. 465–481.

Twiss R.J., Moores E.M. Structural Geology. N. Y.: W.H. Freeman and Company, 1992. P. 224–230.

Статья поступила в редакцию 07.07.2021; одобрена после рецензирования 26.10.2021; принята к публикации 28.04.2022.