

С. Е. Знаменский, Н. М. Знаменская

ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ЗОЛОТО-СУЛЬФИДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МАГНИТОГОРСКОЙ МЕГАЗОНЫ (Ю. УРАЛ)

Золото-сульфидные месторождения в настоящее время имеют наибольшую практическую значимость и, по-видимому, в дальнейшем будут оставаться ведущим типом золотого оруденения Магнитогорской мегазоны. В башкирской части мегазоны отработано крупное по запасам золота Миндякское месторождение, разведаны и подготовлены к эксплуатации месторождения Муртыкты и Ик-Давлят (запасы золота 30 т). Здесь известен также ряд перспективных рудоносных зон и мелких месторождений (Орловское, Красная жила и др.), опойскавание которых может привести к открытию промышленных золоторудных объектов. В этой связи разработка геолого-структурной модели месторождения золото-сульфидного типа представляется весьма актуальной.

Золото-сульфидное оруденение известно в породах различного возраста. В граничных зонах меланжа Главного Уральского и Восточно-Магнитогорского разломов оно распространено, главным образом, среди углеродсодержащих терригенных и олистостромовых толщ раннекаменноугольного (месторождения Миндяк, Средний лог и др.) и предположительно силурийского (месторождения Орловское, Верхнеубалинское и др.) возраста, а во внутренних частях мегазоны — в девонских вулканогенных и вулканогенно-осадочных комплексах (месторождения Муртыкты, Ик-Давлят, Мелентьевское и др.).

Золото-сульфидные месторождения мегазоны относятся к гетерогенным образованиям. Для них характерно пространственное совмещение золото-содержащей минерализации, сингенетичной вмещающим породам, и эпигенетичного гидротермального золото-сульфидного и золото-кварц-сульфидного оруденения позднепалеозойского возраста. На месторождениях, локализованных в девонских вулканогенных формациях, позднепалеозойское оруденение сочетается с колчеданными рудами. В разрезе месторождений, залегающих среди удаленных фаций девонских колчеданоносных вулканогенных формаций, обычно присутствует вулканогенно-осадочная и гидротермально-метасоматическая минерализация существенно пиритового состава (на месторождениях Муртыкты, Ик-Давлят). В углеродсодержащих осадочных и олистостромовых толщах первичное оруденение представлено глобулярным мышьяковистым пиритом (месторождение Миндяк), иногда в ассоциации с арсенипиритом (Орловское месторождение, южный фланг Миндякского рудного поля).

По масштабам проявления сингенетичного и эпигенетичного оруденения месторождения рас-

сматриваемого типа выстраиваются в конвергентный ряд. В начале этого ряда располагаются золотосодержащие колчеданные залежи, сочетающиеся с подчиненным золото-сульфидным оруденением. Подобного рода золоторудные объекты известны в зоне Главного Уральского разлома (месторождения Мелентьевское, Карагайкульское и др.). Колчеданные руды на этих объектах, как правило, несут следы интенсивных тектонических деформаций и метаморфических преобразований. Заканчивают конвергентный ряд преобладающие в мегазоне собственно золото-сульфидные месторождения, основу которых составляет позднепалеозойское оруденение. Их характеристике и посвящена настоящая статья.

Оценку геолого-структурных условий формирования золото-сульфидного оруденения производились по следующим параметрам: 1) региональная геологическая позиция, 2) локальные структурообразующие парагенезисы, 3) механизмы формирования рудоносных структур, 4) тектонофизические барьеры рудоотложения, 5) петрофизический контроль оруденения, 6) термодинамические условия структурообразования и 7) источники рудного вещества.

РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ

Золото-сульфидные месторождения концентрируются на северном фланге Магнитогорской мегазоны в пределах мегаблока, характеризующегося общей повышенной золотоносностью. По сравнению с расположенными южнее районами этот мегаблок отличается минимальной мощностью земной коры (45–46 км) и присутствием в осевой части мегазоны гранито-метаморфического слоя [Серавкин, 1986].

подавляющее большинство золото-сульфидных месторождений не имеет видимых пространственных связей с интрузивными комплексами. Исключение, по-видимому, составляет Мелентьевское месторождение, в разрезе которого присутствует дайкообразное тело сиенитов [Рожков, Шер, 1952]. В то же время отчетливо проявлен тектонический контроль оруденения узлами пересечения позднепалеозойских разломов. Золотоконтролирующие структурные узлы включают взбросо-надвиговые нарушения северо-восточного простирания и наложенные на них зоны малоамплитудных сдвигов и косых разрывов близмеридионального, северо-западного и восток-северо-восточного направления. Последние представляют собой разрывные

структуры, образующие и, главным образом, разрушающие сдвиговые мегадуплексы растяжения [Знаменский, 2004]. Именно эти тектонические зоны играют ведущую роль в размещении на северном фланге Магнитогорской мегазоны позднепалеозойских комплексов малых интрузий и даек и золотого оруденения различной формационной принадлежности, в том числе и золото-сульфидных месторождений (рис. 1). Магма-золотоконтролирующие тектонические зоны имеют большую протяженность как по простиранию (десятки км), так и по падению (не менее 5–6 км), но в тоже время характеризуются незначительной амплитудой смещений, не превышающей первые километры.

Наиболее крупные концентрации золото-сульфидных руд установлены на участках наложения позднепалеозойских структурных узлов на конседиментационные палеодепрессии, заполненные осадочными и вулканогенно-осадочными отложениями. Например, на Миндякском месторождении рудовмещающий полимиктовый олистостром сла-

гает фрагмент коллизионного рампового прогиба [Вулканогенная металлогения ..., 1994]. В Ильинском рудном поле рудовмещающие вулканогенно-осадочные толщи, представляющие собой промежуточные и удаленные фации карамалыташской риолит-базальтовой формации (D_2), выполняют сильно деформированную межвулканическую палеодепрессию [Знаменский, 1992].

ЛОКАЛЬНЫЕ СТРУКТУРООБРАЗУЮЩИЕ ПАРАГЕНЕЗИСЫ И МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ РУДОНОСНЫХ СТРУКТУР

Данные, полученные нами при изучении месторождений Миндяк, Муртыкты, Ик-давят, Веселое и Красная жила, а также материалы других авторов [Бородаевский, 1960; Казанцев и др., 1990; Месторождения золота ..., 1999; и др.] свидетельствуют о том, что структуры золото-сульфидных месторождений мегазоны представляют собой полигенные и полихронные образования, сочетающие

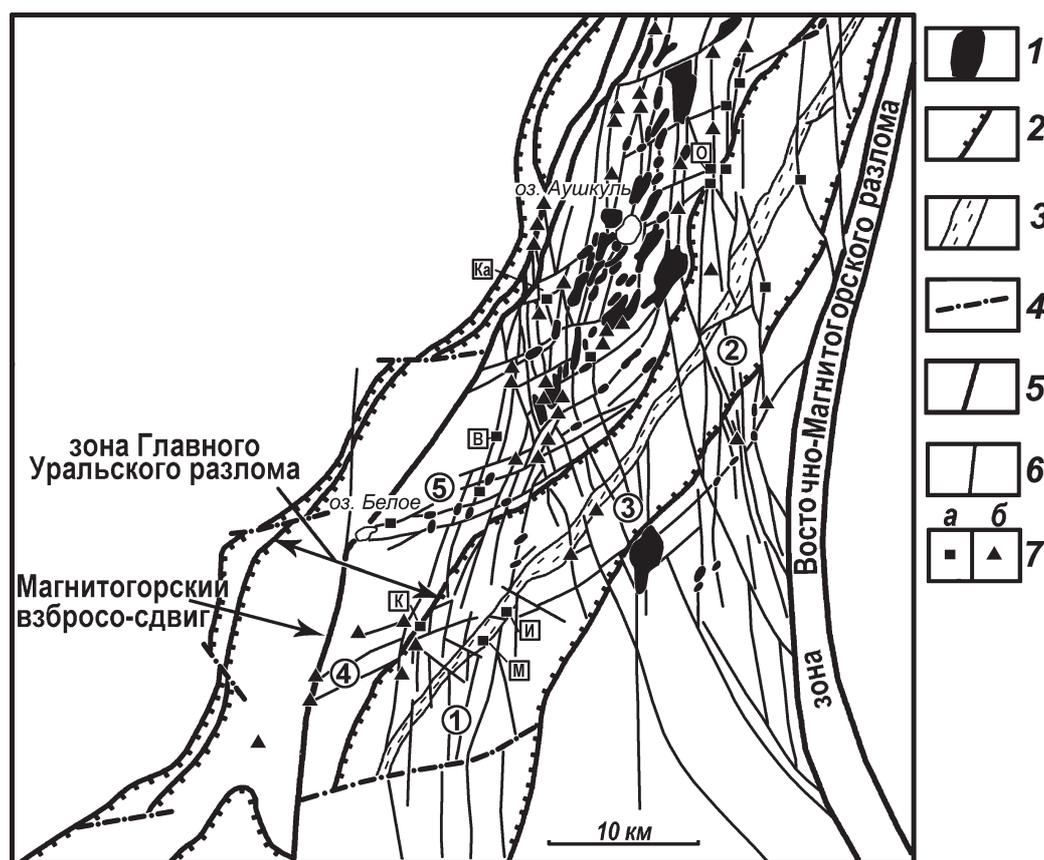


Рис. 1. Фрагмент строения сдвигового мегадуплекса растяжения, расположенного на северной центроклинали Магнитогорской синформы (составлен с использованием данных И.С. Анисимова [1982 г.], М.В. Смирнова [1981 г.] и материалов греста «Башзолото»)

1 — интрузивные тела Балбукского сиенит-гранит-порфирового комплекса (C_2-P); 2–4 — разломы раннего надвигового парагенезиса: 2 — надвиги и взбросы, 3 — зона Тунгатаровского взбросо-надвига, 4 — трансферные разломы; 5–6 — разломы позднего сдвигового парагенезиса: 5 — сдвиги, образующие мегадуплекс, 6 — магма-золотоконтролирующие сдвиги и косые разрывы, разрушающие мегадуплекс; 7 — золото-сульфидные (а) и золото-сульфидно-кварцевые (б) месторождения. Арабскими цифрами в кружках обозначены магма-золотоконтролирующие тектонические зоны: 1 — Нуралино-Вознесенско-Буйдинская, 2 — Орловско-Выдринская, 3 — Малокаранско-Сиратурская, 4 — Красножилско-Шартымская, 5 — Белоозерско-Дунграйская. Литерами в квадратах показаны золото-сульфидные месторождения: М — Муртыкты, И — Ик-давят, К — Красная жила, В — Веселое, Ка — Карагайкульское, О — Орловское

в себе ранние надвиговые и поздние сдвиговые парагенезисы. При этом главными элементами рудоконтроля служили разломы надвигового парагенезиса, активизированные на рудном этапе как сдвиги или косые разломы с доминирующей горизонтальной компонентой смещения. К числу основных типов рудолокализирующих структур могут быть отнесены следующие: 1) разломы с оперяющимися трещинами; 2) искривления разломов, способствующие сдвиговым смещения по ним; 3) изгибы сдвиговых зон, образовавшихся на месте надвиговых тектонических пластин.

Первый тип рудомещающих структур установлен на месторождениях Красная жила и Веселое. Месторождение Красная жила расположено на северном замыкании Магнитогорской синформы в зоне Краснохтинского разлома северо-восточного простирания, ограничивающего зону ГУРа с востока. Разлом состоит из серии тектонических пластин, разделенных зонами серпентинитового меланжа крутого юго-восточного падения. Тектонические пластины сложены серпентинизированными дунитами и гарцбургитами, полосчатыми пироксенитами и роговообманковыми габбро, характерными для краевых частей альпийских ультрабазитовых массивов, а также островодужными вулканитами основного состава дискуссионного возраста, прорванными комагматичными им интрузивными телами габброидов [Знаменский, 1994].

На месторождении известно несколько кулисно расположенных маломощных, но выдержанных по простиранию и падению рудных тел, которые локализованы в правосторон-

них разрывах — сосредоточенных зонах расланцевания северо-восточного простирания. Они в значительной мере наследуют зоны серпентинитового меланжа (рис. 2). В рудных телах совмещены две минеральные ассоциации. Ранняя из них представлена сплошными и прожилково-вкрапленными пирит-пирротин-халькопиритовыми рудами, несущими признаки динамометаморфических преобразований (расланцевания, будинажа). По составу и геологическим условиям размещения они близки к оруденению Ивановского, Дергамышского и Ишкинского медно-кобальт-колчеданных месторождений, расположенных на южном фланге зоны Главного Уральского разлома [Зайков, 2006]. К поздней минерализации относятся вкрапленно-жильно-

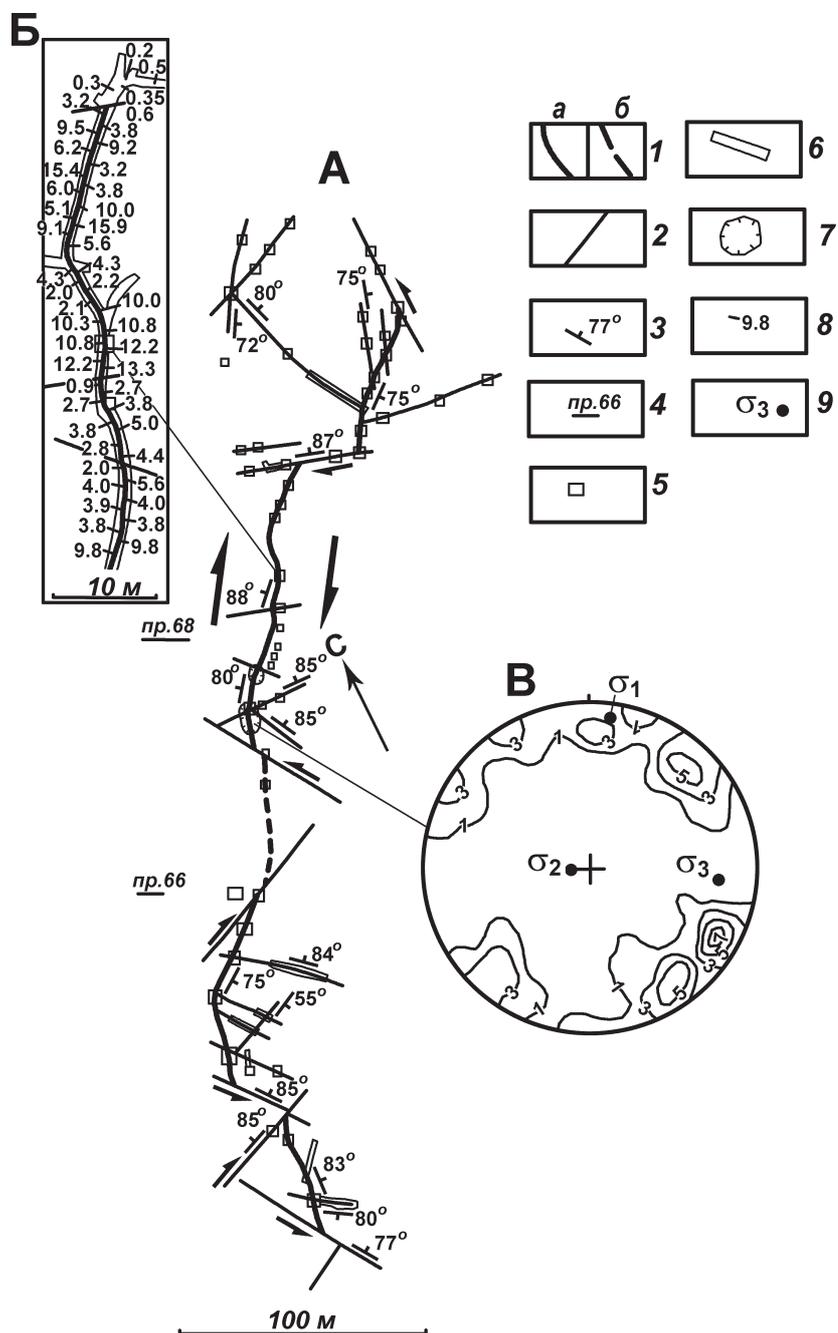


Рис. 2. А — Структурная схема северного рудного тела месторождения Красная жила; Б — план опробования рудного тела на горизонте 10 м (по данным Поляковского прииска [1952 г.]); В — диаграмма плотностей полюсов золото-сульфидных прожилков (сетка Вульфа, верхняя полу-сфера, 53 замера)

1 — рудные (а) и безрудные (б) интервалы основного разлома; 2 — вторичные разрывы; 3 — элементы залегания разрывных нарушений; 4 — линии разведочных профилей и их номера; 5–7 — горные выработки: 5 — шахты и шурфы, 6 — каналы, 7 — карьеры; 8 — содержание золота в г/т; 9 — здесь и на других рисунках оси главных нормальных напряжений (σ_1 — максимальных, σ_2 — средних, σ_3 — минимальных). Стрелками показаны направления смещений крыльев разрывных нарушений

прожилковые золото-кварц-сульфидные (сфалерит-халькопирит-пиритовые) руды, сопровождающиеся метасоматитами березит-лиственитовой формации. В составе обоих типов руд преобладает тонкодисперсное золото, связанное, главным образом, с пиритом.

Основные рудовмещающие разломы оперяются разрывами в основном сколового типа северо-западного, близмеридионального и субширотного восток-северо-восточного направлений. Вторичные разрывы содержат только позднюю минерализацию, характеризующуюся здесь низкими содержаниями золота (< 1 г/т). Они разделяют основной разлом на рудные и безрудные блоки (рис. 2 А). В пределах рудных интервалов участки с повышенными содержаниями золота приурочены к изгибам, отклоняющимся по часовой стрелке от общего простирания разломов (рис. 2 Б). Структурная позиция рудных столбов отражает правосторонние движения по рудовмещающим разломам в период формирования золото-кварц-сульфидных руд. Тектонофизические реконструкции свидетельствуют о существовании на рудном этапе условий латерального субширотного сжатия (рис. 2 В).

Месторождение Веселое расположено в зоне Аушкульского взбросо-надвига северо-восточного простирания, относящегося к вторичным нарушениям зоны Главного Уральского надвига. Аушкульский разлом на месторождении представлен зоной интенсивного рассланцевания серпентинитов, содержащих блоки кремней, базальтов и перидотитов. Основной разлом, по которому установлены внутрирудные левосторонние движения, оперяется зонами рассланцевания близширотного (Рудный разлом) и меридионального направлений. Золото-арсенопирит-пиритовая прожилково-вкрапленная минерализация развита как в основном разломе, так и в оперяющих его нарушениях. Наиболее богатые рудные тела с содержаниями Au более 10 г/т, по данным Поляковского прииска, были приурочены к вторичным зонам рассланцевания.

На примере месторождений Красная жила и Веселое видно, что оперяющие разрывы могут играть различную роль в рудоконтроле. В одних случаях они являются рудовмещающими, а в других — безрудными, но оказывающими влияние на размещение рудных столбов в основных разломах.

Искривления разломов (второй тип рудолокализирующих структур) контролируют размещение оруденения месторождения Муртыкты [Знаменский, 1992]. Оно залегает в зоне Тунгатаровского разлома, развитого вдоль контакта вулканогенных комплексов ирендыкской андезито-базальтовой формации (D_{1-2}) и расположенных восточнее осадочных и вулканогенно-осадочных толщ средне-позднедевонского возраста. Тунгатаровский разлом на широте месторождения Муртыкты представлен чешуйчатым взбросо-надвигом юго-восточного падения (рис. 3), заложившимся до начала процес-

сов минералообразования. Основные рудные тела месторождения представляют собой линейные зоны прожилково-вкрапленной минерализации или протяженные кварц-сульфидные жилы, сопровождающиеся ореолами прожилково-вкрапленного оруденения. В составе руд преобладают пирит, халькопирит, сфалерит и галенит. Околорудные метасоматиты относятся к березит-лиственитовой формации и имеют абсолютный Rb—Sr возраст 294 млн. лет [Вулканогенная металлогения ..., 1994].

Главный рудоконтролирующий разлом имеет зональную структуру, которой и обусловлены основные закономерности размещения золото-сульфидной минерализации. Во фронтальной части разлома, состоящей из западнвергентных высокоамплитудных чешуйчатых взбросов и взбросо-надвигов и изоклиналиных складок, оруденение локализовано в послонных срывах — сбросах юго-восточного падения, осложняющих тектоническую пластину (Западная рудная зона). В его тыловой зоне, образованной восточнвергентными малоамплитудными взбросами и пликативными формами преимущественно открытого типа, основными рудовмещающими структурами являются крупные взбросы и оперяющие их разрывы, главным образом, северо-западного падения (Восточная и Промежуточная рудные зоны).

По рудолокализирующим разрывам на рудном этапе происходили реактивированные малоамплитудные сдвиговые или косые смещения. В качестве примера, иллюстрирующего особенности эволюции разломов рудного поля, рассмотрим результаты тектонофизических реконструкций и определений векторов смещений по взбросу северо-западного падения, вмещающему рудное тело № 1 Восточной зоны. Наблюдения выполнены в висячем крыле разлома, вскрытом кварцлагом № 7 на горизонте 455 м. Изучавшееся крыло разлома сложено слоистыми туффитами основного состава, смятыми в мелкие подобные складки волочения. Статистическая обработка массовых замеров элементов залегания слоистости позволила реконструировать положение оси складчатости [Геолого-структурные ..., 1982] (диаграмма «а» на рис. 3). Ее ориентировка указывает на взбросовые смещения по разлому. Складки волочения пересекаются сульфидными (пирит-халькопирит-сфалеритовыми) и послерудными карбонат-кварцевыми прожилками.

Золотоносные сульфидные прожилки выполняют близмеридиональные и субширотные трещины скола (синтетические и антитетические сдвиги соответственно), крутопадающие отрывы северо-западного простирания и близгоризонтальные трещины неясного генезиса (диаграмма «б» на рис. 3). По ним восстановлено сдвиговое поле палеонапряжений с северо-западным направлением оси σ_3 . Такое поле напряжений характерно для левых сдвигов. Вектор смещения, реконструированный

с помощью метода поясов В.Н. Даниловича [1961], а также по положению трещин отрыва, имеет пологое северо-восточное падение. Кинематический

тип отвечает левому взбросо-сдвигу. Формирование карбонат-кварцевых прожилков происходило в режиме субширотного сжатия (диаграмма «в» на рис. 3),

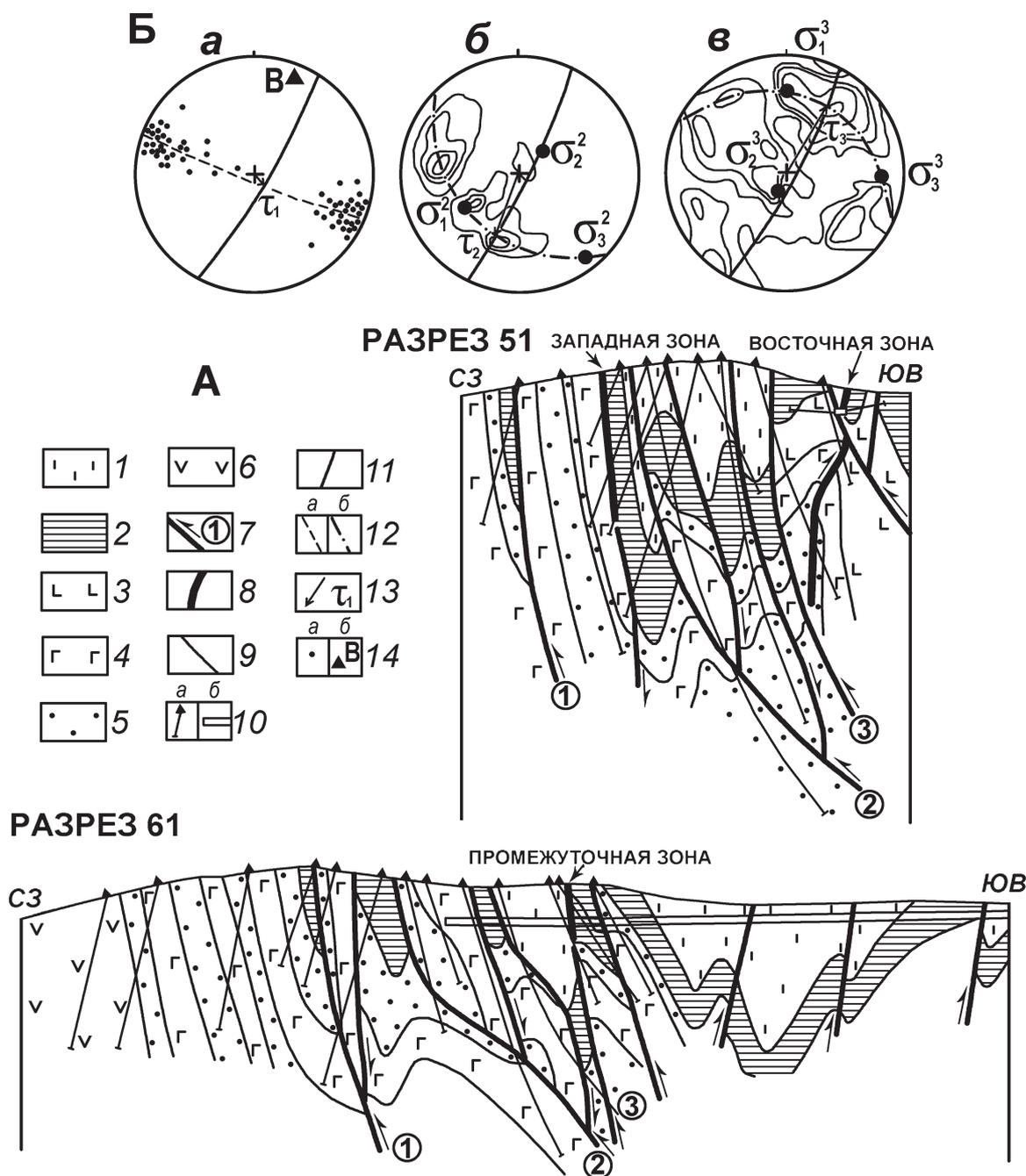


Рис. 3. Геологические разрезы Тунгатаровского разлома на широте месторождения Муртыкты (А). Составил С.Е. Знаменский с использованием материалов Северо-Восточной ГРЭ АО «Башкиргеология». На врезке Б: диаграммы плотностей полюсов слоистости туффитов основного состава (а), золото-сульфидных (б) и послерудных карбонат-кварцевых (в) прожилков (б — 62 замера, изолинии соответствуют 1–3–5–7–9–13–15–17%); в — 237 замеров, изолинии соответствуют 1–3–5–7–9–13–15–17%)

1 — кремнистые и вулканомиктовые породы улугтауской вулканогенно-осадочной формации (D_{2-3}); 2–5 — карамалыташская риолит-базальтовая формация (D_2): 2–3 — непрерывная ассоциация (2 — маркирующий горизонт туфов и туффитов основного состава, 3 — базальты, андезибазальты, андезиты с прослоями туфов и туффитов смешанного и основного состава и кремнистых пород); 4–5 — контрастная ассоциация (4 — базальты и диабазы, 5 — вулканогенно-осадочные породы с контрастным — базальтовым и риолитовым составом обломков); 6 — вулканиты ирендыкской андезито-базальтовой формации (D_{1-2}); 7 — разрывные нарушения; 8 — рудные зоны; 9 — геологические границы; 10 — проекции скважин (а) и горных выработок (б); 11 — плоскость основного разлома; 12 — плоскости поясов слоистости (а) и золото-сульфидных и карбонат-кварцевых (б) прожилков; 13 — векторы смещения висячего крыла разлома; 14 — полюса слоистости (а) и реконструированный шарнир складчатости (б). Арабскими цифрами в кружках обозначены наиболее крупные надвиги и взбросо-надвиги

вызавшего пострудные правые взбросо-сдвиговые смещения по основному разлому.

Размещение рудных зон и отдельных рудных тел отчетливо контролируется изгибами разломов, главным образом, по простиранию. Во фронтальной части Тунгатаровского взбросо-надвига оруденение развито на изгибах послонных срывов, отклоняющихся по часовой стрелке от генерального простирания разломов, в полном соответствии с правосторонними внутриминерализационными смещениями по ним. В тыловой зоне взбросо-надвига золото-полиметаллическая минерализация развита преимущественно на искривлениях взбросов с меньшим, чем разрывы в целом, азимутом простирания. Такое распределение оруденения связано с левосторонними внутриминерализационными движениями по разломам.

Третий тип рудолокализирующих структур установлен на месторождении Миндяк, расположенном в зоне Главного Уральского разлома. Структура месторождения представляет собой антиформу северо-восточного простирания, северо-западное крыло которой нарушено чешуйчатым взбросо-надвигом юго-восточного падения (рис. 4) [Знаменский, 2000]. Складку образует пакет тектонических

пластин. Оруденение, объединяющее раннюю прожилково-вкрапленную пиритовую и позднюю прожилковую сфалерит-халькопирит-пирит-карбонат-кварцевую минерализацию, развито в тектонической пластине, ограниченной Западным и Восточным взбросо-надвигами. На рудном этапе эта пластина была трансформирована в зону правого сдвига.

Особенности эволюции разломов, ограничивающих сдвиговую зону, проиллюстрируем на примере Западного взбросо-надвига. Разлом изучался в эксплуатационном карьере Куш-таш (рис. 5). В зоне разлома, выполненной углисто-кремнистыми сланцами, выделяются ранние приразломные складки с пологими шарнирами, ориентированными близко к линии простирания разлома (диаграмма «б» на рис. 5), а также поздние складки волочения с круто ориентированными шарнирами (диаграмма «а» на рис. 5). Статистическим методом реконструировано положение осей ранней и поздней складчатости и на этой основе установлены векторы смещений по разломам. По ранним складкам по Западному разлому реконструированы взбросовые, а по поздним — правосдвиговые смещения. Сдвиговые движения носили внутриминерализационный характер и сопровождалась формированием в всiachем крыле разлома прожилковой золоторудной минерализации. В течение всего периода рудообразования господствовали условия латерального субширотного сжатия (диаграммы «в» и «г» на рис. 5).

В рудоконтролирующей зоне правого сдвига оруденение Миндякского месторождения сконцентрировано на изгибе, отклоняющемся по часовой стрелке от ее общего простирания. В пределах изгиба зоны оно развито в узлах пересечения продольных северо-восточных, диагональных северо-восточных и север-северо-западных вторичных

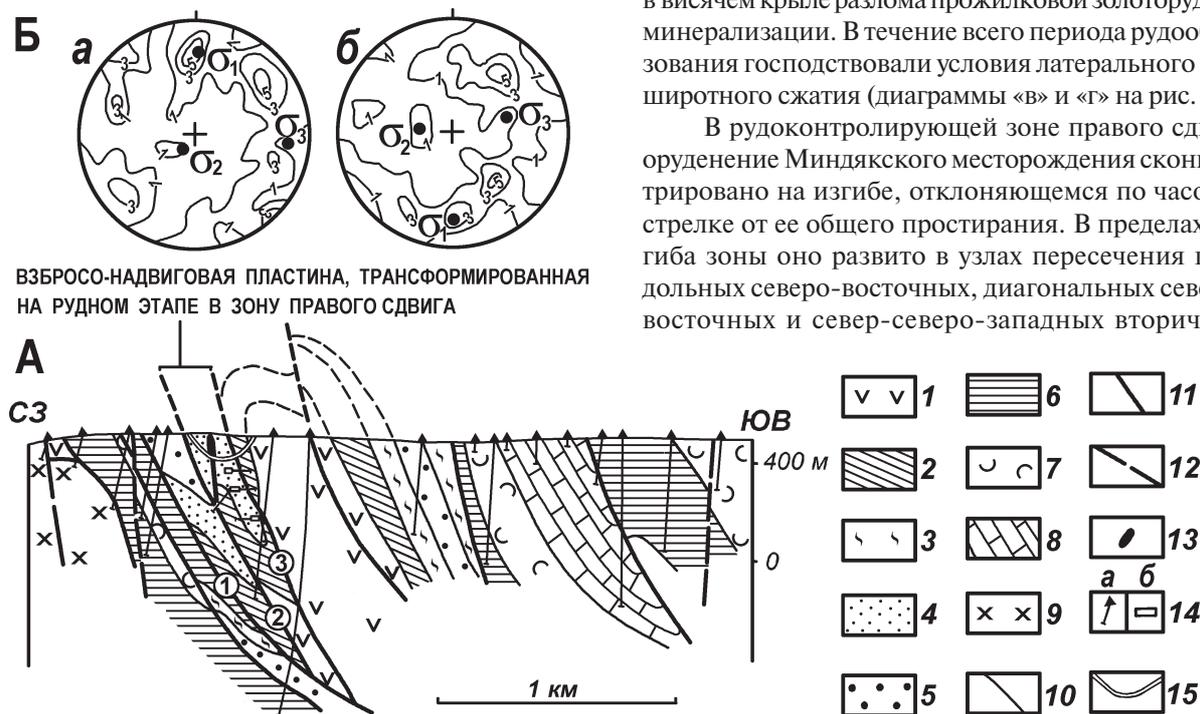


Рис. 4. Геологический разрез через центральную часть месторождения Миндяк. Составил С.Е. Знаменский с использованием данных И.Г. Дубенко [1975 г.], К.А. Швалева [1981 г.] и В.Ф. Созинова [1983 г.]. На врезке Б показаны диаграммы плотностей полосов пиритовых (а) и пирит-халькопирит-карбонат-кварцевых прожилков (б); а — 94 замера, б — 85 замеров. Замеры выполнены в пределах одного из рудных столбов Северной линзы

1–8 — тектонические пластины и толщи: 1 — вулканиты ($D_{1-2}ir$), 2 — карбонатный олистостром (C_1t-v), 3 — меланжированные ультрабазиты и габбро, 4 — полимиктовый олистостром с олистолитами ордовикских диабазов, 5 — терригенно-карбонатные породы (C_1v), 6 — карбонатный олистостром (C_1v), 7 — вулканогенно-осадочные и кремнистые породы ($D_3kl?$), 8 — известняки (C_1v-s); 9 — раннекаменноугольные (?) диориты; 10 — границы тектонических пластин и толщ; 11 — взбросы и взбросо-надвиги юго-восточного падения; 12 — сдвиги; 13 — рудные тела; 14 — проекции скважин (а) и горных выработок (б); 15 — контур Благодатного карьера. Арабскими цифрами в кружках обозначены взбросы и надвиги: 1 — Главный, 2 — Западный, 3 — Восточный

разрывов, аппроксимирующихся Y-, R- и R'-сколами соответственно.

ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЕ БАРЬЕРЫ РУДООТЛОЖЕНИЯ

В условиях горизонтального сдвига наиболее благоприятными тектонофизическими обстановками для локализации золото-сульфидного оруденения являлись участки локального растяжения на фоне общего латерального сжатия, которые объединяются в две основные группы: 1) изгибы разломов и 2) узлы пересечения разрывных нарушений. Установлено, что в перечисленных структурах на рудном этапе существовали условия одноили двухосного растяжения. Рассмотрим влияние тектонофизического фактора на размещение оруденения на примере Восточной зоны месторождения Муртыкты.

Рудовмещающую систему Восточной зоны образуют взброс крутого северо-западного падения, расположенный вдоль осевой поверхности антиклинали, и серия мелких субвертикальных разрывов, залегающих в его висячем боку (рис. 6). По рудолокализирующим разрывам на рудном этапе происходили левые взбросо-сдвиговые смещения.

Во вдольосевом разломе локализовано наиболее крупное рудное тело № 1. Оно имеет длину по простиранию около 1 км, а по падению перебурено до глубины 350–400 м от современной поверхности. Рудовмещающий разлом состоит из одного или двух, иногда трех швов и примыкающей к ним зоны рассланцованных и трещиноватых пород. В безрудных интервалах видно, что швы представляют собой зоны сильно рассланцованных милонитов, ограниченных разрывами с глиной трения.

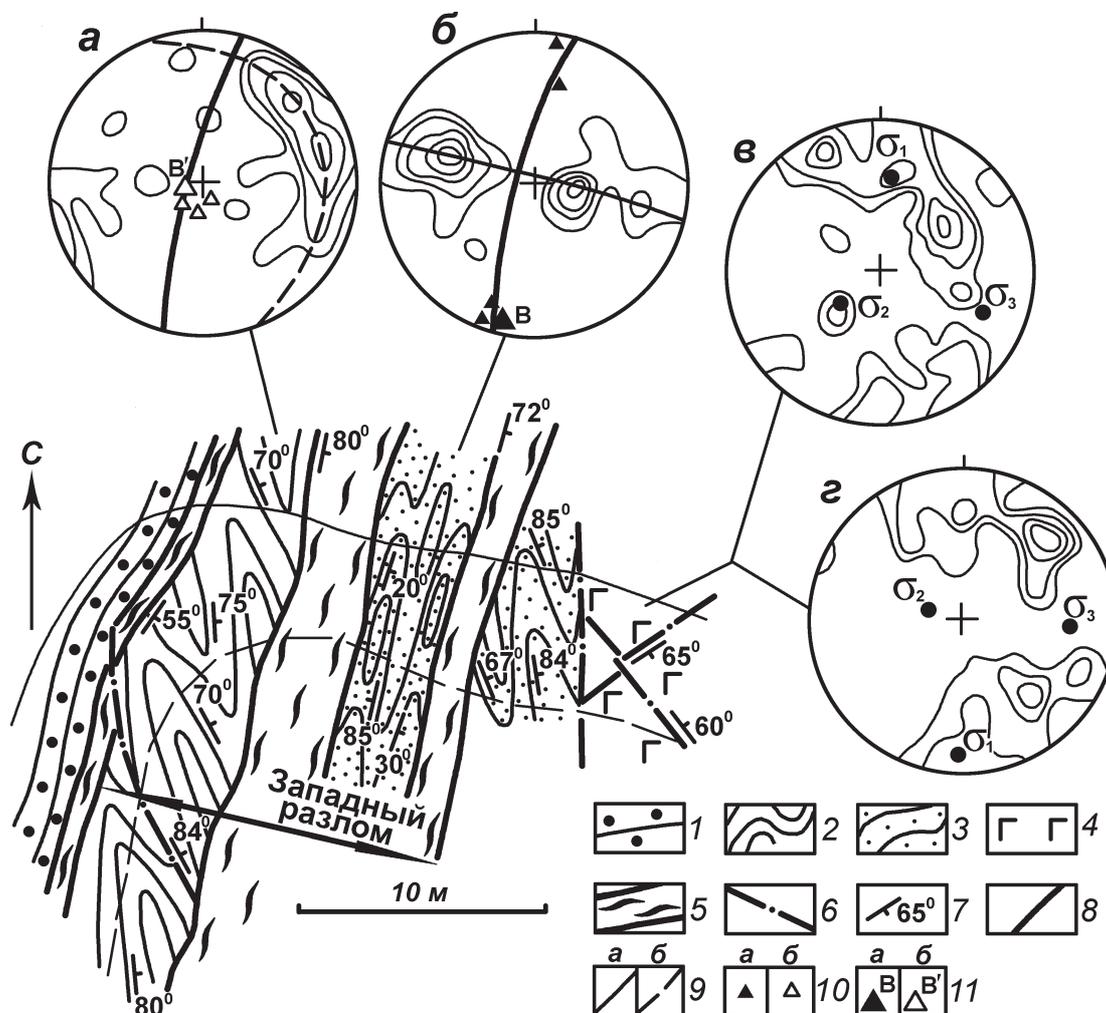


Рис. 5. Фрагмент строения зоны Западного разлома. Зарисовка нижнего уступа в западном борту карьера Куш-таш

a–г — диаграммы плотностей полюсов (сетка Вульфа, верхняя полусфера): *a, б* — слоистости (*a* — 55, *б* — 56 замеров), *в* — пиритовых (82 замера) и *г* — пирит-халькопирит-карбонат-кварцевых (75 замеров) прожилков.
1 — алевриты; *2* — кремнистые сланцы; *3* — углисто-кремнистые сланцы; *4* — диабазы; *5* — разломы, выполненные милонитовым материалом; *6* — трещины скола; *7* — элементы залегания разрывных нарушений и слоистости; *8–11* — на диаграммах: *8* — плоскость Западного разлома, *9* — плоскости симметрии ранней (*a*) и поздней (*б*) складчатости, *10* — замеренные шарниры ранних (*a*) и поздних (*б*) складок, *11* — реконструированные оси ранней (*a*) и поздней (*б*) складчатости

Размещение промышленных участков руд в теле № 1 контролируется искривлениями по простиранию и падению разлома. По простиранию

обогащенные участки приурочены к изгибам, отклоняющимся против часовой стрелки от общего направления разлома. Рудные столбы обусловлены здесь повышенными концентрациями золота без заметного увеличения мощности рудного тела. Также интервалы разлома вмещают сульфидно-кварцевые тела жилообразной формы мощностью до 1,5 м, сопровождающиеся зоной прожилково-вкрапленной минерализации. В малопродуктивных отрезках разлома, характеризующихся изгибом по часовой стрелке, обычно развито прожилковое оруденение преимущественно пиритового состава.

На участках с пологим залеганием рудные столбы образуются за счет увеличения мощности ореола прожилково-вкрапленной минерализации существенно пиритового состава, окружающей основной шов. Судя по данным бурения, рудовмещающий взброс на глубоких горизонтах (300–400 м от современной поверхности) представлен

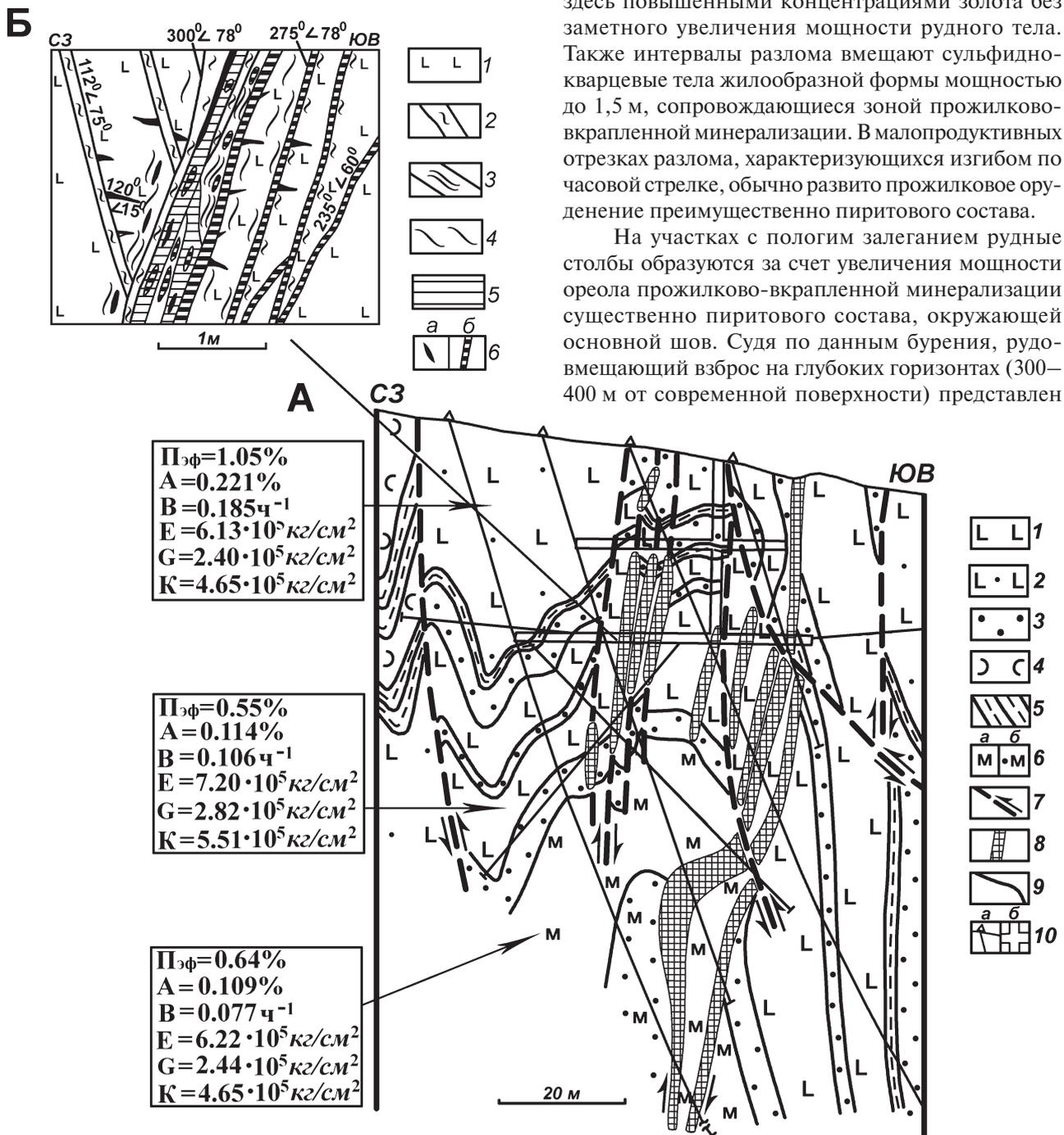


Рис. 6. Схематический геологический разрез Восточной рудной зоны по профилю 53 (А). Составил автор с использованием данных Северо-Восточной ГРЭ АО «Башкиргеология». На врезке (Б) показано строение рудовмещающего взброса северо-западного падения

Условные обозначения к разрезу (А): 1 — базальты и андезибазальты; 2 — туфы и туффиты основного состава; 3 — туфогравелиты и туфоконгломераты; 4 — вулканомиктовые песчаники и гравелиты; 5 — кремнистые сланцы; 6 — кварцевые и серицит-кварцевые метасоматиты по основным эффузивам (а) и обломочным породам (б); 7 — разломы (стрелками показаны направления смещений висячих крыльев); 8 — рудные тела; 9 — геологические границы; 10 — проекции на вертикальную плоскость: а — буровых скважин, б — подземных горных выработок. Пэф, А, В, Е, G, К — петрофизические свойства пород (определения выполнены в рудно-петрофизической лаборатории Геологического факультета МГУ). Пэф — эффективная пористость, А — условно-мгновенное насыщение, В — постоянная насыщения, Е — модуль Юнга, G — модуль сдвига, К — коэффициент объемного сжатия.

Условные обозначения к врезке (Б): 1 — базальты и андезибазальты; 2 — разрывы с глиной трения; 3 — разрывы, выполненные милонитовым материалом; 4 — рассланцевание; 5 — рудные кварцевые жилы; 6 — пиритовые (а) и полиметаллические руды (б)

сосредоточенной зоной расланцевания, в которой преобладает оруденение прожилково-вкрапленного типа, что свидетельствует об уменьшении степени структурной открытости рудолокализирующего разлома на глубоких горизонтах месторождения.

Подавляющее большинство рудных тел Восточной зоны залегает в ее центральной части висячем боку вдольосевого взброса и приурочено к приподнятому блоку, ограниченному поперечными разломами. Золото-сульфидная минерализация сосредоточена в разрывах, занимающих положение веерообразного кливажа осевой поверхности антиклинальной складки. Рудные тела имеют длину по простиранию десятки, редко первые сотни метров. Они развиты преимущественно в горизонте базальтов и андезибазальтов.

В основных эффузивах преобладают разрывы, заполненные мифонитовым материалом или глиной трения. На изгибах с меньшим, чем разлом в целом, азимутом простирания, локализованы жильные сульфидно-кварцевые тела. Отдельные жилы встречаются редко. Обычно рудные тела представляют собой систему жил и прожилков, образующих зону. В этой зоне, как правило, выделяется крупная стержневая жила, приуроченная к основному шву, и серия мелких жил и прожилков, локализованных в оперяющих трещинах. Мощность стержневых жил достигает 1,5 м. Оперяющие прожилки имеют мощность в первые см. Охарактеризованные интервалы разрывов обладают повышенными содержаниями Au. На изгибах разрывов с противоположным направлением искривления оруденение концентрируется, главным образом, в оперяющих трещинах. Основной шов при этом часто остается безрудным. Такие участки рудных тел отличаются низкими концентрациями Au.

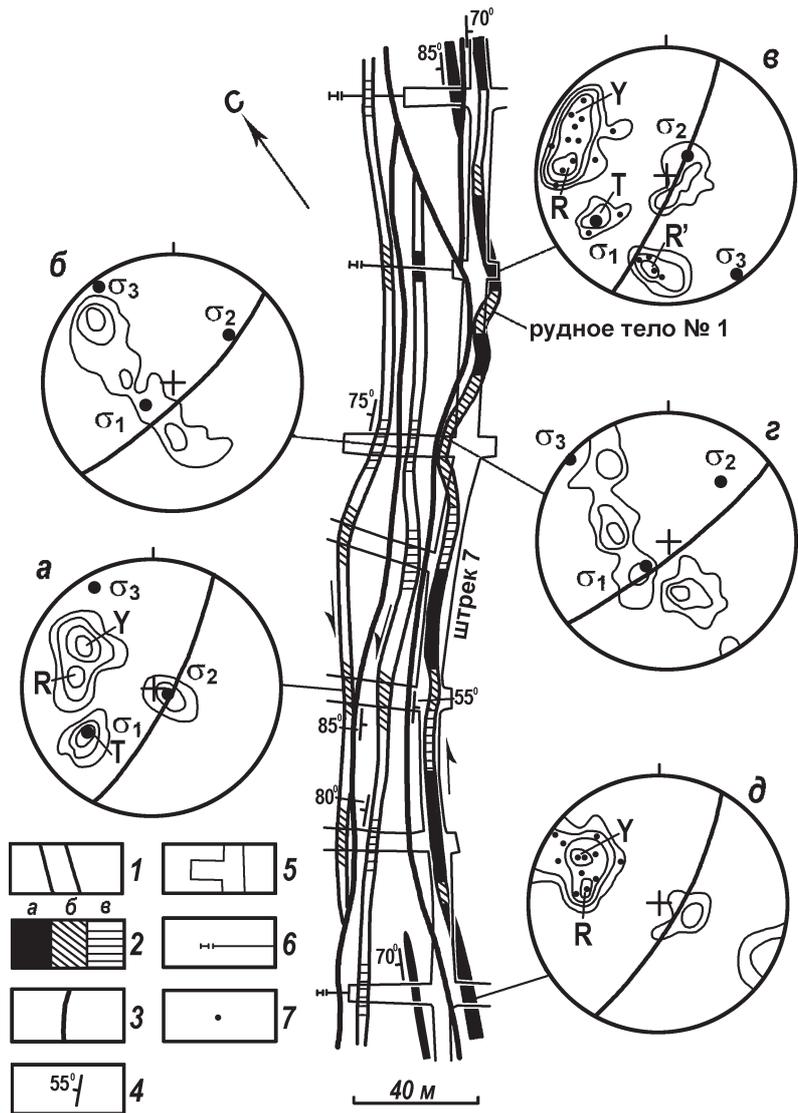
Тектонофизические реконструкции, выполненные с помощью метода П.Н. Николаева [1977], а также по структурам Риделя [Mc Clay, 1995] (рис. 7), показали, что рудоносные и безрудные интервалы разрывных нарушений представляли собой изгибы растяжения и сжатия соответственно.

Выяснено, что в интервалах разрывов, вмещающих рудные столбы, развиты сдвиговые, а на малопродуктивных участках — надвиговые вторичные парагенезисы трещин. Сдвиговый оперяющий парагенезис в наиболее полном виде представлен: 1) Y-сдвигами (левосторонними) параллельными основному шву; 2) близмеридиональными левыми R- и субширотными правыми R'-сколами Риделя; 3) крутопадающими трещинами отрыва северо-западного простирания (Т); 4) пологими трещинами отрыва. По составу и времени образования выделяются ранние пирит-кварцевые и поздние, в основном наследующие их, пирит-халькопирит-сфалерит-галенит-кварцевые прожилки. Ранние рудоносные трещины формируют более широкие ореолы. Прожилки с полиметаллическими ассоциациями

Рис. 7. Структурная схема центральной части Восточной рудной зоны. Горизонт 455 м. Составил автор с использованием данных экспедиции «Уралзолоторазведка»

a-d — диаграммы (сетка Вульфа, верхняя полу-сфера) плотностей полюсов: *б, в, г, д* — ранних пиритовых прожилков (*б* — 40, *в* — 50, *г* — 45, *д* — 40 замеров), *а* — поздних прожилков полиметаллического состава (75 замеров).

1 — контуры рудных тел; *2* — содержания Au в рудных телах в г/т: *а* — >4, *б* — 2–4, *в* — >2; *3* — рудоконтролирующие взбросы и взбросо-надвиги юго-восточного падения; *4* — элементы залегания рудных тел и разломов; *5-6* — проекции горных выработок (*5*) и подземных скважин (*б*) на горизонтальную плоскость; *7* — на диаграммах полюса прожилков полиметаллического состава. Y — сдвиги, параллельные основному разлому; R — сколы Риделя; R' — сопряженные сколы Риделя; Т — трещины отрыва и сбросы



концентрируются вблизи основного разлома и, как правило, отсутствуют в пологих трещинах четвертой системы. В течение всего периода рудообразования здесь действовали сдвиговые поля палеонапряжений. Напряженное состояние на ранней стадии характеризовалось растяжением по осям σ_1 и σ_2 , а на поздней — одноосным растяжением по оси σ_1 .

Надвиговый опережающий парагенезис состоит из следующих систем трещин: 1) сколов, субпараллельных основному разрыву; 2) надвигов или сдвиго-надвигов встречного — северо-западного и юго-восточного падения; 3) пологих трещин отрыва. Трещины выполнены в основном ранним пиритом. Формирование пиритовой минерализации контролировалось надвиговыми полями палеонапряжений с осями σ_3 и σ_1 , ориентированными почти перпендикулярно и параллельно разрывам соответственно, которые представляли собой закрытые структуры. В заключительные фазы рудного этапа на таких изгибах, по-видимому, господствовала обстановка трехосного сжатия, в связи с чем поздние полиметаллические ассоциации получили крайне незначительное развитие.

Тектонофизическим фактором обусловлено наличие в Восточной зоне структур двух типов: крутых рудоконцентрирующих и более пологих рудокранирующих юго-восточного падения (рис. 6, 7). Существование этой пары разрывных структур связано с особенностями распределения локальных полей напряжений, вызванных сдвиговыми смещениями по обоим типам разрывов. Они распределялись таким образом, что рудоконтролирующие структуры на фоне общего тангенциального сжатия рудного поля испытывали локальное растяжение, а вдоль рудокранирующих разрывов существовала обстановка сжатия.

ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ОРУДЕНЕНИЯ

Влияние физико-механических свойств среды заключалось, во-первых, в преимущественном развитии рудоносных разрывов в блоках компетентных пород; во-вторых, в наследовании разломами контрастных по петрофизическим свойствам пород; в-третьих, в зависимости морфологии разрывных нарушений и рудных тел от состава вмещающей среды.

Различие в физико-механических свойствах сред структурообразования приводило к тому, что отдельные блоки, сложенные хрупкими породами, служили «локализаторами» тектонической трещиноватости. Например, на месторождении Миндяк промышленные тела прожилково-вкрапленных и прожилковых руд развиты исключительно в блоках диабазов, погруженных в пластичный углисто-глинисто-кремнистый матрикс полимиктового олистострома.

В Восточной рудной зоне месторождения Муртыкты распространение по вертикали подавляющего большинства рудных тел ограничено горизонтом базальтов и андезибазальтов (рис. 6), что, по нашему мнению, обусловлено наличием в разрезе контрастных по петрофизическим свойствам пород. В пределах рудной зоны ниже горизонта основных эффузивов, отличающихся в целом слабыми вторичными изменениями, залегают тела диабазов, в результате дорудного метасоматоза превращенных в однородные серицит-кварцевые метасоматиты. Перекрывающую часть разреза слагают кварц-карбонат-серицит-хлоритовые сланцы, развитые по туфам и туффитам основного состава. По сравнению с основными эффузивами подстилающие и перекрывающие породы имеют более низкие значения модулей Юнга, сдвига и объемного сжатия, т. е. обладают повышенной пластичностью. Для серицит-кварцевых метасоматитов характерны также низкие значения параметров насыщения и невысокая эффективная пористость. При таком сочетании базальты и андезибазальты деформировались как хрупкие породы, по-видимому, способные длительное время сохранять приоткрытыми полости разрывов, в которых формировались жильные тела.

Влияние физико-механических свойств пород на морфологию рудных тел отчетливо проявляется при сравнении условий локализации оруденения Восточной и Промежуточной рудных зон месторождения Муртыкты. В первой из них, как было показано выше, преобладают жильные тела, залегающие среди основных эффузивов. В Промежуточной зоне оруденение развито в туфах и туффитах основного состава, превращенных в результате динамометаморфических и предрудных метасоматических изменений в кварц-серицит-хлоритовые сланцы. Сланцы вмещают прожилково-вкрапленную минерализацию, что хорошо согласуется с их петрофизическими параметрами: повышенными фильтрационными свойствами ($P_{\text{Эф}} = 1,05\%$; $A = 0,221\%$; $B = 0,185 \text{ ч}^{-1}$) и пластичностью ($V_p = 5,28 \text{ км/с}$; $V_s = 2,94 \text{ км/с}$; $E = 6,13 \cdot 10^5 \text{ кгс/см}^2$; $G = 2,40 \cdot 10^5 \text{ кгс/см}^2$) [Знаменский, 1992].

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ

РТ-параметры процессов минерало- и структурообразования изучены только на месторождениях Муртыкты и Миндяк. По данным определений с помощью пирит-сфалеритового геотермометра [Салихов, Бердников, 1985], а также гомогенизации газово-жидких включений в рудном кварце (определения С.Ш. Юсупова), формирование продуктивных золото-полиметаллических ассоциаций на месторождении Муртыкты происходило в интервале температур 450–350°C. Более широкий диапазон температур получен А.П. Бахтиной и

В.Н. Сазоновым [1980] на основе распределения $\delta^{34}\text{S}$ между сосуществующими галенитом и сфалеритом: 410–200°C. Глубина формирования по доломит-кварцевому геотермобарометру оценивается в 2,5 км. РТ-условия образования оруденения отвечают мезозоне [Старостин, 1988]. По данным доломит-кальцитового геотермометра, ранняя прожилково-вкрапленная пиритовая минерализация месторождения Миндяк образовалась при $T = 340\text{--}350^\circ\text{C}$ и $P = 0,50\text{--}0,66$ кбар (уровень мезозоны), а позднее прожилковое карбонат-кварцевое оруденение с примесью сфалерита, халькопирита, пирита и самородного золота — при $T = 195\text{--}205^\circ\text{C}$ и $P = 0,04\text{--}0,13$ кбар [Мурзин и др., 2003]. Вероятно, прожилковые руды формировались после прекращения активного стресса в период релаксации. Данные по морфологии рудоносных разломов месторождений Красная жила, Орловское и Веселое, часто сочетающих в себе пластичные зоны расщепления и милонитизации и сколовые нарушения, свидетельствуют об их формировании под действием упруго-пластических деформаций. Деформации этого типа характерны для уровня мезозоны.

Источники рудного вещества

Изотопно-геохимические данные, имеющиеся для месторождений Миндяк и Муртыкты, указывают на корово-мантийный источник флюидов, ответственных за формирование позднепалеозойского гидротермального оруденения, и проявление процессов регенерации рудных элементов из вмещающих пород. Изотопный состав серы пирита из руд Миндякского месторождения, а также равновесного с ним H_2S флюида, рассчитанного для 300°C, варьирует в узких пределах: $\delta^{34}\text{S}_{\text{пирит}} = +0,04 \div +7,3\text{‰}$ и $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}} = -1,18 \div +6,14\text{‰}$, отвечающих глубинной сере или сере флюидов, отделившихся от гранитного очага [Мурзин и др., 2003]. Этот вывод подтверждают изотопные соотношения С ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} = -6,2 \div -7,8\text{‰}$) и О ($\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = +6,3 \div +8,2\text{‰}$), полученные В.М. Мурзиным с соавторами [2003] при изучении газовой-жидких включений в кварце из околорудных метасоматитов этого месторождения. Значения $\delta^{34}\text{S}_{\text{пирит}}$ в рудах месторождения Муртыкты укладываются в интервал $-2,31 \div +2,32\text{‰}$, отвечающий мантийной сере (данные М.А. Гаррис). Отметим, что в составе эпигенетических руд месторождений Миндяк, Муртыкты и Красная жила наряду с тонкодисперсным золотом, связанным с сульфидами, присутствует самородное высокопробное (> 900) золото [Мурзин и др., 2003; Белогуб и др., 2006], характерное для уральских золоторудных месторождений, ассоциирующихся с коллизионными гранитоидными интрузиями [Месторождения золота ..., 1999]. В тоже время на месторождении Муртыкты широко развиты теллуридные ассоциации, которые, по данным В.Н. Сазонова с соавто-

рами [Месторождения золота ..., 1999], могут служить минералогическим критерием мантийного источника рудообразующего флюида.

Признаки ассимиляции гидротермальными растворами рудных элементов из вмещающих пород, в том числе из первичной сульфидной минерализации, установлены на многих золото-сульфидных месторождениях мезозоны. Они, в частности, проявляются в зависимости содержаний элементов-примесей (Cu, Zn, Pb, Co, Ni) в пиритах руд от концентрации этих элементов во вмещающих породах [Вулканогенная металлогения ..., 1994]. Однако масштабы этого процесса пока достоверно не изучены. Возможно, с регенерацией и ремобилизацией золота отчасти связан стратиграфический контроль позднего оруденения горизонтами пород, обогащенными сингенетичной минерализацией. Так, например, на месторождении Муртыкты золото-сульфидное оруденение, независимо от структурных условий локализации, концентрируется в верхней части карамальташской формации, где развита вулканогенно-осадочная и гидротермально-метасоматическая сульфидная минерализация. На месторождении Миндяк вертикальный диапазон распространения рудных тел ограничен пластиной полимиктового олистодрома, матрикс которого обогащен сингенетичной пиритовой минерализацией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С учетом приведенных выше материалов геолого-структурную модель золото-сульфидного месторождения Магнитогорской мезазоны в кратком изложении можно представить следующим образом: 1) региональная геологическая позиция — контроль узлами пересечения позднепалеозойских разломов (взбросо-надвиговых нарушений с тектоническими зонами, образующими и разрушающими сдвиговые мегадуплексы растяжения, при ведущей роли последних), наложенными на конседиментационные палеодепрессии различного возраста и генезиса; 2) локальные структурообразующие парагенезисы — сочетание ранних надвиговых и поздних сдвиговых структурных ассоциаций; 3) механизмы и тектонофизические режимы формирования рудоносных структур — горизонтальное сдвигание в обстановке латерального сжатия; 4) тектонофизические барьеры рудоотложения — участки локального растяжения на фоне общего сжатия, объединяющиеся в две основные группы: изгибы и узлы пересечения разломов; 5) литологический контроль оруденения — преимущественное развитие позднепалеозойских золото-сульфидных руд в горизонтах, содержащих сингенетичную сульфидную минерализацию, а в их пределах — в компетентных блоках и вдоль контактов различных по петрофизическим свойствам пород; 6) термодинамические условия структурообразования — уровень мезозоны; 7) источник рудного

вещества — полигенный, обусловленный глубоинной магматической природой рудообразующих флюидов и процессами мобилизации рудных элементов из вмещающих пород.

Литература:

- Бахтина А.П., Сазонов В.Н.** Околорудный метасоматоз на одном золото-полиметаллическом месторождении // Рудоносные метасоматиты Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1980. С. 52–67.
- Белогуб Е.В., Новоселов К.А., Котляров В.А. и др.** Минералогия окисленных руд золото-полиметаллического месторождения Ик-Давлят (Южный Урал) // Записки РМО. 2006. № 5. С. 35–43.
- Бородаевский Н.И.** Материалы по методам изучения структур и геологической перспективной оценке месторождений золота // Труды / ЦНИГРИ. 1960. Вып. 55. 265 с.
- Вулканогенная** металлогения Южного Урала / *И.Б. Серавкин, С.Е. Знаменский, А.М. Косарев и др.* М.: Наука, 1994. 160 с.
- Геолого-структурные** методы изучения эндогенных рудных месторождений / *Под ред. Н.П. Лаврова.* М.: Наука, 1982. 230 с.
- Данилович В.Н.** Метод поясов при исследовании трещиноватости, связанной с разрывными смещениями. Иркутск: ИПИ, 1961. 147 с.
- Зайков В.В.** Вулканизм и сульфидные холмы палеоокеанических окраин (на примере колчеданоносных зон Урала и Сибири). М.: Наука, 2006. 429 с.
- Знаменский С.Е.** Структура и закономерности размещения золото-полиметаллического оруденения Ильинского рудного поля / БФАН СССР. Уфа, 1992. 80 с.
- Знаменский С.Е.** Позднеордовикско-раннесилурийский вулcano-интрузивный комплекс северной части Магнитогорского мегасинклиория и связанные с ним оруденения (Ю. Урал): Препринт. Уфа, 1994. 20 с.
- Знаменский С.Е.** Структура золоторудного месторождения Миндяк (Ю. Урал) // Геологический сборник № 1 / ИГ УНЦ РАН. Уфа, 2000. С. 20–22.
- Знаменский С.Е.** Сдвиги и их роль в образовании месторождений золота Магнитогорского мегасинклиория (Южный Урал) // Эволюция тектонических процессов в истории Земли: Мат-лы XXXVII тектонического совещания. Т. 1. Новосибирск: СО РАН, филиал «Гео», 2004. С. 191–192.
- Казанцев Ю.В., Казанцева Т.Т., Камалетдинов М.А.** Особенности структуры и ее влияние на рудообразование в районе нижнего течения р. Миндяк на Ю. Урале // Новые данные по золоторудным месторождениям Урала. Свердловск: Изд-во УНЦ РАН, 1990. С. 75–81.
- Месторождения золота** Урала / *В.Н. Сазонов, В.Н. Огородников, В.А. Коротеев и др.* Екатеринбург: ИГГА, 1999. 570 с.
- Мурзин В.В., Бортников Н.С., Сазонов В.Н. и др.** Происхождение рудообразующего флюида на Миндякском золоторудном месторождении (Южный Урал) // Эволюция внутриконтинентальных подвижных поясов: тектоника, магматизм, метаморфизм, седиментогенез, полезные ископаемые: Мат-лы науч. конф. (9-е чтения А.Н. Заварицкого). Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН, 2003. С. 197–199.
- Николаев П.Н.** Методика статистического анализа трещин и реконструкции полей палеонапряжений // Изв. Вузов. Геол. и разв. 1977. № 12. С. 103–115.
- Рожков И.С., Шер С.Д.** Мелентьевское золоторудное месторождение // Геология главнейших золоторудных месторождений СССР. М.: ОБТИ, 1952. Т. 3. С. 139–209.
- Салихов Д.Н., Бердников П.Г.** Магматизм и оруденение позднего палеозоя Магнитогорского мегасинклиория / БФАН СССР. Уфа, 1985. 96 с.
- Серавкин И.Б.** Вулканизм и колчеданные месторождения Южного Урала. М.: Наука, 1986. 268 с.
- Старостин В.И.** Палеотектонические режимы и механизмы формирования структур рудных месторождений. М.: Недра, 1988. 256 с.
- Mc Clay K.** The mapping of geological structures. London: Open University press, 1995. 161 p.