

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*

**Сивков Дмитрий Васильевич**

**ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ТАРЫНСКОГО  
ЗОЛОТОРУДНОГО ПОЛЯ, РЕСПУБЛИКА САХА (ЯКУТИЯ)**

25.00.11 – Геология, поиски и разведка твердых полезных  
ископаемых, минерагения

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

**Научный руководитель:** *Дергачев Александр Лукич, доктор геолого-минералогических наук, доцент*

**Официальные оппоненты:** *Дьяконов Виктор Васильевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе», геологоразведочный факультет, кафедра общей геологии и геологического картирования, заведующий*

*Тевелев Александр Вениаминович, доктор геолого-минералогических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, профессор*

*Бакшеев Иван Андреевич, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», геологический факультет, кафедра минералогии, доцент*

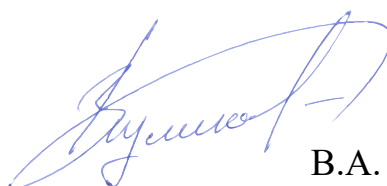
Защита диссертации состоится «15» декабря 2021 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета МГУ.04.03 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, геологический факультет, ауд. 308.

E-mail: dsmsu0403@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/404285290/>

Автореферат разослан «12» ноября 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор геолого-минералогических наук



В.А. Куликов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Тарынское золоторудное поле (ТЗРП) расположено в восточной части Республики Саха (Якутия), на северо-западе крупнейшей и одной из самых перспективных золотоносных провинций Дальнего Востока – Яно-Колымской (ЯКЗП). На территории этой провинции выявлены и разведаны несколько крупных месторождений штокверкового типа, характеризующихся невысокими содержаниями золота в рудах при значительных запасах, достигающих 1500 т Au (Наталкинское, Дегдекан, Верхний Хакчан и др.). Все эти объекты относятся к орогенным мезотермальным (согласно [Groves et al., 1998]) в фанерозойских коллизионных поясах [Goldfarb et al., 2001] или к золото-кварцевой формации (по классификации [Горячев, 1998]). В пределах ТЗРП также выявлено месторождение, обладающее существенными запасами руды при умеренных содержаниях золота – Дrajное (более 35 т золота при среднем содержании 6,5 г/т) [Аристов и др., 2015].

Начало промышленного освоения территории положено в 30-х годах прошлого века, когда была отмечена знаковая золотоносность рек Большой Тарын и Малый Тарын [Одинец, 1934ф]. Позже была выявлена закономерность, заключающаяся в линейном и поясовом размещении рудных и россыпных объектов в пределах ЯКЗП [Билибин, 1961]. По мере выявления россыпных и рудных объектов внутренняя структура ЯКЗП была детализирована, а в конце 60-х годов выделен рудоконтролирующий Адыча-Тарынский глубинный разлом, к ветвям которого и приурочены крупные месторождения золота ТЗРП [Бычок 1969ф; Владимиров, 1973].

На сегодняшний день территория ЯКЗП обладает одной из наиболее развитых на Дальнем Востоке горнопромышленных инфраструктур. Общее количество золота, добытого более чем за 80 лет на месторождениях ЯКЗП, превышает 2 000 т [Михалицына, 2011], что ставит ее в один ряд с крупнейшими золотоносными провинциями мира. И хотя за период многолетнего промышленного освоения территории из недр извлечено колоссальное количество золота, ресурсный потенциал ЯКЗП по рудному золоту остается высоким (5 000 т), а срок эксплуатации этих ресурсов оценивается в более чем 50 лет [Михайлов и др., 2007].

*Актуальность представленной работы* определяется позицией месторождения в пределах Дальневосточного федерального округа, на территории, рассматриваемой «Стратегией развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2030 года», в качестве одного из наиболее перспективных традиционных районов золотодобычи с развитой инфраструктурой, где требуется проведение работ, обеспечивающих пополнение ликвидного фонда недропользования, прежде всего, за счет коренных месторождений. С течением времени, по мере исчерпания фонда легко открываемых месторождений, выявление новых месторождений в ЯКЗП становится все более сложной задачей, требующей внедрения новых и совершенствования традиционных, уже зарекомендовавших себя, методов прогнозирования и поисково-разведочных работ.

В перспективе геологоразведочные работы в пределах провинции должны во все большей степени опираться на более наукоемкие методы, такие как анализ материалов дистанционного зондирования Земли, разведочное бурение с отбором ориентированного керна, структурное картирование коренных обнажений, трехмерное компьютерное моделирование рудных тел и т.п. За последние два десятилетия с развитием компьютерных технологий, в т.ч. специализированного программного обеспечения (горно-геологические и географические информационные системы, системы автоматического проектирования и пр.), и с появлением новых технологий дистанционного зондирования поверхности Земли (цифровая мультиспектральная космическая съемка и съемка сверхвысокого разрешения в видимом диапазоне частот) появилась возможность изучения структурных особенностей рудного поля на совершенно

новом уровне пространственного разрешения и точности пространственной привязки с апробацией новых методик на представительном фактическом материале. Актуальность представленной работы заключается в получении при помощи современного прецизионного бурового, аналитического и зондирующего оборудования новых данных о геологическом строении Тарынского рудного поля, истории формирования его структуры, а также об условиях формирования гидротермальных жильно-прожилковых образований на месторождении Дразное, одном из крупнейших в пределах ТЗРП.

*Практическое значение проведенных исследований* заключается в выявлении факторов структурного контроля месторождений и жильно-штокверковых рудных тел на примере ТЗРП и месторождения Дразное с использованием предложенного автором рационального комплекса методов, главным образом, структурных. Результаты структурных исследований в рамках диссертационной работы необходимо учитывать для повышения эффективности геологоразведочных работ на флангах выявленных объектов и на новых перспективных площадях. Проведенные термобарогеохимические исследования имеют важное значение для типизации месторождений ТЗРП при проведении поисково-оценочных работ на рудопроявлениях района.

Для прогнозирования рудных тел жильно-штокверковых месторождений в комплексе различных методов исследований существенное значение приобретает морфолого-кинематический анализ разноранговых структур разрушения (тектонических трещин и разрывов), и собственно жильных образований с целью реконструкции полей напряжений при их становлении.

Главной *целью работы* являлось выявление факторов геолого-структурного контроля золотого оруденения на основе нового фактического материала и обоснованного комплекса современных методов, а также уточнение истории формирования структуры ТЗРП и места в ней процессов рудообразования.

*Конкретными задачами*, решавшимися в рамках исследования, являлись:

- выявление, анализ и интерпретация линейных объектов на поверхности ТЗРП по материалам дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ);
- составление детальной геолого-структурной схемы месторождения Дразное и смежных участков Перешеек и Террасовый;
- анализ трещиноватости в естественных обнажениях и горных выработках;
- реконструкция полей палеотектонических напряжений в пределах Тарынского рудного поля на разных этапах деформационного события по результатам линейментного анализа и структурных наблюдений в разведочных скважинах;
- оценка условий формирования гидротермальных образований на месторождении Дразное по результатам анализа газовой-жидких включений в кристаллах кварца рудных жил и прожилков (рис. 12);
- характеристика преобладающего химического и фазового составов флюидных включений;
- реконструкция механизма миграции и разгрузки золотоносных флюидов.

*Фактический материал*, положенный в основу диссертационной работы, собран автором в течение четырех полевых сезонов (2016–2019 гг.) на месторождении Дразное и его флангах в процессе выполнения работ ООО «Институт геотехнологий». Автором проводилось детальное геолого-структурное картирование полотна и бортов карьера на месторождении Дразное в масштабе 1:1 000, поисковые геологические маршруты на участках, сопредельных с месторождением, геолого-структурная и инженерно-геологическая документация как ориентированного, так и неориентированного керна разведочных скважин в пределах ТЗРП.

Собранный автором новый фактический материал представлен:

- данными авторской интерпретации результатов ДЗЗ;

- обширными данными структурного разведочного бурения и геолого-структурного картирования, собранными в процессе геологической документации керна нескольких десятков разведочных скважин, в том числе 7 структурных (с отбором ориентированного керна);

- несколькими сотнями замеров элементов залегания слоистости, более чем 1000 замеров ориентировок трещинных структур, несколькими сотнями замеров ориентировок и мощностей тектонических нарушений, а также жил и прожилков в кернах структурных скважин в пределах месторождения Дразное;

- замерах ориентировок более 250 тектонических трещин и элементов залегания слоистости вмещающих пород, а также тектонических нарушений, жил и прожилков в пределах карьера на месторождении Дразное;

- каменным материалом, отобранным преимущественно из рудных интервалов, в том числе 47 ориентированными и неориентированными штуфными образцами, для которых методом пробирной плавки с гравиметрическим окончанием оценено содержание золота, а методом гидростатического взвешивания определен объемный вес образцов;

- результатами исследований газово-жидких включений рудообразующих флюидов в жильном кварце месторождения Дразное, изученных в 24 плоско-полированных пластинках из рудных жил.

#### Методы и объекты исследования.

Микротермометрические исследования флюидных включений (рис. 12) в кварце рудных жил и прожилков проводились в лаборатории геохимии ИГЕМ РАН (аналитик д.г.-м.н. В.Ю. Прокофьев) с

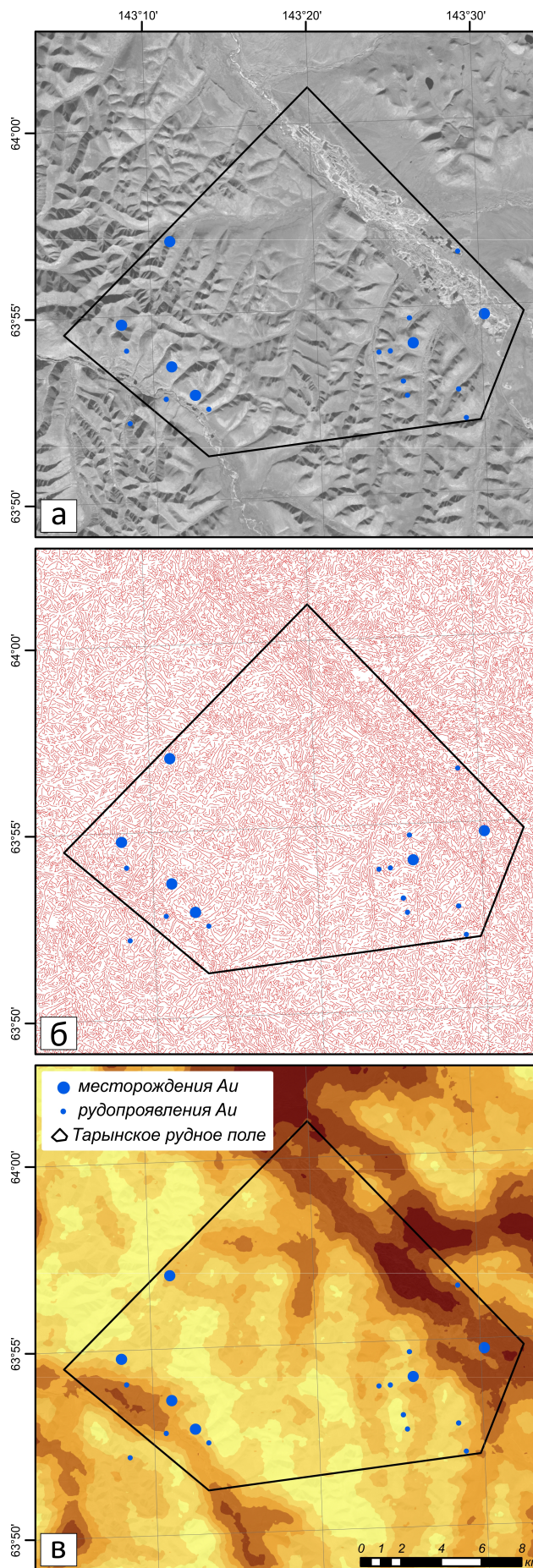


Рис. 1. Линейные объекты (б), выделенные на панхроматическом изображении Landsat 8 OLI (а) и карта их удельной плотности (в).

использованием измерительного комплекса, позволяющего в режиме реального времени производить измерения температуры фазовых переходов внутри включений в температурном интервале от  $-196^{\circ}$  до  $+600^{\circ}\text{C}$ , наблюдать за ними при больших увеличениях и получать электронные микрофотографии.

Солевой состав растворов определялся по значениям температуры эвтектики [Борисенко, 1977]. Концентрация солей в растворе включений устанавливалась по температуре плавления газогидратов [Collins, 1979]. Концентрация углекислоты и метана в растворе оценивалась также на основе объемных соотношений фаз и плотности углекислоты и метана в газовой фазе. Оценка давления для гетерогенного флюида проводилась по пересечению изохоры и изотермы. Оценка концентрации солей и давления флюида проводилась с использованием программного обеспечения FLINCOR [Brown, 1989]. В рамках работы проанализированы 119 индивидуальных флюидных включений.

Обработка материалов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) произведена в среде ГИС ESRI ArcGIS, PCI Geomatica Focus и LESSA. Технология LESSA (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis), используемая для линеamentного анализа, позволяет в едином ключе анализировать ориентационные свойства совокупностей пикселей на растровых изображениях [Златопольский, 2008]. Измерение ориентационных характеристик в LESSA производится путем выявления прямолинейных объектов (штрихов) – спрямленных границ полутоновых областей в изображении (рис. 1б), а направление штриха определяется в каждой его точке (пикселе).

Каждому сегменту штриха в виде индивидуального атрибута был присвоен истинный азимут его простираия, на основе чего были построены карты относительных плотностей линеamentов (рис. 1в).

Полученные данные были сопоставлены с результатами анализа стереограмм замеров трещин в естественных обнажениях и в ориентированном керне разведочных структурных скважин (рис. 2).

Массовое трехмерное моделирование зон развития жил и прожилков с целью изучения их геолого-структурной позиции произведено в среде ГИС Micromine. В

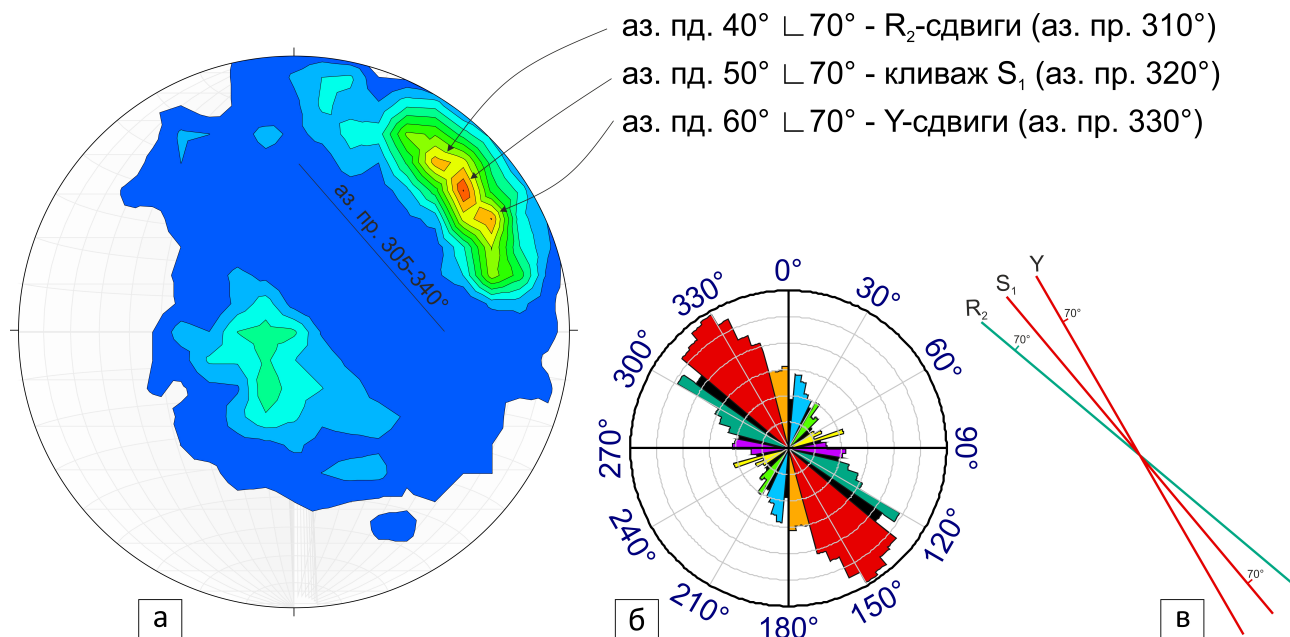


Рис. 2. Стереогамма трещиноватости (верхняя полусфера, 1505 замеров) участка Террасовый по результатам документации ориентированного керна (а), роза-диаграмма трещиноватости в долине р. Б. Тарын по результатам линеamentного анализа фотографий коренных обнажений (б), интерпретация роли систем трещин, наблюдаемых на стереогамме слева (в).

качестве основы для модели зон прожилкования была использована база данных замеров ориентировки структурных элементов, сформированная в процессе геолого-структурной документации ориентированного керна. База данных содержит результаты нескольких тысяч замеров, на основе которых восстанавливается пространственное положение прожилков и жил в естественном залегании, в т.ч. их ориентировка: углы  $\alpha$  и  $\beta$  [Call et al., 1982], а также величина истинной мощности прожилков или жил.

По результатам измерения условных углов ориентировки прожилков в керне: углов их наклона по отношению к оси керна ( $\alpha$ ) и азимутов падения ( $\beta$ ), замеряемых по образующей керна в плоскости его поперечного сечения по часовой стрелке от условного нулевого азимута – линии «низа» керна, а также с учетом данных инклинометрии скважин в среде ГГИС Micromine были обработаны результаты структурных замеров: рассчитаны величины истинных углов и азимутов падения прожилков. Такое преобразование производится для координат каждой из трех координатных осей по формулам:

$$\begin{aligned}x_1 &= x + 0.5M \times \cos(DIP - 90) \times \cos(AZ - 90), \\y_1 &= y + 0.5M \times \sin(AZ - 90) \times \cos(DIP + 90), \\z_1 &= z + 0.5M \times \cos(DIP), \\x_2 &= x - 0.5M \times \cos(-DIP - 90) \times \cos(-AZ - 90), \\y_2 &= y + 0.5M \times \sin(AZ - 90) \times \cos(-DIP + 90), \\z_2 &= z - 0.5M \times \cos(DIP),\end{aligned}$$

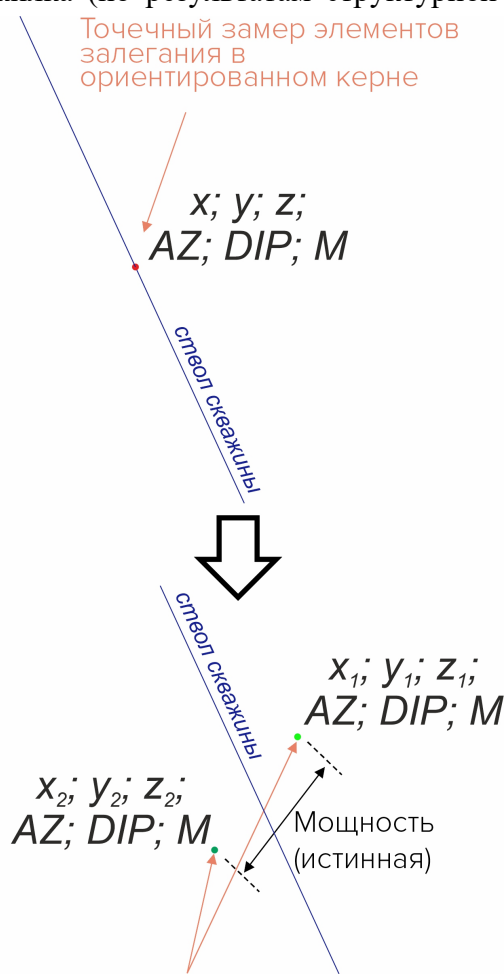
где,  $x_1, y_1, z_1$  – координаты центра верхнего контакта,  $x_2, y_2, z_2$  – координаты центра нижнего контакта,  $x, y, z$  – координаты центра прожилка (по результатам структурной документации керна),  $M$  – истинная мощность прожилка или жилы в единицах измерения координат (метры),  $DIP$  –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

Путем данного преобразования для каждого замера было рассчитано положение двух точек на расстоянии, равном половине истинной мощности прожилка от точечного замера в направлении, перпендикулярном азимутам падения и простирания (рис. 3).

На следующем этапе вдоль ствола скважины производилось моделирование ограничивающего цилиндра с заданным радиусом. Подобный цилиндр играл роль ограничивающей поверхности для контактов жил. При ограничении обеих плоскостей контактов и данного цилиндра образуется замкнутое в объеме тело жилы или прожилка (рис. 4).

Присвоение атрибутов содержания  $Au$ , а также истинной мощности моделируемых прожилков и жил производилось на основании результатов геолого-структурной документации и опробования соответствующих интервалов керна.

Конечным результатом вышеописанных построений является объемная модель штокверковой зоны, включающей многочисленные объемные тела жил и прожилков, обладающих



Верхний и нижний контакты жилы, смещенные от точечного замера ортогонально падению на половину мощности

Рис. 3. Методика моделирования контактов и объемов жил. Пояснения см. в тексте.

элементами залегания и истинной мощностью, указанными в базе данных структурных элементов.

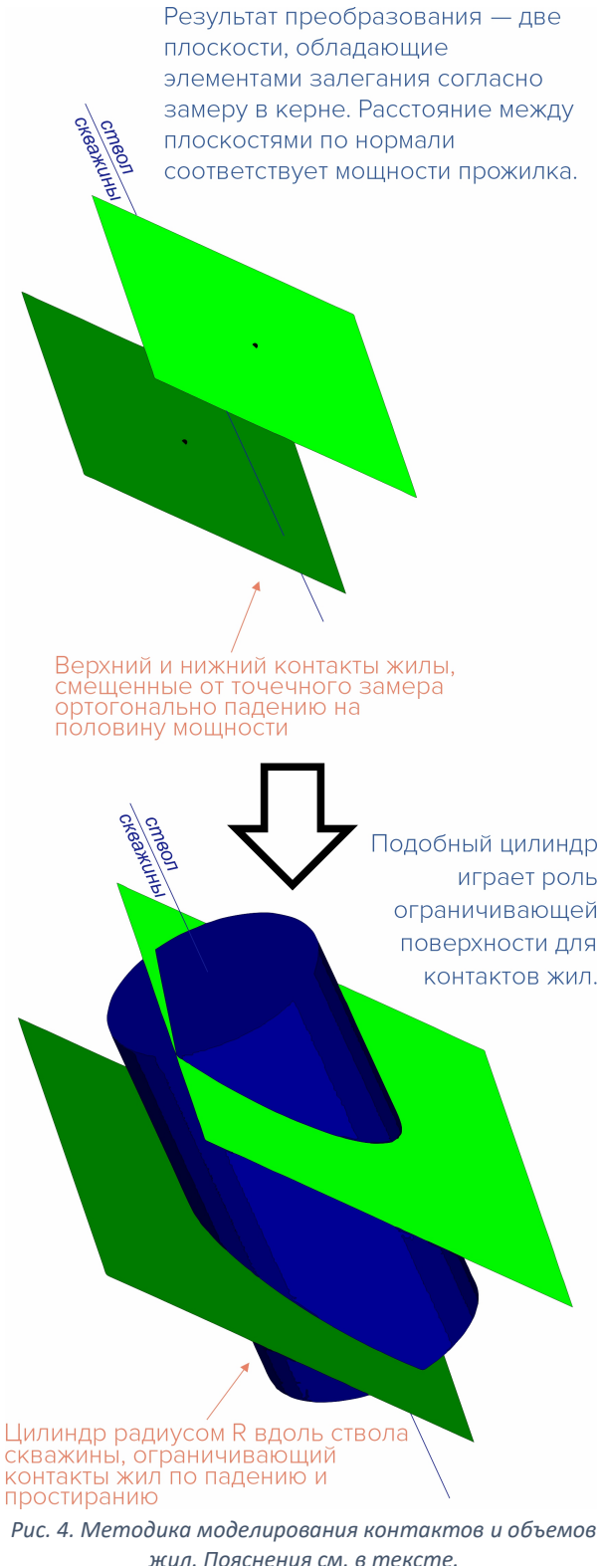
Проведен анализ пространственной ориентировки кварц-сульфидных прожилков в керне разведочных скважин. Построены диаграммы зависимости «мощность–содержание–ориентировка» (рис. 8) на основе прямоугольной диаграммы-матрицы в осях координат «азимут падения – угол падения», впервые предложенной П.Н. Николаевым [Николаев, 1977, 1992]. Диаграмма представляет собой своего рода «развертку» общепринятой круговой стереограммы, где вдоль горизонтальной оси слева направо отсчитывается азимут падения жилы или прожилка (0–360°), а по вертикальной оси снизу вверх,

соответственно, его угол падения (0–90°). Определены ориентировки плотностных максимумов систем кварцевых прожилков, выделены системы жильно-прожилковых образований, характеризующиеся максимальными мощностью и содержанием золота.

Анализ содержания золота методом пробирной плавки с гравиметрическим окончанием проведен в лаборатории АО «СЖС Восток Лимитед» в г. Чите.

*Научная новизна работы.* Задача, поставленная в диссертации, не является абсолютно новой. Однако ее решение на основе комплекса современных методов исследований позволило получить новые высокоточные данные как об особенностях строения, так и об истории формирования структуры и рудогенеза Тарынского золоторудного поля. Установлено, что структура рудного поля определила основные закономерности размещения золотоносных штокверковых тел и крупных жил. При этом современная структура, в свою очередь, является результатом продолжительной тектонической эволюции. Изучение внутреннего строения рудных жил разной ориентировки и взаимоотношений между ними дало возможность восстановить динамико-кинематические условия их образования, этапы и стадии структурной эволюции рудного поля, а также выяснить зависимость содержания рудных компонентов от структуры жильно-штокверковых рудных тел и пространственной ориентировки отдельных жил и прожилков.

*Личный вклад автора.* Автор принимал непосредственное участие в качестве главного исполнителя на стадии разведки месторождения Дrajное и





последующей камеральной обработке (построение структурно-геологической модели месторождения и подсчет запасов металла). Автором самостоятельно проведен линеаментный анализ всей территории ТЗРП, выполнены работы по массовому трехмерному моделированию гидротермальных жильно-прожилковых образований; им реконструирована этапность формирования структуры рудного поля, составлена геолого-структурная схема месторождения Дрожное, адаптирован механизм транспрессии применительно к Адыча-Тарынскому разлому. При его активном участии выполнены исследования газово-жидких включений в кристаллах кварца рудных жил и прожилков.

*Апробация результатов.* Результаты работ автора были представлены на международных и всероссийских конференциях и совещаниях: Ломоносовские чтения-2016 (международная конференция, Москва, 2016); Конференция пользователей MICROMINE 2017 (международная конференция, Москва, 2017); Ломоносов-2018 (международный молодежный научный форум, Москва, 2018); Конференция пользователей MICROMINE 2018 (международная конференция, Москва, 2018); Ломоносов-2019 (международный молодежный научный форум, Москва, 2019); ГеоЕвразия-2019: Современные методы изучения и освоения недр Евразии (международная геолого-геофизическая конференция и выставка, Москва, 2019); ГеоЕвразия-2020: Современные технологии изучения и освоение недр Евразии (международная геолого-геофизическая конференция и выставка, Москва, 2020); Ломоносов-2020 (международный молодежный научный форум, Москва, 2020); ГеоЕвразия-2021: Геологоразведка в современных реалиях (международная геолого-геофизическая конференция и выставка, Москва, 2021).

*Публикации.* Результаты исследований опубликованы в 9 работах: 3 статьи опубликованы в журналах Scopus, Web of Science (WoS), RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности; 6 – в других сборниках и журналах.

*Объем и структура работы.* Диссертация объемом 149 страниц состоит из введения, 5 глав и заключения. Первая глава содержит анализ достижений и проблем, которые обозначились в изучении ТЗРП и требуют разрешения для прогнозирования и оптимизации поисковых работ. Вторая глава включает описание геологического строения ТЗРП, в т.ч. тектонической позиции рудного поля, стратиграфии слагающих его стратифицированных образований, магматизма, а также краткие сведения о полезных ископаемых рассматриваемой территории. Третья и четвертая главы посвящены изучению рудоносной структуры ТЗРП, истории ее формирования и определению места в этой истории процессов рудообразования. Последняя, пятая глава освещает условия формирования гидротермальных жильно-прожилковых образований ТЗРП по результатам термобарогеохимических исследований флюидных включений в кристаллах кварца. Работа включает 63 иллюстрации, 2 таблицы, список литературы из 145 наименований и 1 текстовое приложение на 8 страницах.

*Благодарности.* Проведению работы способствовали результаты предыдущих многолетних научных изысканий в области структурных исследований ТЗРП, проведенных учеными ВИРГУ (Билибин И.Н., Лещенко В.Я.), ВИГРЭ (Данилов А.К.), ГУГПП «ВИЭ» (Крючков А.В., Узюнкоян А.А.), ЦНИГРИ (Аристов В.В.), СПбГУ (Худoley А.К.), ООО «ИГТ» (Читалин А.Ф.) и др.

Автор выражает признательность своему научному руководителю – А.Л. Дергачеву за помощь в выборе направления исследований и ценные замечания в процессе проведения работы. Автор благодарит В.И. Старостина за пристальное внимание к работе; П.Л. Тихомирова – за разностороннюю помощь, справедливую критику и ценные консультации; В.Ю. Прокофьева – за помощь в проведении термобарогеохимических

исследований и исчерпывающие консультации; Г.А. Миловского – за консультации по вопросам интерпретации материалов ДЗЗ; А.А. Бурмистрова, М.А. Богуславского и других сотрудников кафедры геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых – за добрые советы и ценные замечания; главного геолога АО «ТЗРК» О.А. Михайлова – за предоставление необходимых для проведения исследований геологических материалов месторождения Дрожное. Особую благодарность автор выражает Андрею Федоровичу Читалину – своему наставнику и главному геологу ООО «Институт геотехнологий» – за неоценимый вклад в выполнение работы.

*Положения, выносимые на защиту:*

1) Современная структура Тарынского золоторудного поля явилась результатом длительного трехэтапного деформационного события, эволюции тектонофизической обстановки с последовательным формированием трех структурных парагенезов при унаследованном развитии важнейших структур ранних этапов.

2) Формирование золотоносных кварц-карбонатных штокверков происходило в локальном взбросовом поле напряжений в условиях субгоризонтального сжатия с СЗ и ЮВ и субвертикального растяжения. Наиболее мощные и богатые жилы СВ простирания, полого падающие на СЗ и ЮВ, выполняли трещины скалывания, которые оперяли антитетические сдвиги Риделя ( $R'_2$ ), поперечные к зоне Адыча-Тарынского разлома, и характеризовались (сдвиго-) взбросовой кинематикой.

3) Формирование золотоносных кварцевых жил и прожилков происходило полистадийно, из гетерогенных слабо концентрированных углекислотно-водных флюидов, преимущественно в мезотермальных условиях (180–335°C, 0.8–2.5 кбар) на глубинах от 3 до 9 км в условиях падения литостатического давления при подъеме флюидов и тектонических подвижках по рудоконтролирующим нарушениям.

## ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

### ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ ТАРЫНСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ

#### (1-е защищаемое положение)<sup>1</sup>

Согласно схеме структурно-фациального районирования Северо-Востока Азии [Дагис и др., 1979], рассматриваемая в работе территория соответствует Яно-Колымской складчатой системе (ЯКСС), главные складчатые структуры которой имеют северо-западную ориентировку, представленной пермскими, триасовыми и нижнеюрскими гемипелагическими и пелагическими образованиями высокой мощности: аргиллитами, алевролитами и песчаниками.

ЯКСС расположена между Сибирской платформой, Предверхоанским прогибом и Охотским массивом с одной стороны и Колымо-Омолонским супертеррейном с другой.

---

<sup>1</sup> При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. **Сивков Д.В.** Автоматизированный линеаментный анализ территории золоторудного поля с использованием данных дистанционного зондирования поверхности Земли // Материалы Международного молодежного научного форума «Ломоносов-2019» — М.: МАКС Пресс, 2019. — [Электронный ресурс] (0,13 п.л.).

2. **Сивков Д.В.** Результаты линеаментного анализа территории Тарынского золоторудного поля с использованием данных дистанционного зондирования поверхности Земли // Труды III Международной геолого-геофизической конференции и выставки «ГеоЕвразия 2020. Современные технологии изучения и освоение недр Евразии». — Т. 3. — ООО ПолиПРЕСС Тверь, 2020. — С. 61–64 (0,25 п.л.).

3. **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. № 1. С. 3–19. Scopus. (1,06 п.л., авторский вклад – 80 %). Импакт-фактор РИНЦ, 2019: 0,916.

По структурным признакам территория ЯКСС отчетливо делится на три продольные зоны: 1) Верхоянскую зону линейной складчатости; 2) Эльги-Кулинскую зону прерывистой и брахиморфной складчатости; 3) Адыча-Бохапчинскую зону линейной складчатости

Тарынское золоторудное поле находится на границе Эльги-Кулинской и Адыча-Бохапчинской зон, на южном продолжении разделяющего их регионального Адыча-Тарынского глубинного разлома СЗ простирания.

В восточной части ТЗРП (рис. 5) с северо-запада на юго-восток прослеживается протяженная зона регионального Адыча-Тарынского разлома (АТР). Зона разлома представлена сближенными субпараллельными разрывными нарушениями, в т.ч. зонами дробления и расщепления мощностью до нескольких десятков метров и протяженностью в первые километры. В долине р. Большой Тарын обнажаются коренные породы различного залегания, преимущественно СЗ простирания. Складки терригенных пород верхнего триаса характеризуются острыми замками и небольшим размахом крыльев [Крючков и др., 2010ф].

Толща смятых в крупные складки пород пронизана зонами трещиноватости и мелкой складчатости мощностью в несколько метров. В пелитовых разностях пород интенсивно развит сквозной кливаж осевой поверхности, на крыльях складок зачастую совпадающий по ориентировке со слоистостью пород.

Распространенные в пределах рудного поля многочисленные тектонические нарушения разделяются на дорудные, синрудные и пострудные.

Структурными исследованиями установлено, что дорудные нарушения представлены преимущественно левосторонними взбросами и сдвиго-взбросами субширотного простирания, а также сопряженными правосторонними сдвиго-взбросами субмеридионального простирания, которые на рудном и пострудном этапах были активизированы и усложнены. Структурный парагенез дорудных тектонических нарушений также включает разнопорядковые складки ( $F_1$ ) СЗ простирания с пологими шарнирами и соскладчатый субвертикальный осевой кливаж ( $S_1$ ) СЗ простирания.

Синрудные тектонические нарушения зачастую характеризуются сдвиго-взбросовым характером перемещений блоков. Это, как правило, вязкие разрывы с SC-тектонитами: субпродольные к кливажу первого этапа левые (взбросо-)сдвиги СЗ простирания и поперечные к кливажу правые (взбросо-)сдвиги СВ простирания. Структурный парагенез синрудных тектонических нарушений включает разнопорядковые наложенные складки ( $F_2$ ) меридионального и СВ простирания с пологими и округлыми шарнирами, развитый редко и локально соскладчатый субвертикальный осевой кливаж ( $S_2$ ) СВ простирания, а также асимметричные складки волочения в зоне АТР.

Пострудные нарушения характеризуются, как правило, крутыми (до субвертикальных) углами падения, на крыльях складок ориентированы субсогласно слоистости, и диагностируются по наличию примазок глинистых минералов на зеркалах скольжения [Читалин и др., 2016ф, 2017ф].

Поскольку в силу слабой обнаженности рассматриваемой территории применение анализа разломной тектоники на основе прямых замеров в коренных обнажениях не представляется возможным, в рамках работы в качестве основы для данного анализа приняты материалы ДЗЗ.

Как правило, до-, син- и пострудные тектонические нарушения выражены относительно прямыми морфологическими линиями в современном рельефе ТЗРП.

Результаты автоматизированного выделения линейных объектов в пределах Тарынского рудного поля свидетельствуют о наличии максимумов относительной плотности линеаментов (рис. 1в), выстраивающихся в линейные «цепочки» и образующих некоторые тренды, маркирующие крупные линейные геологические объекты. Результаты детальных структурных наблюдений в бортах и полотно карьера, а также в коренных обнажениях подтвердили предположения о тектонической природе линеаментов как тектонических разрывов.

Тарынское рудное поле расположено между двумя крупными зонами разрывов северо-западного простирания, которые на материалах ДЗЗ дешифрируются как участки сгущения линеаментов. Крупные линеаменты в долине р. Б. Тарын соответствуют Адыча-Тарынской зоне разломов. Крупные линеаменты в долине р. М. Тарын (юго-западный фланг Тарынского рудного поля) соответствуют нарушениям Мало-Тарынской зоны разломов, которая рассматривается как ветвь АТР [Крючков, 2005ф]. В центральной части рудного поля преобладают линеаменты среднего размера с простиранием, изменяющимся от субмеридионального до северо-восточного. Некоторым из них соответствуют долины ручьев (Пиль, Малютка, Дора и др.).

Для выяснения природы выделенных линеаментов была проведена корреляция пространственного положения линеаментов с результатами аэрогеофизической электромагнитной съёмки. Положение наиболее крупных линеаментов (в долинах рек Большой и Малый Тарын) совпадает с положением линейных высокопроводящих областей (отрицательных аномалий сопротивления). Известно, что в пределах тектонических нарушений на участках Дrajный, Перешеек и Террасовый проявлена богатая кварц-сульфидная минерализация, сопровождающая золотое оруденение. Если понижение сопротивления в долинах рек на глубинах до 50 м может быть обусловлено обводненностью грунта в непосредственной близости к водотоку, то на больших глубинах (до 200 м) оно может быть объяснено присутствием обильной сульфидной минерализации, главным образом, пиритовой. Тем самым, предполагается, что совпадающие по своему положению с крупными линеаментами минимумы сопротивления являются тектоническими нарушениями с проявлением сульфидной минерализации [Пустозеров и др., 2014ф].

### **Геолого-структурная эволюция Тарынского рудного поля**

История эволюции структур ТЗРП реконструируется по результатам линеаментного анализа, интерпретации трещиноватости в обнажениях в долине реки Большой Тарын и результатов геолого-структурной документации ориентированного керна.

Для верификации полученных результатов были использованы фотографии коренных обнажений в долине р. Б.Тарын. Для их анализа был применен алгоритм, аналогичный тому, что применялся для анализа космоснимков. С его помощью удалось выделить множество разноориентированных линейных элементов – штрихов, для статистической оценки ориентировки которых были рассчитаны роза-диаграммы. По результатам анализа диаграмм были определены основные направления простирания штрихов в долине реки Б.Тарын.

При интерпретации полученных результатов использовались представления о механизме чистого сдвига, изначально предложенном Э.М. Андерсоном [Anderson, 1905], и предложенной В. Риделем [Riedel, 1929] модели для объяснения ориентировки разломов в однородной среде при преобладании тангенциальных напряжений.

# УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Четвертичная система

Юрская система

Трассовая система  
Верхняя часть

Нижнеюрские отложения

Нижний отдел

Верхнеюрские отложения

Верхняя толща

Нижняя толща

Средняя толща

Нижняя толща

Карнирский ярус

Алевролиты с редкими прослоями песчаников

Контактные роговики

Геологические границы

Разрывные нарушения

Главные:  
а - достоверные, б - предполагаемые

Второстепенные:  
а - достоверные, б - предполагаемые

Полезные ископаемые

Месторождения средне (в), мелкие (б) и рудопроявления (в) золоторудные

золото-сурьмяные молибденовые

Современное звено. Аллювиальные отложения.  
Галечники, гравий, глыбы, щебень, песок, глина

Верхнее звено. Аллювиальные галечники, валуны, гравий, пески, суглинки, илы, торф

Среднее звено. Аллювиальные галечники, гравий, суглинки, илы

Биотитовые и роговикоманково-биотитовые гранодиориты (гбк) и биотитовые граниты (гк)

Дайки диоритовых (дт), андезитовых (ат), и диабазовых (дб) порфиритов

Дайки риолитовых порфиритов

Нижний отдел. Геттангский и синеморский ярусы переслаивенные.

Верхнеюрские отложения. Алевролиты, редкие прослои песчаников

Верхняя толща. Переслаивание песчаников и алевролитов;

Нижняя толща. Переслаивание песчаников и алевролитов

Средняя толща. Песчанники, алевролиты

Нижняя толща. Переслаивание песчаников и алевролитов

Карнирский ярус. Алевролиты

Алевролиты с редкими прослоями песчаников

Контактные роговики

Геологические границы

Разрывные нарушения

Главные:  
а - достоверные, б - предполагаемые

Второстепенные:  
а - достоверные, б - предполагаемые

Полезные ископаемые

Месторождения средне (в), мелкие (б) и рудопроявления (в) золоторудные

золото-сурьмяные молибденовые

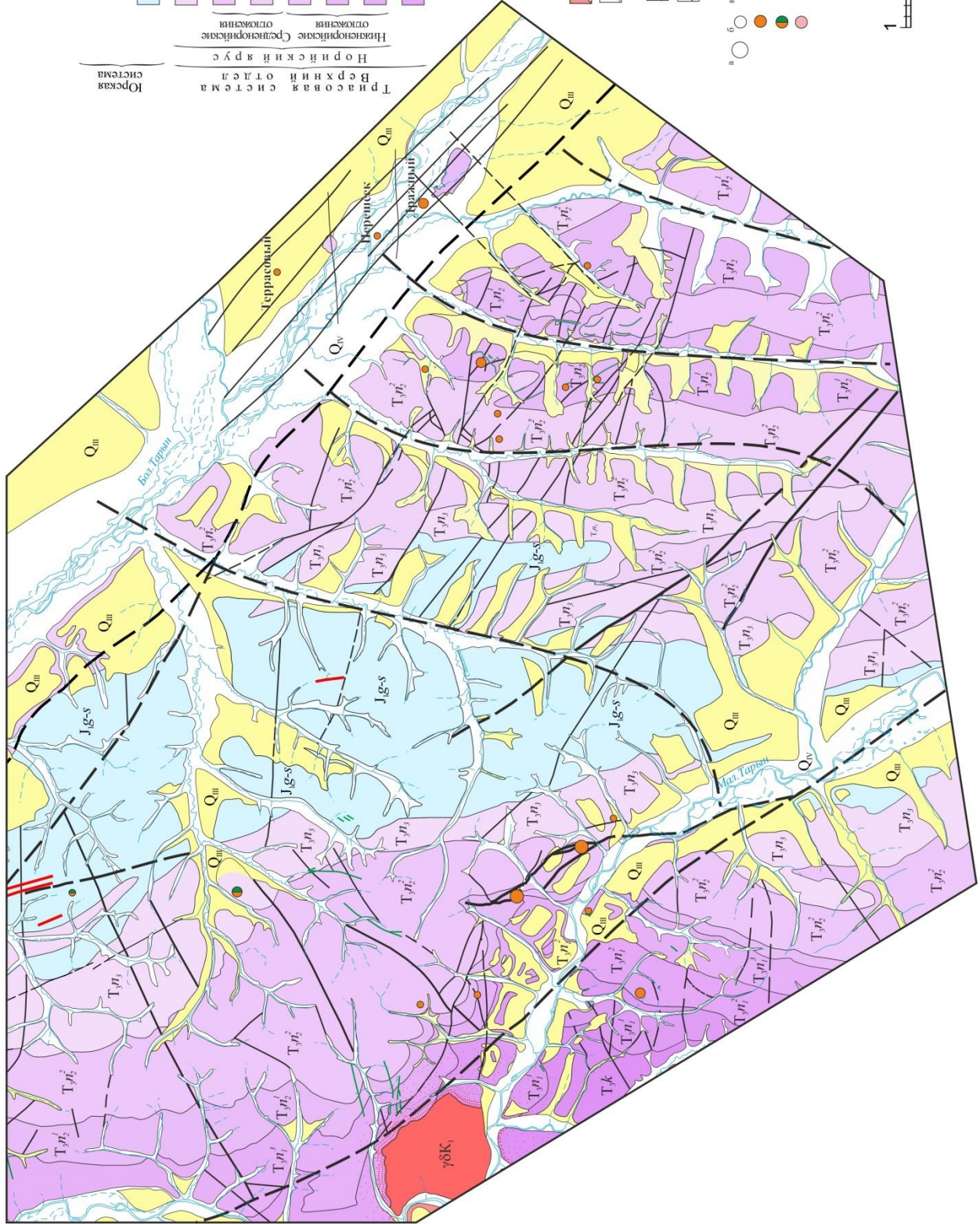


Рис. 5. Геологическая карта Тарынского рудного поля по [Крючков и др., 2010ф] с дополнениями

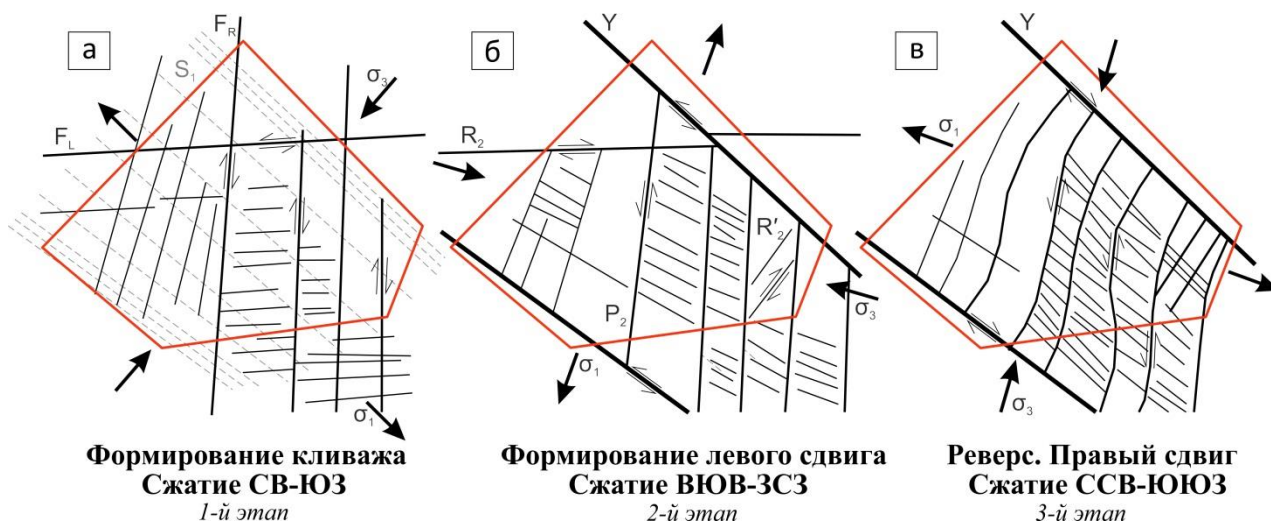


Рис. 6. Схема этапного формирования современной структуры Тарынского рудного поля

На основании данных о взаимоотношениях различных структурных элементов предполагается, что формирование структур ТЗРП происходило в три этапа (рис. 6).

На первом этапе ось сжатия регионального поля напряжений была ориентирована по азимуту  $50^\circ$ , в результате чего сформировались множественные трещины кливажа осевой поверхности северо-западного простирания ( $S_1$ ) и, предположительно, трещины отрыва, перпендикулярные им.

На втором этапе произошла смена ориентировки оси максимального сжатия регионального поля напряжений на ВЮВ-ЗСЗ (аз. пр.  $105^\circ$ ) и заложилась зона Адыча-Тарынского разлома, сонаправленная трещинам кливажа осевой поверхности первого этапа, синтетические ( $R_2$ ) и антитетические ( $R'_2$ ) сдвиги Риделя, а также синтетические вторичные сдвиги Риделя ( $P_2$ ). В данном поле напряжений также сформировались разнопорядковые наложенные складки ( $F_2$ ) меридионального и СВ-простирания с пологими и округлыми шарнирами, присдвиговые сигмоиды, а также асимметричные складки волочения в зоне АТР. Наибольшее количество наложенных складок  $F_2$  задокументировано в замках складок первого порядка  $F_1$ , осложнённых кливажными разломами.

При анализе стереограмм трещин, задокументированных в ориентированном керне на одном из ближайших к обнажению участков месторождения, определены четыре максимума (рис. 2), один из которых (расположенный в центральной части стереограммы) отражает систему пологих трещин, которые не могут быть выявлены на спутниковых снимках. Остальные максимумы соответствуют трем крутопадающим системам трещин СЗ-ЮВ простирания: первая система соответствует синтетическим сдвигам Риделя второго этапа ( $R_2$ ); вторая, вероятнее всего, соответствует трещинам кливажа ( $S_1$ ); третья – генеральным сдвигам ( $Y$ ), параллельным простиранию зоны АТР.

На третьем этапе левосторонние движения по АТР сменились правосторонними. О реверсивном характере движений свидетельствует морфология линеаментов среднего размера, примыкающих к крупным линеаментам в долинах рек Большой и Малый Тарын (а именно, их изгиб, нехарактерный для левосдвиговых движений по главным разломам). Однако, судя по ориентировке подавляющего количества штрихов в центральной части ТЗРП, интенсивность правосдвиговых движений на третьем этапе ниже, чем левосдвиговых на предыдущем этапе.

Результаты реконструкции эволюции геологической структуры ТЗРП (рис. 6) позволяют сформулировать 1-е защищаемое положение: **современная структура**

*Тарынского золоторудного поля явилась результатом длительного трехэтапного деформационного события, эволюции тектонофизической обстановки с последовательным формированием трех структурных парагенезов при унаследованном развитии важнейших структур ранних этапов.*

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗОЛОТОНОСНЫХ ПРОЖИЛКОВ В ШТОКВЕРКАХ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДРАЖНОЕ (2-е защищаемое положение)<sup>2</sup>

Месторождение Дражное, являющееся наиболее крупным золоторудным месторождением в пределах ТЗРП, приурочено к северо-восточному крылу Тарынской синклинали, сложенному терригенными образованиями верхнего триаса.

Складчатая структура вмещающих пород характеризуется северо-западным простиранием слоистости с субвертикальным падением крыльев изоклинальных складок и пологими шарнирами этих складок. Залегание пород осложнено серией S-образных в плане флексурных изгибов, порожденных локальными полями напряжения в зоне АТР (рис. 7).

В пределах месторождения в осадочной толще выявлены серии крутопадающих минерализованных зон в тектонических нарушениях северо-западного простирания, а также сопряженные с ними или секущие их наклонные (до субгоризонтальных) лентовидные в плане минерализованные зоны, вытянутые вдоль зоны АТР. Разрывные нарушения СЗ простирания контролируют также зоны интенсивной березитизации вмещающих пород.

В силу физико-механической неоднородности

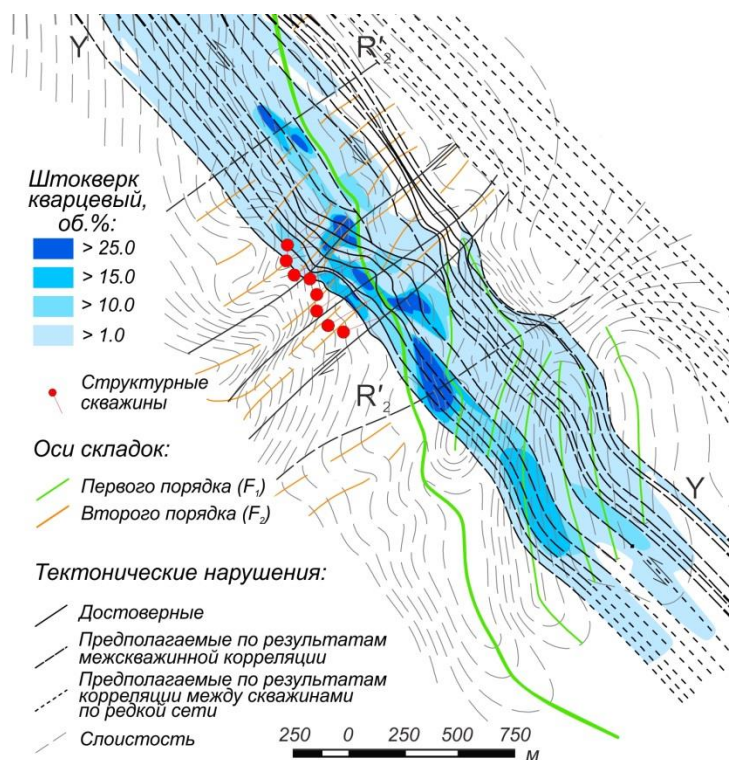


Рис. 7. Геолого-структурная карта центральной части участка Дражный.

<sup>2</sup> При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

4. Читалин А.Ф., Воскресенский К.И., Гришин Е.М., **Сивков Д.В.**, Усенко В.В., Фомичев Е.В., Чикатуева В.Ю. Структурно-кинематическая модель золоторудного месторождения Дражное // Геофизика. 2018. Вып. 3. С.106-114. RSCI. (0,56 п.л., авторский вклад – 25 %). Импакт-фактор РИНЦ, 2019: 0,377.

5. **Сивков Д.В.** Моделирование золоторудного месторождения с использованием данных структурного картирования // Материалы Международного молодежного научного форума «Ломоносов-2018» — М.: МАКС Пресс, 2018. — [Электронный ресурс] (0,06 п.л.).

6. Чикатуева В.Ю., **Сивков Д.В.**, Читалин А.Ф. Опыт использования рентгеновской микротомографии при структурных исследованиях золоторудного штоковерка месторождения Дражное (Саха (Якутия)) // Труды II Международной геолого-геофизической конференции «ГеоЕвразия 2019. Современные методы изучения и освоения недр Евразии». — Т. 1. — ООО ПолиПРЕСС Тверь, 2019. — С. 431–435 (0,25 п.л., авторский вклад – 25%).

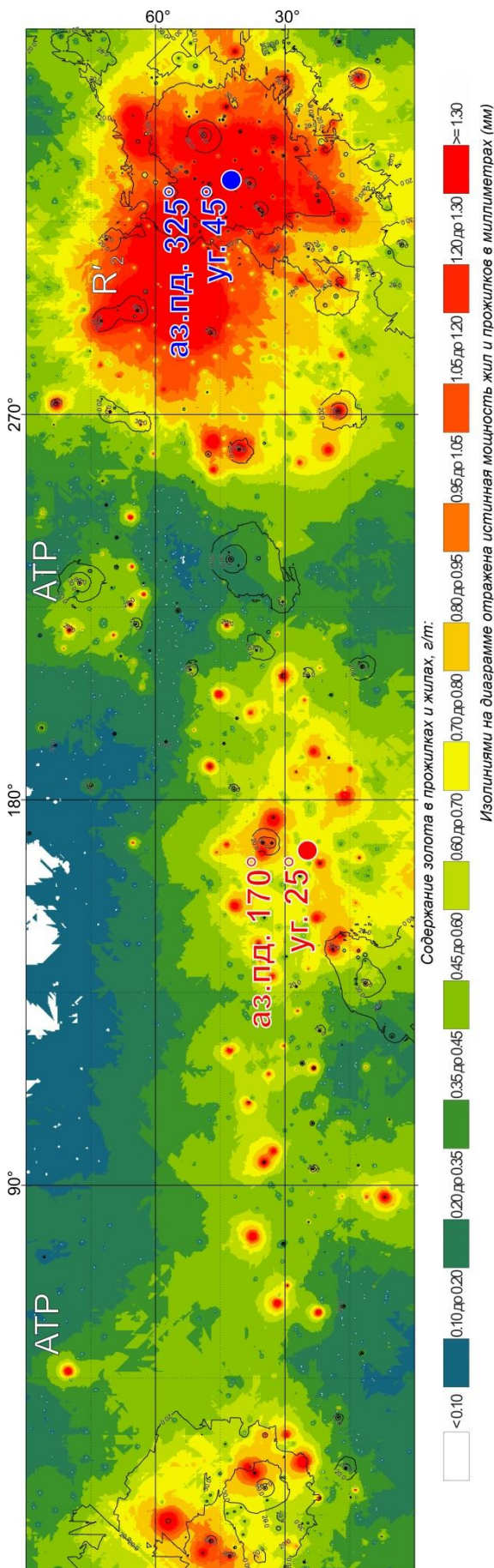


Рис. 8. Диаграмма «мощность-содержание-ориентировка» для участка Дразный (точками отмечены участки совпадения максимумов мощности и содержания Au)

осадочной толщи верхнетриасовых пород поверхности сместителей тектонических нарушений формируются с изгибами, огибая, тем самым, участки неоднородностей. Механизм сдвига на участках искривления поверхности сместителя поддерживает локальные процессы различной кинематики, включая образование надвигов и взбросов в областях локального сжатия, а также сбросов в областях локального растяжения. В частности, в пределах области динамического влияния разлома могут формироваться локальные зоны различной напряженности, отвечающие обстановкам трансензии и транспрессии, в условиях локальных растяжения и сжатия, соответственно.

Детальными геолого-структурными наблюдениями в пределах месторождения выявлены взбросы и сдвиго-взбросы СЗ простирания (У на рис. 6б, рис. 7), наследующие зоны кливажа осевой поверхности первого этапа деформации [Читалин и др, 2018; Сивков и др, 2020]. Они выражены зонами дробления, местами – расщепления и смятия мощностью до нескольких метров и имеют, как правило, крутое падение в северо-восточном и в юго-западном направлениях. Реже отмечаются крутопадающие правосторонние сдвиги северо-восточного простирания ( $R'_2$ ) [Аристов и др., 2006ф].

Разломы на этапе рудообразования были активизированы и контролировали формирование золотоносных кварц-сульфидных штокверков. Именно к тектоническим нарушениям СЗ простирания приурочены лентовидные в плане жильно-прожилковые зоны месторождения Дразное. Они связаны с участками интенсивной тектонизации и трещиноватости вмещающих пород в зоне АТР.

### Структура штокверков месторождения Дразное

Золотоносные штокверки месторождения Дразное имеют уплощенную изогнутую в разрезе форму и полого падают на ЮЗ и СВ, реже залегают субгоризонтально. Они соответствуют ядерным частям пологих минерализованных зон, где достигается максимальная плотность жил и прожилков и



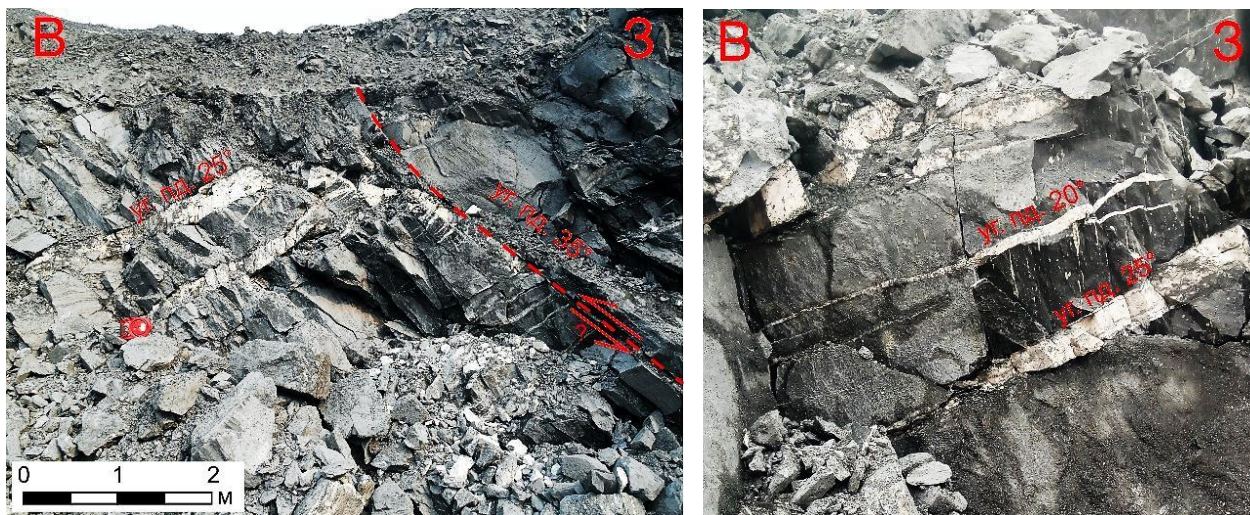


Рис. 9. Рудные прожилки в южной стенке карьера, выполнившие трещины скола и отрыва, оперяющие взброс

устанавливаются повышенные содержания золота. В единичных случаях повышенные содержания золота обнаруживаются и в крутопадающих минерализованных зонах. Внутренняя структура штокверка представлена различным количеством (в среднем 5–10% об.) сближенных кварцевых и карбонат-кварцевых прожилков лестничного, реже сетчатого и послойного типов средней мощностью до 5 см, выполняющих трещины отрыва и скола, характеризующиеся различной кинематикой.

Седловидные штокверковые рудные тела в пределах месторождения Дрожное локализованы в слабоизмененных песчанистых алевролитах. Они вытянуты вдоль зоны АТР и имеют пологонаклонное залегание (углы падения 15–45°), располагаясь в разрезе на нескольких уровнях, приурочены к пологим и наклонным зонам смятия, дробления и густой трещиноватости в интенсивно дислоцированных породах [Аристов, 2009].

Золотая минерализация максимально проявлена лишь в ядрах некоторых кварцевых штокверков, окруженных ореолами пиритизации, на участках вторичного изгибания взбросо-сдвигов СЗ-простириания более поздними поперечными складками и на пересечениях их правыми взбросо-сдвигами СВ простириания ( $R'_2$  на рис. 6б, рис. 7).

В процессе формирования рассматриваемой структуры существовавшие многочисленные разноориентированные трещины скола были частично раскрыты при субгоризонтальном сжатии и субвертикальном растяжении. При этом в процессе субвертикального растяжения формировались новые системы трещин скола и отрыва (рис. 9).

Среди них в пределах центральной части участка Дрожный доминируют две разнонаправленные системы разрывных нарушений (рис. 10): 1) аз. пд. 325°  $\angle$  45°; 2) аз. пд. 170°  $\angle$  25°. Они характеризуются высоким содержанием золота (в особенности более крутая из двух систем) и повышенной мощностью жильно-прожилковых образований (рис. 8). Эти нарушения, в основном, сыграли роль рудолокализирующих структур. Обе системы трещин скола являются оперяющими по отношению к структурам  $R'_2$ , которые, в свою очередь, выполняли роль рудораспределяющих структур, в то время как рудоподводящими, вероятно, являлись разрывные нарушения СЗ простириания (Y). В пользу этого предположения свидетельствует редкая относительно бедная золоторудная минерализация в крутопадающих минерализованных зонах СЗ простириания и богатая, относительно последних, минерализация в крутопадающих на СЗ минерализованных зонах СВ простириания.

Результаты реконструкции полей напряжений на этапе рудообразования (рис. 10) позволяют сформулировать 2-е защищаемое положение: **формирование золотоносных кварц-карбонатных штокверков происходило в локальном взбросовом поле напряжений в условиях субгоризонтального сжатия с СЗ и ЮВ и субвертикального растяжения. Наиболее мощные и богатые жилы СВ простирания, полого падающие на СЗ и ЮВ, выполняли трещины скалывания, которые оперяли антитетические сдвиги Риделя ( $R'_2$ ), поперечные к зоне Адыча-Тарынского разлома, и характеризовались (сдвиго-) взбросовой кинематикой.**

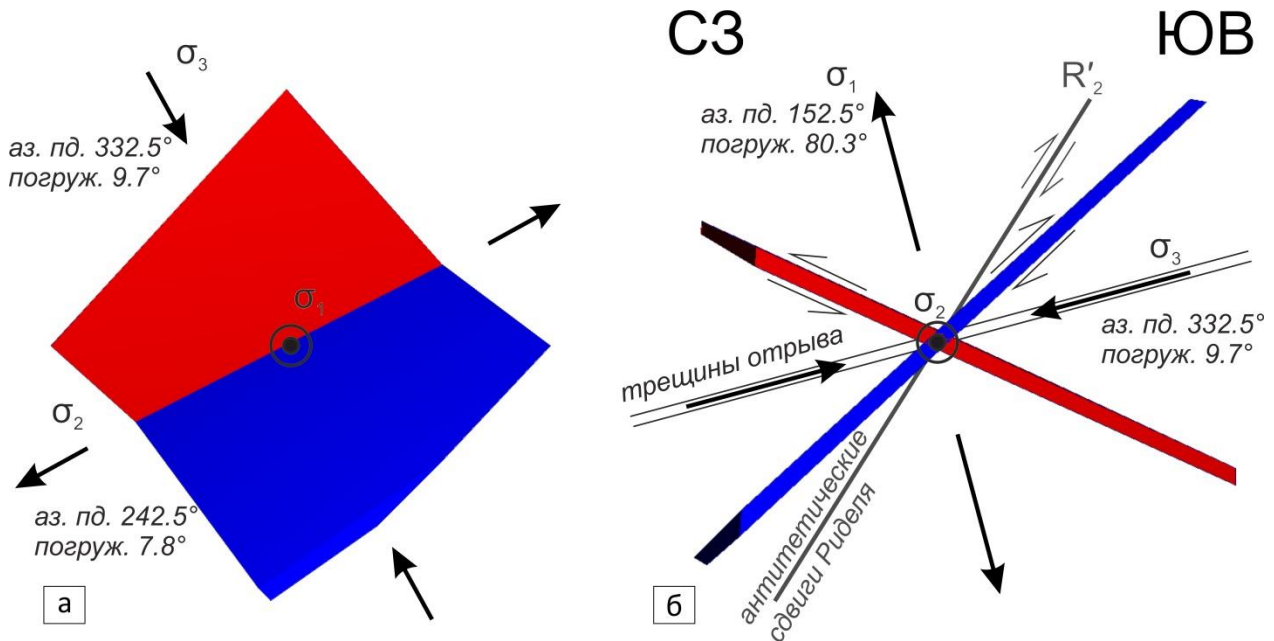


Рис. 10. Схематическая реконструкция полей напряжений на участке Дразный: а – вид сверху, б – разрез, вид на северо-восток. Синий – система жил и прожилков с элементами залегания аз. пд. 325°/45°; красный – аз. пд. 170°/25°.

### УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ГИДРОТЕРМАЛЬНО-МЕТАСОМАТИЧЕСКИХ ОБРАЗОВАНИЙ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДРАЗНОЕ (3-е защищаемое положение)<sup>3</sup>

Золоторудные тела месторождения Дразное, как правило, пространственно связаны с кварцевыми штокверками. Наиболее богатые золотом участки рудных тел в пределах штокверков тяготеют к участкам сгущения сети кварцевых жил и прожилков (где объемная доля кварцевых прожилков в породе достигает максимума, рис. 8), областям развития пологих кварцевых жил, интенсивной пиритизации и участкам развития арсенопирита.

<sup>3</sup> При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

7. Сивков Д.В. Новые данные об условиях формирования золотой минерализации месторождения Дразное (Республика Саха, Россия) // Материалы Международного молодежного научного форума «Ломоносов-2020» — М.: МАКС Пресс, 2020. — [Электронный ресурс] (0,06 п.л.).

8. Сивков Д.В. Структурно-геохимическая модель формирования штокверковых тел центральной части месторождения Дразное // Труды IV Международной геолого-геофизической конференции и выставки «ГеоЕвразия 2021. Геологоразведка в современных реалиях». — Т. 1. — ООО ПолиПРЕСС Тверь, 2021. — С. 144–147 (0,25 п.л.).

9. Сивков Д.В., Прокофьев В.Ю., Чикатуева В.Ю. Новые данные об условиях формирования золотой минерализации месторождения Дразное (Республика Саха - Якутия, Россия) по результатам исследования флюидных включений // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. — 2021. — № 1. — С. 42–49. Scopus. (0,5 п.л., авторский вклад – 70 %). Импакт-фактор РИНЦ, 2019: 0,759.

Главными минералами гидротермально-метасоматических образований, наблюдаемых во вмещающих породах в пределах месторождения, являются кварц, светлые слюды (гидросерицит, серицит), бледно-зелёный до бесцветного хлорит, анкерит и сидерит [Шудов и др., 2010ф].

По секущим взаимоотношениям прожилков, а также на основании данных о зональности некоторых из них удается выделить несколько генераций кварца [Аристов и др., 2015]. Ранние генерации нередко несут следы интенсивной перекристаллизации. Кварц поздних генераций зачастую обладает средне- и крупнокристаллической структурой.

Основными рудными минералами кварцевых штоков являются пирит, марказит, арсенопирит, второстепенными – золото, сфалерит, галенит, халькопирит, тетраэдрит. Редко встречаются пирротин, буланжерит, бурнонит, сульфоарсениды Ni и Co, рутил, ильменит, магнетит. [Читалин и др., 2017ф; Чикатуева, Ситкевич, 2019].

Зона Адыча-Тарынского разлома служила областью концентрации и разгрузки флюидов [Аристов и др., 2015]. Состав раннего флюида свидетельствует о его элизионной природе. Позднее состав флюида претерпел усложнение и характеризовался повышенной соленостью. Состав флюидов, возможно, зависит от преобладания горизонтальной (элизионные воды) или вертикальной проницаемости зоны АТР [Аристов и др., 2015].

В зарубежной литературе широкое признание получила модель формирования орогенных месторождений, в основе которой лежат представления о метаморфогенной природе флюидов (devolatilization), высвободившихся, в основном, из пород средней коры в условиях от зеленосланцевой до амфиболитовой фаций метаморфизма (рис. 11). Данная модель предполагает подъем метаморфогенного флюида с возможным осаждением рудного вещества в верхней коре [Groves et al, 2019].

Термобарогеохимическими методами исследований газожидких включений в минералах установлено, что первичные включения в кварце рудных прожилков по фазовому составу при комнатной температуре могут быть подразделены на 3 типа (рис. 12):

- 1) углекислотно-водные флюидные включения;
- 2) газовые флюидные включения, заполненные плотной углекислотой с небольшой каймой водного раствора;
- 3) двухфазовые газожидкие включения водно-

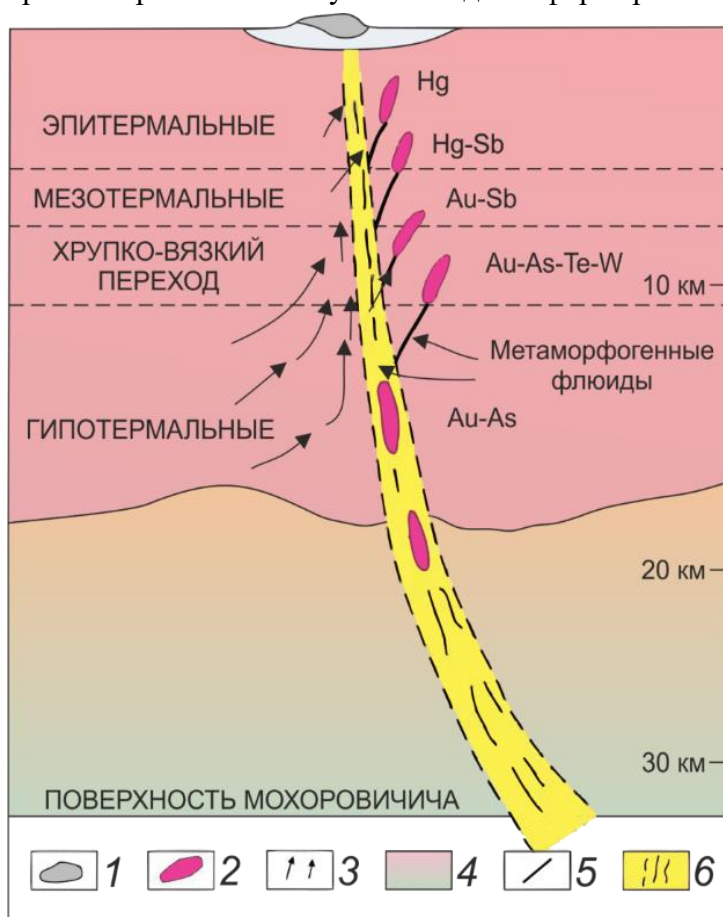


Рис. 11. Упрощенная схема общепринятой внутрикоревой модели формирования месторождений (рудно-флюидного источника для орогенных месторождений золота, по Groves et al., 2019): 1 – термальные источники, 2 – орогенные месторождения золота, 3 – потоки флюидов, 4 – золотоносные материнские горные породы, 5 – разрывные нарушения, 6 – региональные зоны сдвиговых деформаций.

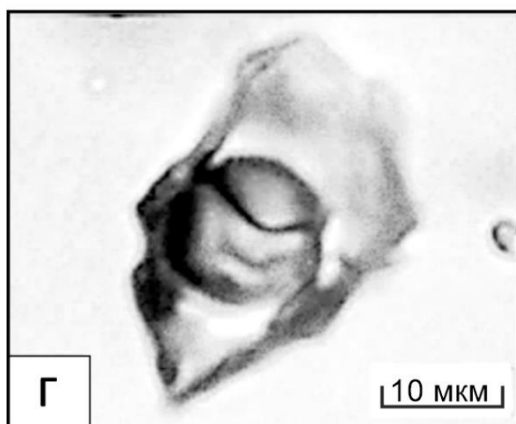
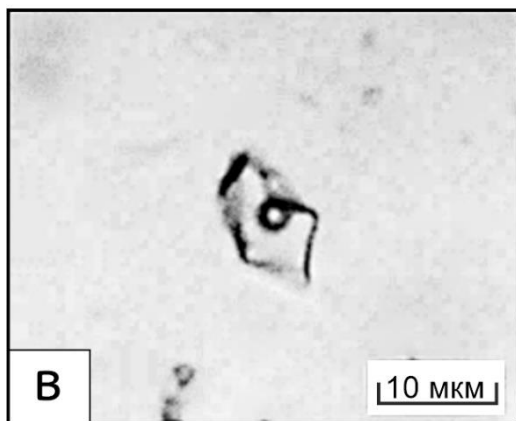
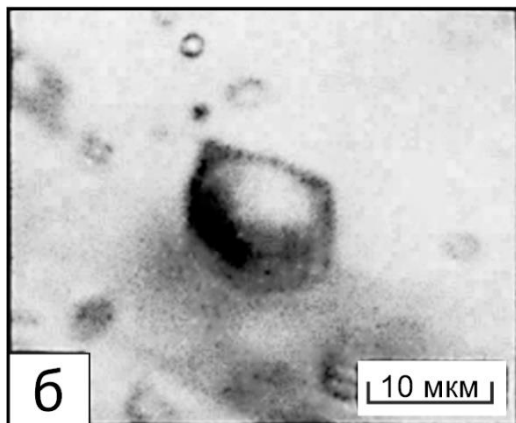
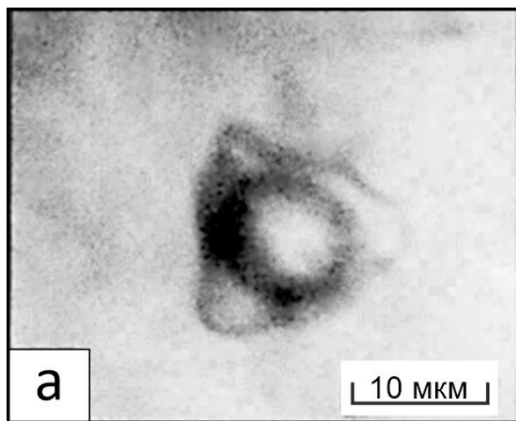


Рис. 12. Микрофотографии флюидных включений различных типов в кварце месторождения Дразное ( $t=+20^{\circ}\text{C}$ ): а – углекислотно-водные 1-го типа; б – газовые 2-го типа; в, г – двухфазовые газовой-жидкие 3-го типа.

солевых растворов. Газовые первичные флюидные включения образуют ассоциацию с углекислотно-водными, что свидетельствует об одновременном захвате включений двух типов. То есть кристаллизация кварца рудных жил происходила из гетерогенного флюида.

По данным изучения 119 индивидуальных флюидных включений, температура гомогенизации первичных и первично-вторичных флюидных включений 1-го типа в кварце изменяется в интервале от  $+239$  до  $+334^{\circ}\text{C}$ . Концентрация солей в растворе флюидных включений первого типа изменялась в диапазоне  $0.2\text{--}7.9$  мас. %-экв.  $\text{NaCl}$ , концентрация  $\text{CO}_2$  –  $2.9\text{--}6.0$  моль/кг, концентрация  $\text{CH}_4$  –  $0.7\text{--}1.2$  моль/кг раствора, а плотность углекислотно-водного флюида варьировалась в диапазоне  $0.71\text{--}0.94$  г/см<sup>3</sup>. Судя по температуре эвтектики (от  $-23$  до  $-34^{\circ}\text{C}$ ), в рудообразующих флюидах среди солей преобладали хлориды натрия, магния и железа.

Гомогенизация  $\text{CO}_2$  во флюидных включениях 2-го типа, сингенетичных включениям 1-го типа, происходит в жидкую фазу при температуре от  $+22.1$  до  $+22.7^{\circ}\text{C}$ . Плавление  $\text{CO}_2$  наблюдается в интервале температуры от  $-6.6$  до  $-58.17^{\circ}\text{C}$ . Температура плавления ниже температуры плавления чистой  $\text{CO}_2$  ( $-56.6^{\circ}\text{C}$ ) связана с наличием примесей  $\text{CH}_4$  или  $\text{N}_2$ . Плотность газовой фазы достаточно велика и варьируется от  $0.74$  до  $0.75$  г/см<sup>3</sup>.

Флюиды золоторудного месторождения Дразное, согласно результатам проведенных термобарогеохимических исследований, характеризуются низкой концентрацией солей и высокой – углекислоты. Давление флюида, оцененное для ассоциаций флюидных включений в кварце месторождения Дразное, захватывавшихся в периоды гетерогенизации флюида, изменяется от  $1280$  до  $2500$  бар в интервале температур от  $293$  до  $334^{\circ}\text{C}$ . Среднее значение объемного веса пород месторождения Дразное по  $1678$  замерам составило  $2.72$  т/м<sup>3</sup>.

На основе результатов измерений объемного веса пород и оцененной величины внешнего литостатического давления глубина формирования флюидных включений в пределах месторождения Дразное оценивается в диапазоне

$$\text{от } P_{\text{лит}} = \frac{128 \text{ МПа}}{2.72 \text{ т/м}^3 \times 9.8 \text{ м/с}^2} \sim 4.8 \text{ км до } P_{\text{лит}} = \frac{250 \text{ МПа}}{2.72 \text{ т/м}^3 \times 9.8 \text{ м/с}^2} \sim 9.4 \text{ км.}$$

Эти результаты согласуются с ранее полученными данными [Аристов и др., 2015] о формировании жильно-прожилковых образований на глубине 3–4 км ( $230 \pm 50^\circ\text{C}$ ; 900 ± 100 бар), а разница в оценках объясняется, вероятно, многостадийностью гидротермального процесса: исследованные в рамках данной работы включения могут представлять более ранние минеральные ассоциации.

Результаты термобарогеохимических исследований свидетельствуют о том, что рудообразующие флюиды месторождения Дрожное, содержащие невысокую концентрацию солей и высокую концентрацию углекислоты, типичны для флюидов орогенных жильных месторождений золота [Ridley, Diamond, 2000].

Общепризнанная генетическая модель формирования орогенных месторождений (по [Groves et al., 2019]) применительно к ТЗРП предполагает, что подъем рудоносных флюидов к поверхности по зоне региональной Адыча-Тарынской зоны разломов сопутствовал деформациям второго этапа. При снижении литостатического давления ниже давления газовой фазы флюида происходило вскипание растворов, снижение их температуры и, как следствие, выпадение металлов из раствора с формированием золотоносных кварцевых и кварц-карбонатных прожилков по раскрытым трещинам.

Предполагается, что процесс формирования золотоносной минерализации месторождения Дрожное следовал за сменой регионального поля напряжений при переходе от 1-го этапа ко 2-му, что сопровождалось переориентировкой вектора горизонтального сжатия с СВ на ЗСЗ (Читалин и др., 2018; Сивков и др., 2020); рис. 13). Результатом стало формирование рудоконтролирующей зоны левосдвиговых деформаций СЗ простирания, в пределах которой в обстановке трансензии зоны образовались складчатые и оперяющие АТР разрывные структуры, относимые к структурному парагенезу 2-го этапа деформации.

Формирование густой сети оперяющих трещин на участках сочленения рудоподводящих разломов СЗ простирания (У) с рудораспределяющими СВ простирания ( $R'_2$ ) привело к кратковременному снижению литостатического давления, что послужило дополнительным фактором рудоотложения.

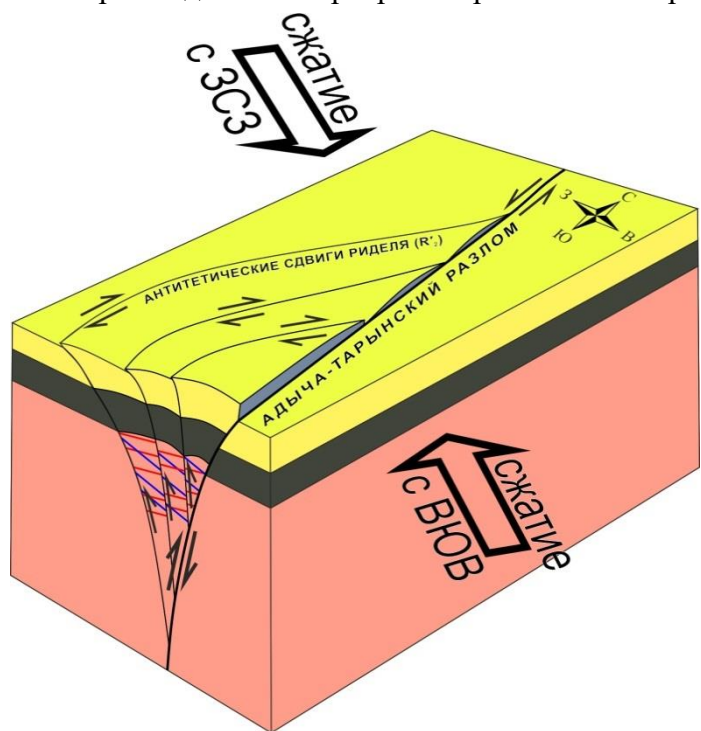


Рис. 13. Схема механизма транспрессии по [Twiss, Moores, 1992] применительно к Адыча-Тарынскому разлому и золотоносной структуре

Результаты реконструкции РТ-условий гетерогенизации золотоносного флюида месторождения Дрожное позволяют сформулировать 3-е защищаемое положение: **формирование золотоносных кварцевых жил и прожилков происходило полистадийно, из гетерогенных слабо концентрированных углекислотно-водных флюидов, преимущественно в мезотермальных условиях ( $180\text{--}335^\circ\text{C}$ , 0.8–2.5 кбар) на**

*глубинах от 3 до 9 км в условиях падения литостатического давления при подъеме флюидов и тектонических подвижках по рудоконтролирующим нарушениям.*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты обработки и интерпретации материалов дистанционного зондирования поверхности ТЗРП позволили выявить ряд важных особенностей тектонической структуры Тарынского рудного поля. В комплексе с данными исследований ориентировки текстурных элементов фотографий геологических обнажений, результатами структурного бурения, результатами детального структурного картирования бортов карьера месторождения Дrajное, а также результатами интерпретации геофизических изысканий [Пустозеров и др., 2014ф] удалось реконструировать основные этапы развития структуры рудного поля, связав их с историей рудообразования.

Автором выделены основные системы жильно-прожилковых образований, характеризующиеся большой мощностью и высокой концентрацией золота, реконструирована пространственная ориентировка осей главных тектонических напряжений, что позволило уточнить механизм формирования золотоносных кварцевых штокверков в процессе синрудного деформационного события, а также выдвинуть предположение о роли каждой из систем тектонических нарушений в формировании рудоносной структуры месторождения.

Результаты исследований газово-жидких флюидных включений в жильном кварце месторождения Дrajное в комплексе с современными представлениями о формировании орогенных месторождений золота позволили уточнить существующие представления о термобарических условиях гетерогенизации флюидов месторождения. Интерпретация полученных данных в комплексе с обширными сведениями о объемном весе пород и руд месторождения позволили реконструировать глубинные условия формирования гидротермальных кварцевых жильно-прожилковых образований, несущих золотую минерализацию, а также выдвинуть предположение о месте этого события в истории формирования рудоносных структур.

Совокупность полученных сведений позволила автору детализировать особенности геологической структуры рудного поля и реконструировать историю ее формирования, определив место в ней процессов рудообразования.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в журналах Scopus, Web of Science (WoS), RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности:

1. Читалин А.Ф., Воскресенский К.И., Гришин Е.М., **Сивков Д.В.**, Усенко В.В., Фомичев Е.В., Чикатуева В.Ю. Структурно-кинематическая модель золоторудного месторождения Дrajное // Геофизика. 2018. Вып. 3. С.106-114. RSCI. (0,56 п.л., авторский вклад – 25 %). Импакт-фактор РИНЦ, 2019: 0,377.
2. **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. № 1. С. 3–19. Scopus. (1,06 п.л., авторский вклад – 80 %). Импакт-фактор РИНЦ, 2019: 0,916.
3. **Сивков Д.В.**, Прокофьев В.Ю., Чикатуева В.Ю. Новые данные об условиях формирования золотой минерализации месторождения Дrajное (Республика Саха -

Якутия, Россия) по результатам исследования флюидных включений // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. — 2021. — № 1. — С. 42–49. Scopus. (0,5 п.л., авторский вклад – 70 %). Импакт-фактор РИНЦ, 2019: 0,759.

Иные научные публикации:

4. **Сивков Д.В.** Моделирование золоторудного месторождения с использованием данных структурного картирования // Материалы Международного молодежного научного форума «Ломоносов-2018» — М.: МАКС Пресс, 2018. — [Электронный ресурс] (0,06 п.л.).

5. **Сивков Д.В.** Автоматизированный линеаментный анализ территории золоторудного поля с использованием данных дистанционного зондирования поверхности Земли // Материалы Международного молодежного научного форума «Ломоносов-2019» — М.: МАКС Пресс, 2019. — [Электронный ресурс] (0,13 п.л.).

6. Чикатуева В.Ю., **Сивков Д.В.**, Читалин А.Ф. Опыт использования рентгеновской микротомографии при структурных исследованиях золоторудного штокверка месторождения Дrajное (Саха (Якутия)) // Труды II Международной геолого-геофизической конференции «ГеоЕвразия 2019. Современные методы изучения и освоения недр Евразии». — Т. 1. — ООО ПолиПРЕСС Тверь, 2019. — С. 431–435 (0,25 п.л., авторский вклад – 25%).

7. **Сивков Д.В.** Результаты линеаментного анализа территории Тарынского золоторудного поля с использованием данных дистанционного зондирования поверхности Земли // Труды III Международной геолого-геофизической конференции и выставки «ГеоЕвразия 2020. Современные технологии изучения и освоение недр Евразии». — Т. 3. — ООО ПолиПРЕСС Тверь, 2020. — С. 61–64 (0,25 п.л.).

8. **Сивков Д.В.** Новые данные об условиях формирования золотой минерализации месторождения Дrajное (Республика Саха, Россия) // Материалы Международного молодежного научного форума «Ломоносов-2020» — М.: МАКС Пресс, 2020. — [Электронный ресурс] (0,06 п.л.).

9. **Сивков Д.В.** Структурно-геохимическая модель формирования штокверковых тел центральной части месторождения Дrajное // Труды IV Международной геолого-геофизической конференции и выставки «ГеоЕвразия 2021. Геологоразведка в современных реалиях». — Т. 1. — ООО ПолиПРЕСС Тверь, 2021. — С. 144–147 (0,25 п.л.).