

СТРУКТУРНАЯ ПОЗИЦИЯ И ВРЕМЯ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОЖИЛКОВО-ВКРАПЛЕННЫХ РУД САФЬЯНОВСКОГО Zn-Cu МЕСТОРОЖДЕНИЯ (СРЕДНИЙ УРАЛ)

© 2009 г. А. Ю. Кисин

*Институт геологии и геохимии УрО РАН
620075, г. Екатеринбург, Почтовый пер., 7
E-mail: kissin@igg.uran.ru*

Поступила в редакцию 21.01.2009 г.

Предыдущими исследователями Сафьяновское Zn-Cu сульфидное месторождение отнесено к колчеданному типу. Время образования оценено как D₂–C₁. Изучение характера разрывной тектоники в карьере Сафьяновского месторождения показывает ее коллизионную природу. Структуру месторождения определяют тектонические клинья, с острями направленными вниз. Крупные клинья состоят из более мелких. По данным глубинного сейсмического зондирования глубина распространения клиновидных форм достигает 8 км. Большое распространение имеют тектонические брекчии и мегабрекчии, иногда вмещающие рудные тела. Сульфидные руды тектоническими процессами почти не затронуты. Восточный разлом, ограничивающий месторождение с юго-востока, отнесен к малоамплитудному взбросу и имеет признаки рудоподводящего тектонического нарушения. Рудные тела сосредоточены в его висячем боку. Структура и генезис месторождения непротиворечиво объясняются с позиций модели общекоровой блоковой складчатости. Месторождение отнесено к эпitherмальному типу сульфидных руд. Вероятное время образования C₁–P.

Ключевые слова: Урал, рудные месторождения, тектоника, геодинамика.

ВВЕДЕНИЕ

Сафьяновское меднорудное месторождение было открыто в 1985 г. и эксплуатируется с 1994 г. По составу основных руд оно относится к сульфидному медно-цинковому типу. С момента открытия месторождения исследователями предложено несколько моделей его геологической позиции и генезиса [7, 8, 10, 11, 15–17], различающихся в деталях, но близких в отношении определения типа месторождения и времени его формирования. Тип месторождения считается колчеданным, а время его образования оценивается средним девоном–ранним карбоном. Геологическое описание района и самого месторождения дано в ряде публикаций и кратко приводится ниже. Однако многие вопросы геологии и генезиса месторождения остаются дискуссионными, а структура месторождения изучена недостаточно.

Цель проведенных автором исследований заключалась в изучении структуры и генезиса месторождения с позиций модели блоковой складчатости [5 и др.]. Методика исследований включала анализ структурной позиции месторождения, изучения характера разрывной тектоники в бортах Сафьяновского карьера и ее соотношения с рудными телами. Подобные исследования проводились и ранее, но все предыдущие исследования структуры месторождения опирались преимущественно на данные

бурения и результаты изучения самых верхних горизонтов карьера. В настоящее время глубина карьера достигла 120 м, что позволяет изучать трещиноватость в менее выветрелых породах и на значительных по площади разрезах, т.е. наблюдать действительную структуру месторождения непосредственно в бортах карьера.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ГЕОЛОГИИ САФЬЯНОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ И ЕГО ОКРУЖЕНИЯ

Сафьяновское месторождение медно-цинковых сульфидных руд расположено на восточном склоне Среднего Урала, в Восточно-Уральской мегазоне, и приурочено к южной части Режевской структурно-формационной зоны (СФЗ), имеющей субмеридиональное простирание. На западе она граничит с Мурзинско-Адуйским, а на востоке с Красногвардейским блоками. Разными исследователями эти блоки относятся к гранитным массивам, гранито-гнейсовым или гнейсово-мigmatитовым комплексам, срединным массивам, выступам древнего фундамента, террейнам и пр. Их происхождение здесь не обсуждается и для обозначения использован нейтральный термин “блок”. Границы между этими тремя структурами тектонические.

В строении Режевской СФЗ принимают участие вулканогенные, вулканогенно-осадочные и

карбонатно-терригенные комплексы девон–нижекаменноугольного возраста [7, 16 и др.].

Широко распространены тектонические нарушения различного ранга, в т.ч. надвиги. Надвигание более древних пород на более молодые доказано глубоким бурением [17]. Под Останинским гипербазитовым массивом бурением вскрыты позднейфельские базальты глинского комплекса, надвинутые на фаменские граувакки. Около с. Арамашево, в долине р. Реж, под эйфельскими известняками вскрыты раннекаменноугольные терригенные отложения. Вблизи с. Толмачево, на р. Нейве, эйфель-живетские известняки полого надвинуты на живетские андезит-базальтовые пирокластиты. Около с. Верхняя Синячиха эйфель-живетские андезитовые туфы перекрываются раннейфельскими кремнистыми породами, выше которых лежат пражско-эйфельские известняки. Возраст надвигов оценивается как раннекаменноугольный, что связывается цитируемыми авторами с коллизией дуга-микроконтинент. Упоминается также серия субвертикальных сбросо-сдвигов, которые связываются с этапом межконтинентальной аккреции.

По результатам геологосъемочных работ, здесь выделено три тектонических пластины, разделенные надвигами западного падения под углом 25–45°. Они получили названия Останинская, Бороухинская и Мелкозеровская [7]. К южной части Бороухинской тектонической пластины приурочено Сафьяновское месторождение. А.В. Коровко и Д.А. Двоглазовым выделяется Сафьяновская полифациальная вулканокупольная структура, осевая часть которой осложнена субмеридиональной депрессией шириной до 250 м, выполненной эксплозивными брекчиями. Депрессия имеет в плане и разрезе флексуобразную форму и фиксирует правый взбросо-сдвиг. “Под воздействием динамических напряжений, унаследованно сохраняющихся с предрудной стадии в корневой части депрессии, ...возникает объемная зона сколовых трещин, явившихся рудоподводящим каналом. В депрессии над зоной истечения горячие рудоносные растворы резко охлаждались морской водой..., что обусловило относительно высокую скорость отложения сплошных... колчеданных руд осадочно-натечным способом” [7, с. 153, курсив А.К.]. Почти одновременно на глубине шло вкраплено-прожилковое гидротермально-метасоматическое рудообразование. “Полизональный ореол гидротермально-метасоматических изменений и геохимический ореол с четко выраженными тыловыми, окolorудными и фронтальными сечениями однозначно свидетельствуют о нормальном залегании месторождения” [7, с. 153, курсив А.К.]. На этом основании цитируемыми авторами выделяется “сафьяновский подтип” колчеданного оруденения Восточно-Уральской мегазоны. Время оруденения оценивается как фаменско–турнейское.

С юго-запада рудное поле перекрывается гипербазитами Режевского массива, для которых предполагается шарьяжная природа. Некоторые исследователи считают его ретрошарьяжем, с амплитудой горизонтального перемещения 100–130 км из зоны Главного Уральского разлома [1, 16, 17]. Сафьяновское месторождение также включено в состав “клипа альпинотипного шарьяжа”. Этими исследователями рудное поле разделено на три тектонических пластины: Кондихинскую, Сафьяновскую и Восточно-Сафьяновскую. Вулканические и субвулканические образования, по мнению одних исследователей представляют гомотромный ряд дифференциатов базальт-андезит-дацит-риодацит-риолитовой формации [7, 8,]; другие относят их к “типичной толеитовой формации” [16, 17]. Р.Г. Язева с соавторами [16] выделяют два типа руд. *Ранние*, вулканогенно-осадочные, связанные с затухающим островодужным толеитовым вулканизмом D_2 . *Поздние*, гидротермально-метасоматические, связанные с живетским (?) вулканизмом андезит-дацитовой формации. К ранним отнесены сплошные колчеданные руды, которые, по мнению цитируемых авторов, отлагались в неравновесных условиях смешения горячих гидротермальных растворов с морской водой. Температура образования сплошных руд оценивается в 230–370°C. К ранним отнесены и богатые рудные столбы, которые формировались при температуре 150–220°C. Более поздние, прожилково-вкрапленные руды формировались при температуре 490–370°C.

В.А. Прокин и др. [11] также пишут о сходстве Сафьяновки с “уральским типом колчеданных месторождений”, но отмечают и существенные различия: 1) расположенность в восточной вулканогенной зоне Урала с корой субконтинентального типа; 2) принадлежность вулканитов к андезит-дацитовой формации; 3) обилие субвулканических тел и даек кварцевых порфиров, широкое развитие эксплозивных и гидротермальных брекчий; 4) широкий ореол окolorудных метасоматических изменений пород. По этим признакам Сафьяновское месторождение отнесено к “малокавказкому типу”. По мнению цитируемых авторов, месторождение связано с эксплозивными брекчиями, заполнившими образовавшуюся после взрыва депрессию вблизи жерла вулкана. Одновременно отлагались “обломочные гидротермально-осадочные сульфидные руды”. Прожилково-вкрапленные руды формировались “гидротермально-метасоматическим способом”. Рудоносные растворы поступали по зоне объемной трещиноватости. На коллизионном этапе месторождение было перемещено к востоку и испытало вращение, из-за чего медно-цинковые руды оказались в его восточной части.

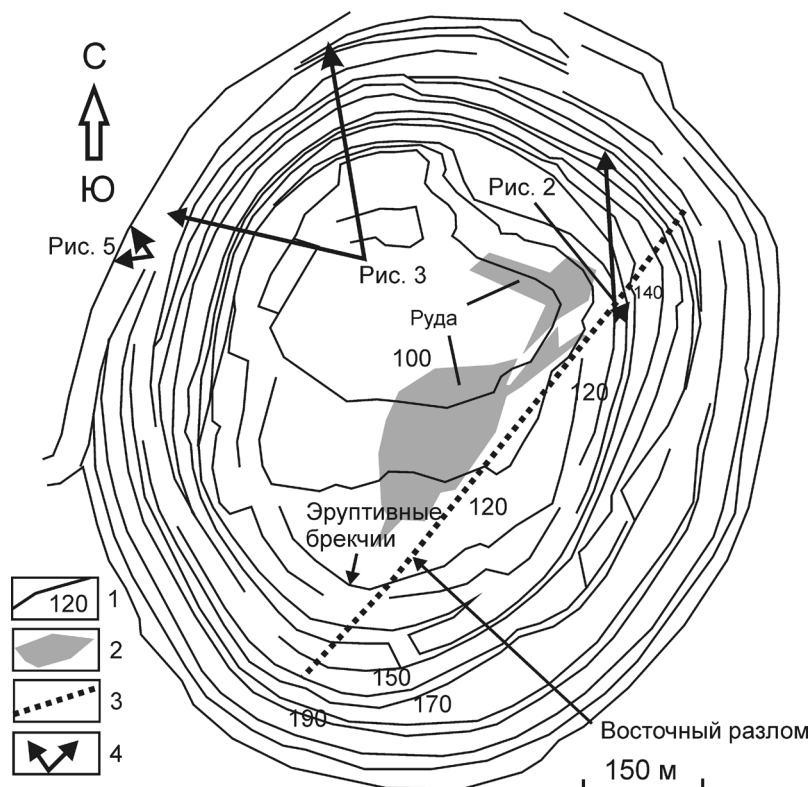


Рис. 1. Схематический план Сафьяновского карьера.

1 — линии уступов с абсолютными отметками; 2 — рудные тела; 3 — Восточный разлом; 4 — участки карьера, показанные на других рисунках.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Трещинная тектоника охватывает все месторождение, подтверждая выводы предшественников о наличии “зоны объемной трещиноватости”. В пределах Сафьяновского карьера (рис. 1) выделены Сафьяновский и Восточный разломы [7, 11]. Сафьяновский разлом (Западный, по [17]) ограничивает месторождение с запада, а Восточный с востока. Первый представлен субвертикальной *зоной дробления и рассланцевания* мощностью 3–5 м [11]. В ней “присутствуют полуокругленные линзовидные (тектонически обжатые) обломки кварцевых порфиров, туффитов, песчаников, серицит-кварцевых метасоматитов, массивных и вкрапленных руд величиной до 5–8 см, разделенные глиной трения” [11, с. 276]. Мной, при обследовании карьера в 2008 г., Сафьяновский разлом на данном месте не обнаружен. Под приведенное выше описание близко подходят брекчии, которые по ряду признаков можно отнести к “эруптивным”. Ширина тела “эруптивных брекчий” в борту карьера около 10 м, контакты резкие, субвертикальные. В непосредственной близости наблюдаются более мелкие тела аналогичных пород. Восточная часть тела представлена темно-серыми, неравномерно окра-

шенными мелкозернистыми скальными породами с флюидалной текстурой. Местами она содержит округлые приплюснутые образования размером до 5 см (предположительно автолиты) и обломки вмещающих пород. Последние имеют либо угловатые очертания, либо причудливо изогнуты в результате пластических деформаций. Вмещающие породы разбиты трещинами скалывания на глубину около 1 м. Основная часть тела сложена брекчией, со слабо проявленной субвертикальной флюидалностью. Обломки представлены вмещающими породами. Цементом служит тот же измельченный материал, каолин и серицит. В западном контакте во вмещающих породах наблюдается малоомощная зона трещин скалывания (R-сколы), указывающая на восходящее перемещение брекчий. Возможно, что данное тело брекчий представлено дайкой, приуроченной к Сафьяновскому разлому. Но здесь отсутствуют глина трения и рассланцевание, а тело брекчий не прослеживается по простиранию. Более вероятно столбообразная форма тела. Вполне вероятно, что Сафьяновский разлом в бортах и на нижних горизонтах карьера выражен недостаточно отчетливо.

Восточный разлом отчетливо наблюдается лишь в восточном борту карьера на горизонтах 150 и 160 м (рис. 1, 2). В.А. Прокиным и др. [11] он описывается как система сближенных смести-

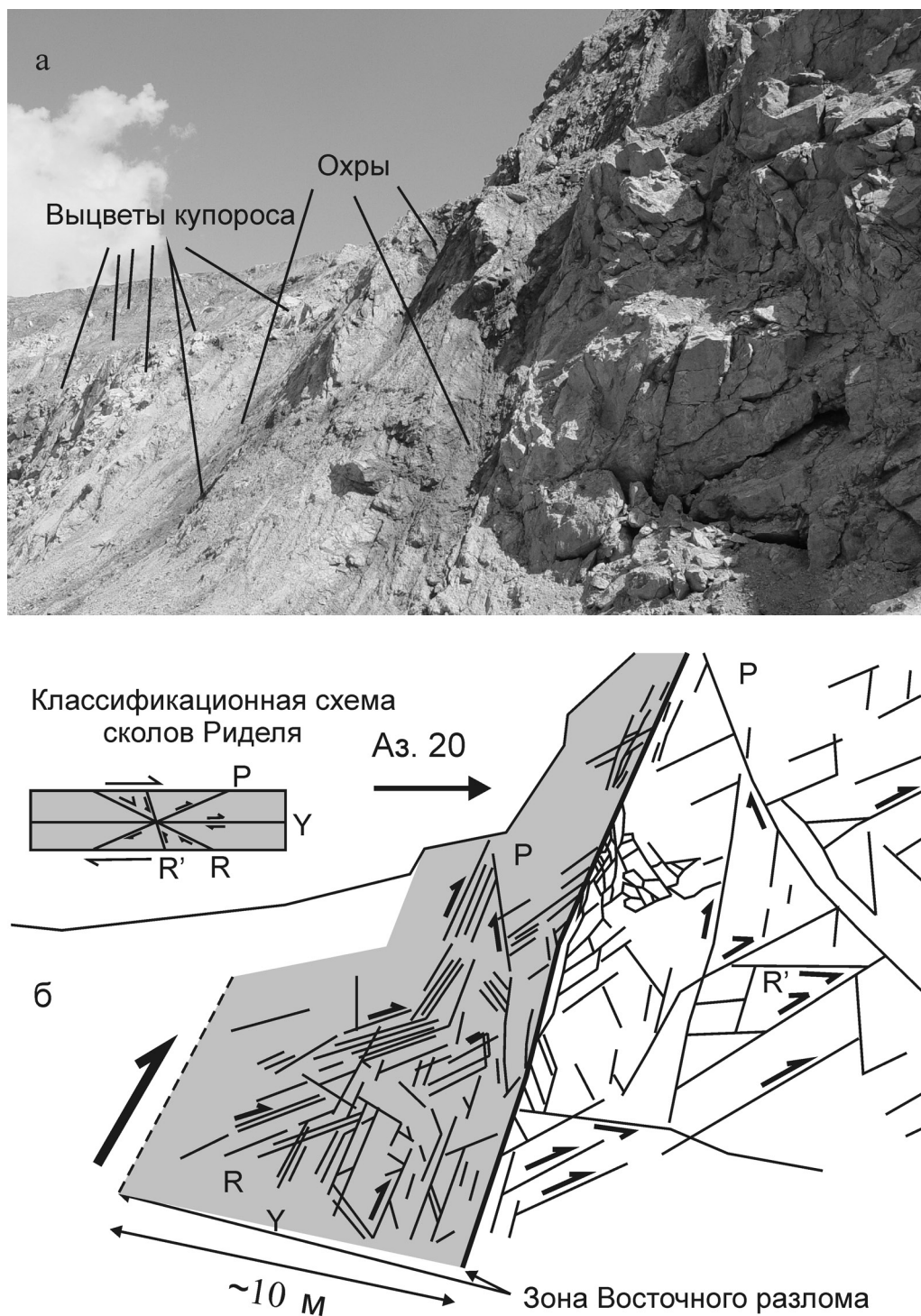


Рис. 2. Восточный разлом (а) и интерпретация типов трещин по классификации Риделя (б). Пояснения в тексте.

телей мощностью 1–2 м, простирающихся по азимуту 20–30° и падающих на запад под углом 50–80°. На горизонтах 150 и 160 м данный разлом имеет простираение 200–205° и угол падения 60–73° на запад. Линия разлома резкая, отчетливая, подчеркнутая сильным освещением пород висячего бока (рис. 2а). Глинка трения и зеркала скольжения

на данном участке разлома не наблюдаются. В *лежащем* боку разлома породы скальные, сильно тектонизированные. Здесь распространены трещины скалывания R-типа (по классификации Риделя [18]), имеющие падение в западных румбах, указывающие на взбросовый характер данного тектонического нарушения (рис. 2б). Реже наблюдаются

трещины R-типа. Трещины Y-типа, параллельные плоскости сместителя, единичные. В непосредственной близости от основного сместителя местами наблюдается брекчирование пород.

Породы *висячего* бока в зоне шириной около 10 м разбиты серией сближенных параллельных трещин кливажа разлома (Y-сколы) на плиты, мощностью первые сантиметры. В зоне кливажа разлома местами просматривается мелкая трещиноватость, ориентированная под острым углом к кливажу, образующая несколько систем. Они, вероятно, представляют все или почти все типы трещин, выделенных Риделем. Часть из них показана на рис. 2б. В зоне развития кливажа порода сильно катаклазирована, подверглась физической и химической дезинтеграции вплоть до достижения сыпучего состояния. Широко распространены выцветы купороса, протягивающиеся шлейфом на верхние и нижние горизонты.

Далее к северо-западу, в висячем боку разлома, в интервале около 150–200 м распространены сильно тектонизированные осветленные породы, часто с гнездами руды и выцветами купороса. Система трещин та же, что и в зоне Восточного разлома, но менее интенсивная. Видимые скопления руды наблюдаются только по трещинам и непосредственно вблизи них, т.е. имеется отчетливый тектонический контроль рудной минерализации. В лежащем боку Восточного разлома гнезда руды и выцветы купороса наблюдаются лишь в интервале 10–15 м от разлома и также приурочены к отдельным трещинам скалывания. Масштаб оруденения лежащего бока сильно уступает оруденению висячего бока, к которому приурочены все промышленные рудные тела (рис. 1). По совокупности признаков Восточный разлом полностью удовлетворяет понятию **рудодоподводящий канал**. К югу от описанного участка он достаточно уверенно прослеживается по нижним горизонтам и по южному борту карьера до горизонта 160 м. Однако, здесь он уже менее выразительный и его продолжением к югу может быть любая крупная трещина скалывания, которые имеются на месторождении в изобилии. Схожая ситуация складывается и при прослеживании Восточного разлома к северу: он также расщепляется на несколько крупных трещин скалывания близкого простирания. Глубокоэшелонированная система трещин скалывания, отсутствие милонитов, глинки трения и зеркал скольжения дают основание предполагать крайне незначительную амплитуду смещений по данному разлому, которая, вероятно, не превышает нескольких метров или десятков метров.

В восточном борту карьера на горизонте 140 м к данному разлому со стороны лежащего бока примыкает пологое прямолинейное тектоническое нарушение, падающее на юг под углом около 15°. По нему идет поступление в карьер грунтовых вод, что делает его весьма заметным. В лежащем боку нарушения наблюдаются выцветы купороса. Прямоли-

нейная форма и пологое падение дали основание предположить надвиговую природу данного нарушения. Однако изучение его вблизи показало, что местами разлом представлен лишь системой кулисообразно расположенных трещин скалывания R-типа. Глинка трения отсутствует. Вблизи Восточного разлома это нарушение теряется среди оперяющих трещин скалывания. По совокупности признаков оно также отнесено к крупной трещине скалывания. В обоих боках данного нарушения распространены брекчии. Соответствие геометрии границ смежных обломков и их мономиктный состав указывают на тектоническую природу данных образований. В цементе наблюдаются гнезда халькопирита, что указывает на дорудное образование брекчий. Подобные брекчии имеют широкое распространение на месторождении.

Среди многообразия трещин скалывания, наблюдаемых в бортах Сафьяновского карьера, особый интерес вызывают трещины, образующие клинья или систему клиньев, с остриями направленными вниз. Они наблюдаются в различных частях карьера, но особенно широко проявлены в его северной части (рис. 3). Здесь, в северо-западном борту карьера преобладают три системы трещин: 1) угол падения 35° ($\pm 5^\circ$) по азимуту 170° ($\pm 10^\circ$) ЮЮВ; 2) угол падения 40° ($\pm 5^\circ$) по азимуту 360° ($\pm 10^\circ$) на север; 3) угол падения 60° ($\pm 5^\circ$) по азимуту 135° ($\pm 10^\circ$) ЮВ. (Ввиду требований техники безопасности все замеры производились дистанционно, с расстояния 1–3 м). Несколько южнее, по северо-западному борту карьера преобладают трещины с углами падения 40–50° по азимуту 310° СЗ и 25–50° по азимуту 140° ЮВ. Все эти трещины прямолинейные, нередко кулисообразные. Зеркала скольжения наблюдаются исключительно редко. Глинка трения не наблюдалась. Поверхность бортов трещин обычно мелкоступенчатая, сформированная системой мелких кулисообразно расположенных прямолинейных трещин скалывания R-типа и ограничивающих их трещин отрыва. Все это указывает на сколовый характер трещин в северо-западном борту карьера и отсутствие значимых смещений по ним. Все данные трещины скалывания имеют взбросо-надвиговую кинематику с крайне незначительными амплитудами смещений.

Трещины ранжированы по размерам и, соответственно, образуемые ими тектонические клинья также по размерам ранжированы: крупные клинья, с размахом на всю глубину карьера, содержат внутри себя подобные клинья меньших размеров, а те в свою очередь содержат еще более мелкие клинья и т.д. Вплоть до размеров обычного образца (рис. 4). Данный образец ориентированный. Изучение его шлифованной поверхности и ориентированных прозрачных шлифов оптическими методами показали глубокие гидротермально-метасоматические изменения породы и развитие

ЮЗ

Выцветы купороса

СВ



Рис. 3. Тектонические клинья в северо-западном борту карьера.

микротрещин скалывания и растяжения. Трещины скалывания прямолинейные, ориентированные субпараллельно боковым поверхностям образца и залечены кварцем. Они часто нарушены микросдвигами, при пересечении с трещинами скалывания другой ориентировки. Трещины растяжения ориентированы вдоль горизонтальной поверхности образца. Выполнены они кварцем и карбонатом, местами с сульфидной минерализацией. Форма жил линзовидная. Жилы резко изменчивы по простиранию и мощности. Все эти факты показывают, что образование трещиноватости происходило одновременно с гидротермально-метасоматическим процессом и после потери активности какой-то трещиной, она тут же заполнялась гидротермальными минералами. Возвращаясь к рис. 3, заметим, что тектонические клинья построены по тому же принципу: боковые поверхности ограничены трещинами скалывания, а верхняя часть клина обычно завершается зоной субгоризонтального брекчирования, образовавшейся в условиях горизонтального сжатия и вертикального растяжения.

Внутреннее строение тектонического клина хорошо видно на рис. 5, но верх его срезан уступом (цифра 6) и поэтому зона горизонтального брекчирования отсутствует. Границы клина отчетливо

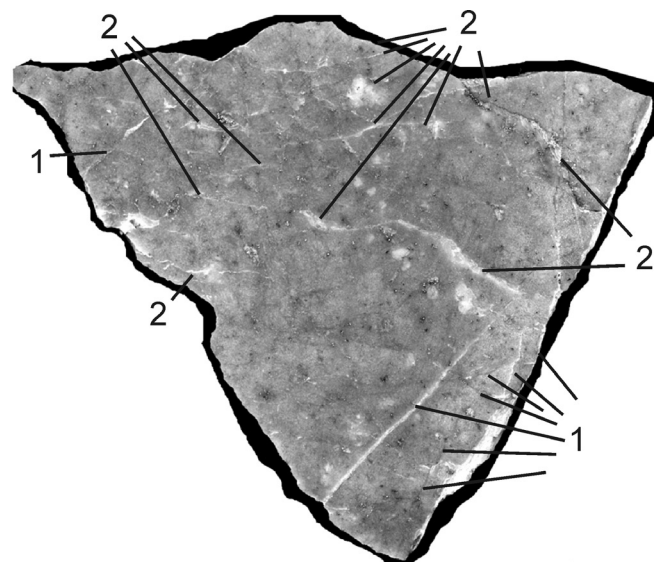


Рис. 4. Ориентированный шлифованный образец (ширина – 7 см) из основания тектонического клина (см. рис. 3).

Цифры: 1 – наиболее крупные трещины скалывания, 2 – трещины растяжения. Пояснения в тексте.

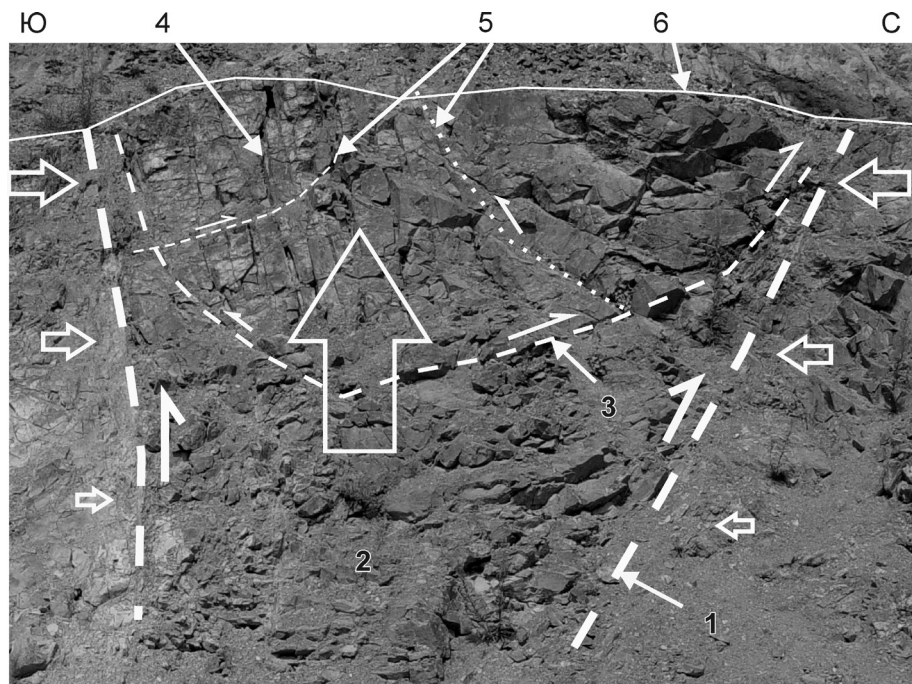


Рис. 5. Особенности строения тектонического клина. Пояснения в тексте.

выделяются тектоническими нарушениями (цифра 1) и резкой сменой стиля деформации. Они имеют крутое падение, что объясняется уже состоявшимся значительным перемещением клина вверх и вращением плоскостей сместителей. В результате этого порода в нижней части клина (цифра 2) сильно катаклазирована и показывает флюиальность, ориентированную вдоль его границ. Верхняя часть клина сложена менее трещиноватыми породами и ограничена криволинейными поверхностями (цифра 3), образующими быстро выклинивающийся с глубиной небольшой клин. В левой части клина наблюдается начальный кливаж (4), ориентированный параллельно смежной границе клина. Наблюдается, также зарождение двух небольших клиньев (5) в верхней части основного клина. Образование такого типа клиньев невозможно в условиях однородного по интенсивности горизонтального сжатия. Для этого необходимо дифференцированные в вертикальной плоскости сжимающие напряжения (градиентное поле), как это показано изменением размеров больших стрелок на рис. 5.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

На Сафьяновском месторождении трудно найти какие-либо объемы нетектонизированных пород: месторождение целиком расположено в области развития трещин скалывания, что подчеркивается и другими исследователями [7, 11]. В то же время, в карьере не встречено тектониче-

ских нарушений, имеющих сколько-либо значимые амплитуды смещений, хотя само месторождение по данным разведочного бурения приурочено к надвиговой тектонической пластине [1, 7, 10, 17]. В окрестностях месторождения известны и другие надвиговые структуры, подтвержденные бурением. Но из экспериментальных работ хорошо известно, что шарьяжно-надвиговые структуры возникают либо в результате действия приложенной извне тектонической силы, либо в результате действия внутренних сил [4 и др.]. Область "объемной трещиноватости" под действием внешних сил не возникает, поскольку для ее развития нужны внутренние сжимающие напряжения, т.к. катаклазированная порода неспособна передавать тектонические напряжения на расстояние. Как могли возникнуть внутренние сжимающие напряжения в земной коре на участке Сафьяновского месторождения? Рассмотрим эту проблему подробнее.

Некоторыми исследователями развивается идея "ретрошарьяжа" [1, 16, 17], согласно которой Сафьяновское месторождение было перемещено из Тагильской мегазоны на восток на расстояние 100–130 км. Другие исследователи считают эту идею недостаточно обоснованной и высказывают сомнения в реальности столь больших перемещений [7, 12]. В ретрошарьяже катаклазированные объемы пород участвовать не могли по реологическим характеристикам среды. Но сторонники идеи ретрошарьяжа считают, что коллизионные процессы наложенные и только усложнили его структуру [16]. В та-

ком случае непонятен сам механизм возникновения ретрошарьяжа на доколлизийном этапе.

Как было показано выше, на месторождении широко развита система тектонических клиньев различных масштабов. Именно они, на наш взгляд, повинны в неустойчивости бортов карьера, что создало проблему его дальнейшего углубления. Наличие тектонических клиньев на месторождении было отмечено и другими исследователями. “Структура северной (главной) залежи, выходящей непосредственно под наносы, усложнена тектоническим дроблением, сгущиванием блоков медных и медно-цинковых колчеданов. Морфологически она выглядит как клинообразное тело, ограниченное с запада и востока тектоническими плоскостями” [17, с. 52]. Восточный и Сафьяновский (если такой существует) разломы образуют тектонический клин, о котором идет речь в цитируемой работе. По мнению этих авторов, тектонический клин сформировался в пострудную стадию. Они пишут, что Западный тектонический контакт залежи (Сафьяновский разлом) погружается круто ($45-80^\circ$) на восток и поскольку разлом контролирует размещение богатых халькопиритовых штоков, то он отнесен к синвулканическим. Это не может считаться аргументом для суждения о времени образования и природы данного разлома, но из этого высказывания следует, что Сафьяновский разлом является *рудоконтролирующим*.

Восточная тектоническая граница месторождения проводится по Восточному разлому, который отнесен цитируемыми авторами к пологому внутриформационному надвику, срезающему “корни” сульфидной залежи. Наши исследования привели к выводу, что он не является надвигом, а больше отвечает малоамплитудному взбросу (крупной трещине скалывания). Область интенсивного брекчирования пород расположена преимущественно в висячем боку Восточного разлома. Здесь же расположены и все промышленные рудные тела, брекчирование которых является скорее редким исключением, чем правилом. При изучении 60 полированных образцов руды из коллекции В.П. Молошага, только в 3 образцах отмечена незначительная трещиноватость. Даже руды “осадочного” происхождения остались не нарушенными. Тектонизированные породы подвергнуты глубоким гидротермально-метасоматическим преобразованиям. Изучение этих пород в образцах и шлифах показывает, что гидротермально-метасоматическая переработка пород была син- и посттектонической. Об этом свидетельствует однотипность “залеченной”, неоднократно обновленной мелкой трещиноватости в метасоматически измененных породах, и система трещин. Взбросовая кинематика Восточного разлома и стиль хрупких деформаций пород показывают, что они образовались в условиях горизонтального сжатия. Такие геодинамические условия в мобильных

поясах возникают на коллизийном этапе. Судя по тому, что деформациями охвачены визейские отложения, режим горизонтального сжатия имел место в поствизейское время. Все это ставит под сомнение пострудное время образования Восточного разлома, как это предполагается некоторыми исследователями [16, 17]. По всем признакам данный разлом относится к *рудоподводящим*. Сформироваться он мог только на коллизийном этапе в поствизейское время. Радиологические возраста серицитов околорудных метасоматитов, определенные калий-аргоновым методом, дают две изохроны: 350 ± 2 млн. лет и 267 ± 6 млн. лет [17]. Первая датировка связывается данными исследователями с визейским этапом коллизийных процессов, вторая – с пермским этапом гиперколлизии на Урале. По мнению автора, вторая цифра отвечает постколлизийным процессам, поскольку этот этап характеризуется усилением гидротермальной деятельности, что должно быть отражено в минеральных ассоциациях. Близкие датировки (350 млн. лет) дает и Pb-Pb метод по галениту [14].

А.И. Грабежев [2, 3] установил первичную зональность метасоматических ореолов месторождения. Вблизи подводящего канала фоновые хлорит-иллит-кварцевые метасоматиты формировались при температуре 350°C и выше. По мере удаления от рудоподводящих каналов наблюдается смена мусковит-иллита 2M1 гидроиллитом t-1M, что указывает на понижение температуры до $200-250^\circ\text{C}$. Нарушений метасоматической зональности тектоническими процессами не отмечается. Надрудные низкотемпературные метасоматиты представлены бессульфидной каолинит (диксит)-анкерит-иллит/серицит кварцевой ассоциацией. Судя по минеральному составу надрудных метасоматитов, и учитывая высокую степень катаклазированнойности пород, это могут быть линейные коры химического выветривания, связанные с процессами окисления сульфидных руд.

Представляется, что ключевым моментом в решении проблемы структуры и генезиса Сафьяновского месторождения являются тектонические клинья, о которых говорилось выше. На первый взгляд образование данных клиньев происходит достаточно просто: хрупкие деформации в условиях горизонтального сжатия. Но для этого необходимо горизонтальное сокращение ниже расположенной коры и, соответственно, ее утолщение. Кроме того, выше было показано, что клинья делятся на все меньшие и меньшие вплоть до размеров обычного штуфа. На рис. 6 видна глубинная структура Режевской СФЗ, представленная системой клиньев, охватывающей земную кору до глубины около 8 км. Это та самая область объемной трещиноватости, для образования которой необходимы внутренние сжимающие напряжения. Такие напряжения в верхней части земной коры возникают в случае ее продольно-

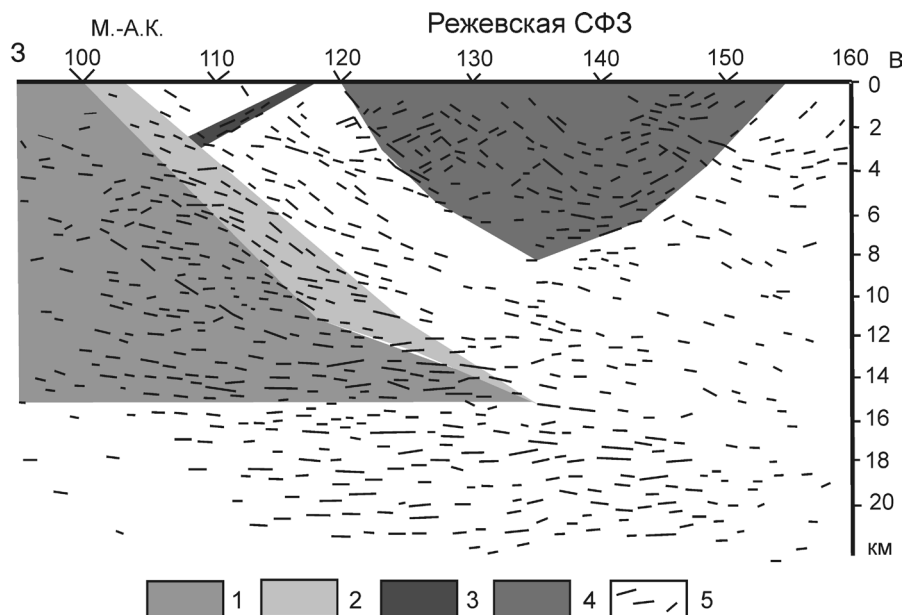


Рис. 6. Фрагмент восточной части Черноисточинского профиля ГСЗ по [13], показывающий распространение тектонических клиньев до глубины 8 км.

1 – Мурзинско-Адуйский гранито-гнейсовый комплекс (блок положительного изгиба), 2 – зона надвига, 3 – дуплексы скалывания с надвиговой кинематикой, 4 – тектонический клин, 5 – отражающие площадки. Сокращения: М.-А. К. – Мурзинско-Адуйский комплекс, СФЗ – структурно-формационная зона. Пояснения в тексте.

го отрицательного изгиба [9, 5 и др.]. Деформации, связанные с изгибом коры, сложные, происходящие в дифференцированном, градиентном поле напряжений, возрастающих от нейтральной поверхности и достигающих максимума около дневной поверхности.

На рис. 7 показана верхняя часть (зона горизонтального сжатия) блока отрицательного изгиба коры. Такой изгиб возникает в результате действия ориентированных сжимающих тектонических сил (большие стрелки). Границами блока служат зоны простого сдвига (в физическом смысле слова), развивающиеся в условиях горизонтального сжатия, иначе говоря – транспрессионные зоны. В результате этого возникают изгибающие моменты, перераспределяющие и фокусирующие напряжения. Ниже нейтральной поверхности возникают условия растяжения, а выше ее – условия сжатия. Величина напряжений прямо пропорциональна расстоянию до нейтральной поверхности. Качественная эпюра напряжений сжатия и частично растяжения показана на рис. 7а. Напряжения, связанные с изгибом – внутренние (объемные), проявляющиеся в любом элементарном объеме блока. Возникновение сжимающих напряжений вызывает появление и касательных (сдвиговых) напряжений, векторы которых показаны на рис. 7б (пунктирная линия). Величина касательных напряжений напрямую зависит от величины нормальных напряжений. Поэтому они равняются нулю на нейтральной поверхности и до-

стигают максимума у дневной поверхности (в направлении стрелки). Направление сдвиговых деформаций показано полустрелкой. Сдвиговые деформации также объемные. В результате возникает объемная трещиноватость, согласная с направлением векторов максимальных касательных напряжений (рис. 7в, сплошные тонкие линии). Развитие трещиноватости начинается сверху, где касательные напряжения максимальные, и постепенно распространяется вниз в направлении стрелок. По мере локализации сдвиговых деформаций трещины укрупняются. Амплитуды смещений по ним достигают максимума у дневной поверхности, падая с глубиной до нуля. Это вызывает разрыхление (брекчирование и мегабрекчирование) верхних горизонтов блока и возникновение пустотного пространства, заполняемого метеорными или захороненными морскими водами. Большинство возникших таким путем трещин имеют кинематику малоамплитудных надвигов и взбросов. Их развитие сопровождается образованием оперяющих вторичных сдвигов Риделя (R), синтетических сдвигов (P) и антитических сколов (R'), усложняющих систему общей трещиноватости.

Все это вместе составляет тектоническое течение, обеспечивающее изменение геометрии объема при продольном изгибе коры. Эллипсоиды мгновенных деформаций показаны на рис. 7в, г. Как показали эксперименты по моделированию блока отрицательного изгиба на глинисто-песчаных моде-

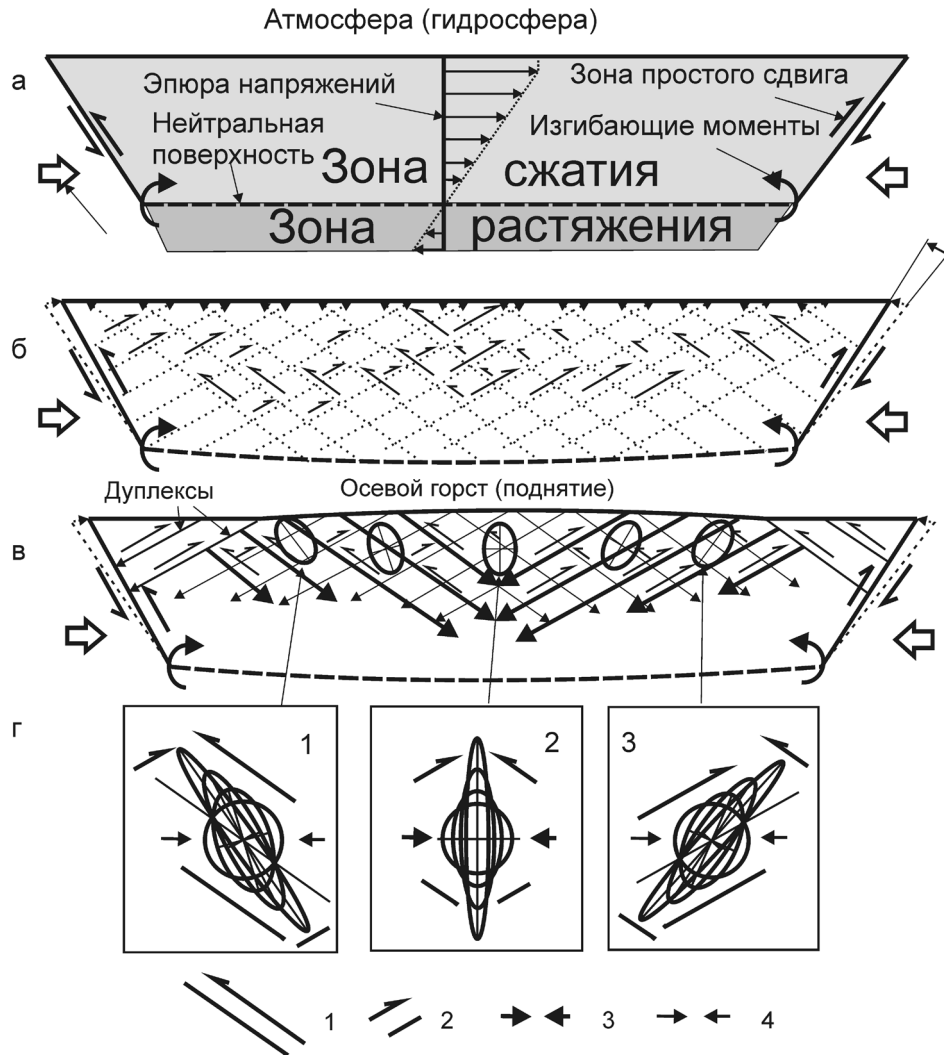


Рис. 7. Блок отрицательного изгиба: общий вид с качественной эпюрой напряжений (а); векторы главных касательных напряжений (б); структурный рисунок, образуемый разрывными нарушениями, с указанием их кинематики и эллипсами мгновенной деформации (в); эволюция эллипсов мгновенной деформации в сложном градиентном поле напряжений разных участков блока (г).

Для г): 1 – доминирующий простой сдвиг в градиентном поле напряжений; 2 – то же, второстепенный; 3 – чистый сдвиг доминирующий; 4 – то же, второстепенный. Пояснения в тексте.

лях (рис. 8), образование эллипсоидов деформации в левой половине блока обусловлено простым сдвигом, вызвавшим их вращение против часовой стрелки (рис. 7г, 1). В правой части блока вращение эллипсоидов мгновенной деформации осуществляется по часовой стрелке (рис. 7г, 3). К осевой части блока деформации простого сдвига постепенно сменяются деформациями чистого сдвига (для объема в целом), поэтому длинная ось эллипсоида постепенно приобретает вертикальное положение (рис. 7г, 2). При этом деформации чистого сдвига осуществляются посредством деформаций простого сдвига в малых объемах катаклазированных пород. Конечным результатом деформаций является тектоническое течение пород вверх.

Тектонические клинья являются частью такого тектонического потока. Вдоль боковых границ клина осуществляются деформации простого сдвига. Эллипсоиды мгновенных деформаций в правой части клина вращаются по часовой стрелке, в левой – против часовой стрелки. В осевой части клина длинная ось эллипсоида ориентированна вертикально, что связано с деформациями чистого сдвига для данного объема. Но чистый сдвиг в зоне хрупких деформаций осуществляется посредством простого сдвига в меньших объемах. В итоге клин испытывает растяжение, направленное вверх. Перемещение (выжимание) клина вверх приводит к возникновению в его основании брекчий. Сокращение горизонтальных размеров клина, вызванное враще-

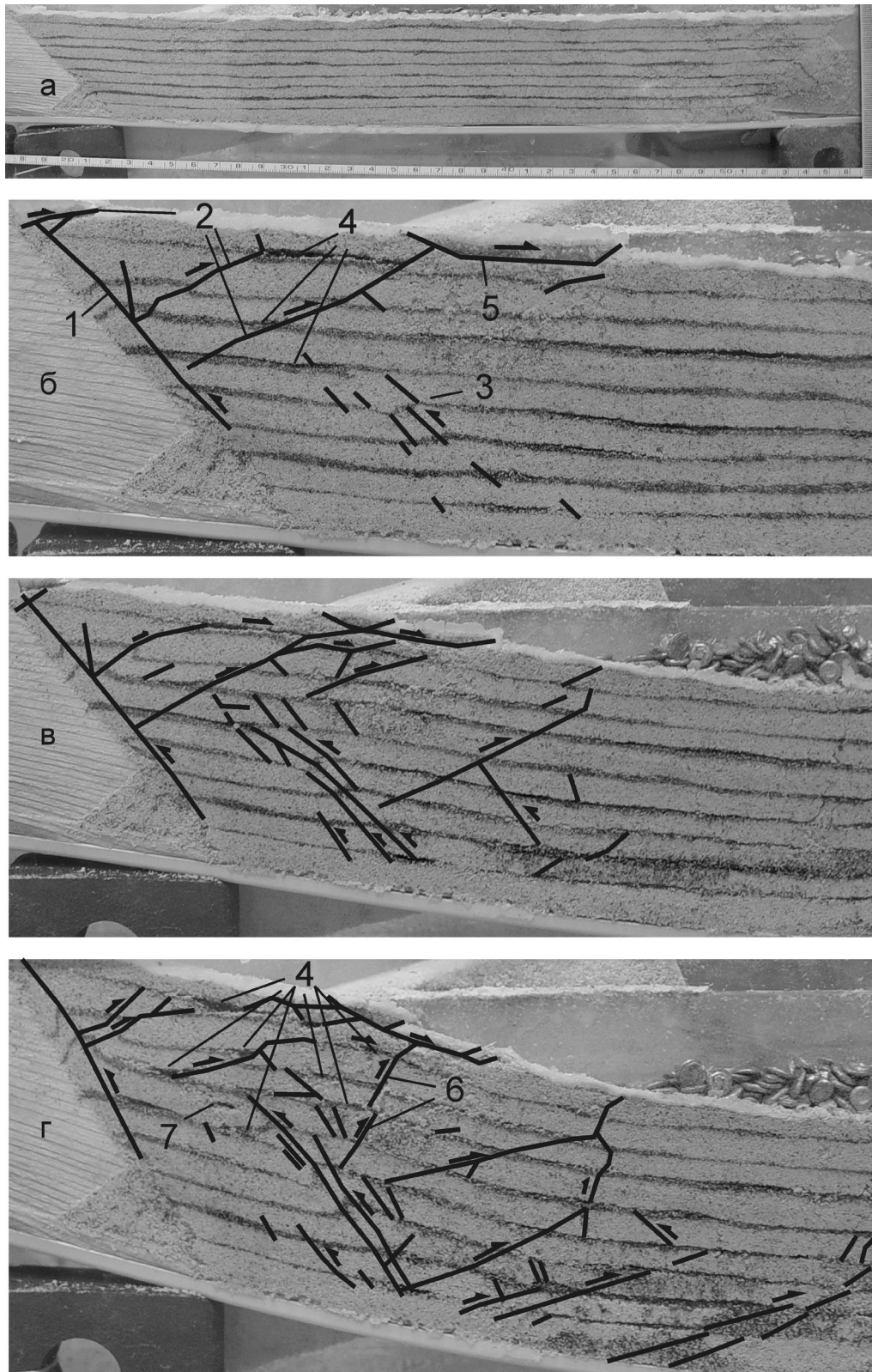


Рис. 8. Эксперимент по изучению структуро-подготовительной роли зоны сжатия блока отрицательного изгиба на модели из глинистых песков в стеклянной кювете: исходное положение (а), деформации при кривизне изгиба 10° (б), 18° (в) и 30° (г). Лежание бока надвигов представлены деревянными брусками, скрепленные в основании с пластиковой полоской, играющей роль нейтральной поверхности.

Цифры с указателями: 1 – надвиг, 2 – дуплексы скалывания, 3 – зона сдвига, 4 – отслоения, 5 – мегабречкирование, 6 – взброс.

нием его боковых поверхностей, вызывает образование в его верхней части зоны горизонтальных трещин отрыва и горизонтального брекчирования. Это позволяет развиваться тектоническому клину автономно, независимо от вышележащей и окружающей толщи, в то же время, являясь ее составной частью и подчиняясь общему стилю деформаций. Такой механизм позволяет развиваться внутри тектонического клина более мелким подобным клиньям, с такими же все более мелкими клиньями.

Структуроподготовительная роль блока отрицательного изгиба хорошо видна на рис. 6 и 8. На раннем этапе (рис. 8б) образовались надвиг, дуплексы скалывания, антиклинальное поднятие, зона мегабрекчирования и глубинная зона сдвига, которая позднее локализовалась в другую надвиговую зону (в, г). Формирование глубинной зоны сдвига сопровождалось образованием дуплексов скалывания в ее висячем боку, а верхняя часть зоны осложнилась взбросом и антиклинальным поднятием. В антиклинальных поднятиях возникли крупные трещины отслоения. В характере разрывных деформаций блока отрицательного изгиба хорошо отражена его структуроподготовительная роль: брекчирование и мегабрекчирование верхних горизонтов, формирование рудоподводящих и рудораспределительных каналов, образование значительного по объему трещинно-пустотного пространства.

Именно такую картину мы видим в Режевской СФЗ и на Сафьяновском месторождении: дуплексы скалывания, тектонические клинья, взбросы, брекчии и мегабрекчии. Амплитуды смещений максимальны около дневной поверхности и падают до нуля по падению трещины. Соответственно наибольшие амплитуды смещений характерны для наиболее протяженных по падению трещин. Вследствие такой тектоники трещинно-пустотное пространство возрастает снизу вверх и является хорошей средой для циркуляции метеорных или морских вод. Как было показано ранее [6], на прогрессивном этапе развития блока отрицательного изгиба коры в нем действует обратный (запирающий) градиент стрессовых напряжений (рис. 7а). В результате этого ювенильные флюиды не имеют возможности перемещаться вверх, перегреваются и обогащаются рудным веществом, источником которого являются преимущественно вулканогенно-осадочные толщи. Частично рудный материал мог поступать из нижней коры и верхней мантии. На регрессивном этапе процесса (снятие сжимающих тектонических сил), ювенильные воды активно перемещаются вверх. В зоне брекчирования и мегабрекчирования они смешиваются с метеорными или морскими захороненными водами. Резкое падение температуры и давления, изменение окислительно-восстановительного флюида, геохимические барьеры могут послужить причиной рудоотложения

и формирования месторождения. Наиболее крупные трещины, уходящие на значительные глубины, становятся рудоподводящими, а брекчированные породы в их висячих боках становятся рудомещающими. Восточный разлом вполне подходит под роль такого рудоподводящего разлома. Но в таком случае Сафьяновское месторождение должно было формироваться на регрессивном (постколлизийном) этапе. Часть руд могла сформироваться и на коллизийном этапе, в периоды снижения тектонической активности. Две цифры возрастов, определенные по серицитам, указывают на такой ход событий. В таком случае месторождение больше отвечает эпitherмальному типу, нежели колчеданному. Фактический материал, приведенный выше, не противоречит такому решению вопроса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение характера разрывной тектоники в карьере Сафьяновского карьера показало, что ее происхождение связано с режимом горизонтального сжатия, имевшего место на коллизийном этапе развития Урала. Структуру месторождения определяют тектонические клинья, составляющие основу объемных хрупких деформаций, охватывающих верхнюю часть Режевской СФЗ до глубины 8 км. Образование брекчий, мегабрекчий и тектонических клиньев Сафьяновского рудного поля непротиворечиво объясняется с позиций общекоровой блоковой складчатости. Необходимые условия для возникновения крупных объемов катаклазированных пород создаются в верхней части блока отрицательного изгиба на прогрессивном этапе развития изгиба. Обратный градиент стрессовых напряжений удерживает флюиды на глубине, что приводит к их перегреву и обогащению рудными компонентами. На регрессивном этапе ювенильные флюиды с рудной специализацией поступают в верхнюю часть коры, где в зоне брекчий и мегабрекчий смешиваются с метеорными или захороненными морскими водами, что способствует рудоотложению. Часть руды могла отложиться и на прогрессивном этапе процесса в периоды спада тектонической активности. Широкое развитие массивных и прожилковых руд свидетельствуют о небольшой глубине формирования месторождения, которая, вероятно, не превышала 1–1.5 км. Взаимоотношения между разрывными нарушениями и рудой позволяют отнести месторождение к эпitherмальному типу сульфидных руд. Вероятное время рудообразования C_1 –Р. Это позволяет пересмотреть перспективы на оруденение подобного типа для площади Восточно-Уральской мегазоны.

Автор благодарит В.П. Молошага и Е.И. Сороку за помощь в сборе материалов, В.Н. Сазонова – за обсуждение статьи и ценные советы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бочкарев В.В., Пучков В.Н., Язева Р.Г. Колчеданное оруденение в позднепалеозойском ретрошарьяже на Среднем Урале // Докл. АН СССР. 1991. Т. 317. № 3. С. 684–688.
2. Грабежнев А.И. Подрудные метасоматиты цинк-медно-колчеданных месторождений Урала (на примере Гайского и Сафьяновского месторождений) // Литосфера. 2004. № 4. С. 76–88.
3. Грабежнев А.И., Молошаг В.П., Сотников В.И. и др. Метасоматический ореол Сафьяновского Zn-Cu колчеданного месторождения, Средний Урал // Петрология. 2001. Т. 9. № 3. С. 204–220.
4. Камалетдинов М.А. Покровные структуры Урала. М.: Наука, 1974. 230 с.
5. Кисин А.Ю. Общекоровая складчатость как отражение горизонтального сжатия // Литосфера. 2007. № 5. С. 117–136.
6. Кисин А.Ю., Коротеев В.А. Градиенты стрессовых напряжений – как причина перемещения вещества при общекоровой складчатости // Докл. АН. 2009. Т. 424. № 1. С. 67–70.
7. Коровко А.В., Двоеглазов Д.А. О позиции Сафьяновского рудного поля в структурах Режевской структурно-формационной зоны (Средний Урал) // Геодинамика и металлогения Урала. Свердловск: УрО АН СССР, 1991. С. 151–152.
8. Коровко А.В., Двоеглазов Д.А., Лецев Н.В. и др. Сафьяновское медно-цинковое колчеданное месторождение (Средний Урал) // Геодинамика и металлогения Урала. Свердловск: УрО АН СССР, 1991. С. 152–153.
9. Коротеев В.А., Кисин А.Ю., Сазонов В.Н. Модель формирования складчатых поясов на коллизионном этапе (на основе горизонтального сжатия с изгибом) // Докл. АН. 1998. Т. 358. № 4. С. 508–510.
10. Коротеев В.А., Язева Р.Г., Бочкарев В.В. и др. Геологическая позиция и состав Сафьяновского меднорудного месторождения на Среднем Урале // Путеводитель геологических экскурсий. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 1997. 54 с.
11. Прокин В.А., Буслаев Ф.П., Молошаг В.П., Милославский В.А. Геология Сафьяновского медноколчеданного месторождения (по результатам картирования карьера) // Ежегодник-2001. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2002. С. 276–281.
12. Смирнов В.Н., Ферштатер Г.Б., Иванов К.С. Схема тектоно-магматического районирования территории восточного склона Среднего Урала // Литосфера. 2003. № 2. С. 40–56.
13. Соколов В.Б., Силин В.А., Аверкин Ю.П., Рыбалка А.В. Глубинное строение коры Среднего Урала (по результатам геофизических исследований на Черноисточинско-Алапаевском профиле) // Земная кора и полезные ископаемые Урала. Екатеринбург: УИФ “Наука”, 1993. С. 16–29.
14. Чернышев И.В., Викентьев И.В., Чугаев А.В. и др. Источники вещества колчеданных месторождений Урала по результатам высокоточного MC-ICP-MS изотопного анализа свинца галенитов // Докл. АН. 2008. Т. 418. № 4. С. 530–535.
15. Шереметьев Ю.С., Лецев Н.В. Сафьяновское медно-колчеданное месторождение на Среднем Урале // Путеводитель геологических экскурсий. Екатеринбург: КПП по Свердловской области, 2000. 14 с.
16. Язева Р.Г., Молошаг В.П., Бочкарев В.В. Геология и рудные парагенезисы Сафьяновского колчеданного месторождения в среднеуральском ретрошарьяже // Геология рудных месторождений. 1991. Т. 33. № 4. С. 47–58.
17. Язева Р.Г., Молошаг В.П., Бочкарев В.В. Геология Сафьяновского колчеданного месторождения (Средний Урал). Препринт. Екатеринбург: УрО РАН, 1992. 71 с.
18. Riedel W. Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen // Zentbl. Miner. Geol. Paleont. 1929. Abh. B. P. 354–368.

Рецензент В.Н. Огородников

Tectonic position and generation time of vein disseminated Cu-Zn ores in Safyanovka deposit (Middle Urals)

A. Ju. Kissin

Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS

The previous researchers refer the Safyanovka copper-zinc deposit to massif sulphide ore type. Formation time was estimated as D₂–C₁. The studying of Safyanovka quarry disrupt tectonics shows its collision nature. Tectonic wedges with downward directed edges define the deposit structure. The coarser wedges consist of smaller ones. According to deep seismic sounding the distribution of wedge tectonic forms reach to depths of 8 km. There are a large number of tectonic breccias and mega-breccias containing ore bodies sometimes. Sulphide ores are hardly any traces of tectonic processes. East fault is a small-amplitude thrust and it has the signs of a ore-bearing fault. Ore bodies are concentrated in its hanging site. The deposit structure and genesis are in accord with a model of general crustal folding. The deposit is carried to epithermal type of sulphide ores. Probable time of deposit formation is C₁–P.

Keywords: *Urals Mountains, ore deposits, tectonics, geodynamics.*