

КОЛЛИЗИОННЫЕ И ПОСТКОЛЛИЗИОННЫЕ РУДООБРАЗУЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ ВНУТРИПЛИТНЫХ МОБИЛЬНЫХ ПОЯСОВ

© 2024 г. А. Ю. Кисин

В статье приведены основные результаты исследований по государственному заданию № АААА-А18-118052590028-9 “Коллизионные и постколлизийные рудообразующие процессы внутриплитных мобильных поясов”, проведенных лабораторией геохимии и рудообразующих процессов в 2018–2022 гг. *Актуальность.* Исследования направлены на разработку и совершенствование методов наращивания минерально-сырьевой базы Урала в частности и Российской Федерации в целом. *Объектом* исследований послужили рудообразующие процессы внутриплитных мобильных поясов на примере Урала. Наиболее крупные структурно-вещественные преобразования здесь имели место на этапе позднепалеозойской коллизии и постколлизийной релаксации. *Цель:* установление времени и условий образования месторождений, роли коллизионных и постколлизийных процессов в формировании и преобразовании рудных и нерудных месторождений. *Основные результаты.* Исследованы Au-оруденение в гипербазитах (Карабашский, Каганский, Агардагский массивы), Au-Pd минерализация в титаномагнетитовых и медносульфидных рудах Волковского месторождения, Au-сульфидное оруденение Тамуньерского месторождения. Оценена роль аргиллизитов в распределении рудной минерализации. Получена новая информация по геологии Светлинского месторождения золота (Ю. Урал). Установлены факторы рудной и геохимической специализации карбонатитовых комплексов Урала и Тимана. Рассмотрены время и условия образования цветных и драгоценных камней (демантоида, рубина и благородной шпинели). Исследованы включения типа “конский хвост” в уральских демантоидах, которые оказались ростовыми полыми каналами. Уточнены научные основы геоэкологической безопасности наращивания минерально-сырьевой базы в части влияния разведки и добычи минерального сырья на подземные и поверхностные воды. При исследованиях использованы традиционные, хорошо зарекомендовавшие себя методы, а также современные прецизионные аналитические методы. Лабораторные исследования проведены преимущественно в ЦКП “Геоаналитик” в ИГГ УрО РАН. Полученные результаты – новые или подтверждающие ранее установленные факты.

Ключевые слова: *геотектоника, минералогия, изотопия, компьютерное моделирование, золото, драгоценные камни, редкие земли, хромиты, карбонатиты, геоэкология, Урал*

ВВЕДЕНИЕ

Минерально-сырьевая база РФ является составной частью экономической безопасности. В силу известных политических событий в 1991 г. перестал существовать Союз Советских Социалистических Республик. Многие крупные месторождения стратегически важного минерального сырья оказались за рубежом. Значительная часть месторождений на территории РФ расположена в районах со слаборазвитой инфраструктурой, и ввод их в эксплуатацию требует крупных финансовых вложений, фатально сказывающихся на рентабельности горнодобывающей отрасли. Ситуацию усугубили и закрытие Министерства геологии, и сворачивание геолого-поисковых и геолого-разведочных работ. В итоге состояние минерально-сырьевой базы страны начало заметно ухудшаться, что требует принятия мер по ее наращиванию.

К настоящему времени крупные и особо крупные месторождения твердых полезных ископаемых, залегающие вблизи дневной поверхности кон-

тинентов, уже выявлены и в большинстве случаев отработаны. Перед геологами стоит крайне сложная задача поисков скрытых и более мелких месторождений в районах с развитой инфраструктурой, залегающих на глубинах, доступных для рентабельной отработки. Затраты на поиски и разведку таких месторождений велики, что требует совершенствования прогнозно-поисковых методов с привлечением фундаментальных теоретических и экспериментальных научных исследований, чем и определяется актуальность проводимых работ.

БЛОКОВАЯ СКЛАДЧАТОСТЬ ЗЕМНОЙ КОРЫ (ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ)

Далее в тезисной форме приводятся основные положения блоковой складчатости, подробно изложенные в работе “Блоковая складчатость и рудогенез” [Кисин, Коротеев, 2017]. Хорошо известно, что складчатые пояса широко распространены на Земле и обладают различным рудным потенциалом (имеются в виду рудные и нерудные месторож-

дения). Это касается и складчатых поясов, образованных в близких геотектонических обстановках (*окраиноплитных* или *внутриплитных*). Чем это обусловлено? Сами геотектонические обстановки обладают различными способностями структурно-вещественных преобразований земной коры и рудообразования. Объектами исследований по данному проекту были приняты только *внутриплитные коллизионно-складчатые пояса* на примере Урала, известного огромным рудным потенциалом. Протяженность Урала более 2.5 тыс. км, но рудоносность его сегментов от Полярного до Южного Урала различная. Несомненно, что на рудоносности региона сильно сказывается геологическая предыстория, длительная и сложная, но главное для данных исследований – это установление рудообразующих процессов, порожденных коллизией.

Цель исследований – комплексное изучение рудообразующих процессов коллизионного этапа развития и постколлизионной релаксации, их рудного потенциала на примере Урала. Под коллизией здесь понимаются *геотектонические условия ориентированного горизонтального сжатия земной коры и, возможно, верхней мантии, горизонтальное проскальзывание по внутрикоровым границам и по поверхности Мохо, привнос в систему огромного количества тектонической энергии, приводящее к ее глубоким структурно-вещественным преобразованиям, включая образование месторождений полезных ископаемых*. Это период дестабилизации геологической среды, насыщение ее энергией, сопровождающееся массо- и теплопереносом, деформациями, формированием нового структурного плана, мобилизацией рудного вещества и генерацией рудоносных флюидов, подготовки рудоподводящих каналов и рудолокализирующих структур. Перенос и отложение рудного вещества приходится преимущественно на этап постколлизионной релаксации.

Как коллизионно-складчатый пояс Урал сформировался в позднем палеозое: D_3-C_3 – прогрессивный (коллизионный) этап, P_1-Mz – регрессивный (постколлизионный) этап. Именно к постколлизионному этапу относится время образования большинства рудных и нерудных месторождений Урала.

При коллизии задействованы колоссальные количества тектонической энергии, способные радикально преобразовать геологическую среду и сформировать крупные месторождения многих полезных ископаемых. Но для этого нужен эффективный механизм, поскольку простое сжатие и расплющивание, либо шарьяжи и надвиги, возникающие при одноосном сжатии, как это показано в специальной научной и учебной литературе, желаемого результата не дадут.

Для принятия возможного механизма структурирования дестабилизированной геологической

среды необходимо определиться с толщиной деформируемого объема, т. е. объемов коры и верхней мантии (литосферы) или только коры? Это легко установить: если взять для примера любую коллизионно-складчатую область (Урал, Аппалачи, Альпийско-Гималайский пояс и др.), то реальные геологические структуры (антиклинории и синклинории) имеют ширину 20–40 км, редко более. Эти масштабы не сопоставимы с толщиной континентальной (около 200 км) или океанской (около 80 км) литосферы, но могут быть обеспечены деформациями коры относительно небольшой мощности (15–20 км). Все эти геологические структуры линейные, подчиняющиеся общему простиранию горной системы, что указывает на одноосное горизонтальное сжатие. Большинство горно-складчатых систем структурированы и асимметричны, включают предгорный (краевой) прогиб, горы (зона складчатости, метаморфизма низких ступеней, слабого магматизма), плато (метаморфические и магматические комплексы), тыловой (краевой) прогиб. И, как показывают геофизические исследования, утолщение (“корень гор”) приобретает земная кора. Примечательно, что на геофизическом субширотном профиле Урсейс-95 “корень гор” смещен относительно горного рельефа к востоку и полностью захватывает Магнитогорскую синформу, нарушая принципы изостазии.

Структурно-вещественные преобразования коры при одноосном горизонтальном сжатии обусловлены тектоническими силами, локализованными в самой коре. Асимметрия горно-складчатых областей лучше всего объясняется горизонтальными движениями деформируемой коры относительно верхней мантии. Это хорошо укладывается в концепцию реологически и тектонически расслоенной литосферы, разработанной в ГИН РАН [Тектоническая расслоенность..., 1990; Леонов, 1997; и др.]. Согласно этой концепции, земная кора разделяется на верхнюю (упругую) и нижнюю (пластичную), способна к горизонтальному проскальзыванию по границе Мохо и другим внутрикоровым границам.

Распределение тектонической энергии в земной коре контролируется образованием крупных геологических структур (в ранге антиклинорий – синклинорий), и, следовательно, они контролируют различные геологические процессы, включая метаморфизм, магматизм и рудообразование. Для прогноза и поисков эндогенных месторождений любых полезных ископаемых важно рассмотрение процесса рудообразования в комплексе со всеми другими геологическими процессами, включая структурирование коры, с которыми они имеют генетические и парагенетические связи. Только в этом случае можно рассчитывать на ожидаемый успех. Все это максимально учтено в модели блоковой складчатости земной коры [Кисин, Коротеев, 2017].

Принципиальная схема блоковой складчатости показана на рис. 1. В блоковой складчатости вся работа осуществляется тектонопарой “надвиг – продольный изгиб”. Кора *структурируется* и получает утолщение прямо пропорционально ее укорочению. Упругая кора сохраняет квазиплоское состояние, а изгибные деформации реализуются в автономных блоках. Кора приобретает блоковое строение, а торцовое сочленение обеспечивает передачу напряжений сжатия на значительные расстояния. Для возникновения продольного изгиба необходимо вывести плиту из состояния равновесия, для чего нужны давления, невозможные в условиях коры [см. подробнее: Кисин, Коротеев, 2017]. Проблемы изгибной устойчивости коры нет. Изгибающие моменты на начало деформаций максимальные, и изгибные деформации проходят при относительно небольших сжимающих напряжениях. Длина волны минимальная. Энергоемкость системы предельно высокая. Релаксация напряжений полная.

Минерогения блока *положительного изгиба* определяется действием *прямого градиента*

та стрессовых напряжений и гидротермально-метасоматическими процессами (гранитизацией, альбитизацией, грейзенизацией и др.). Пластичные потоки разогретого материала формируют купольные структуры, которые становятся центрами зонального высокоградного метаморфизма. Снятие стрессовых напряжений сопровождается возникновением анатектических гранитов и началом пневмолито-гидротермальных процессов.

Главную роль в преобразовании *блока отрицательного изгиба* и его минерогении играет *обратный градиент стрессовых напряжений*, который удерживает флюиды на глубине, что ведет к их перегреву и обогащению рудным веществом, родственными к Cl и S (сидерофильные, халькофильные, редкометалльные элементы). Источником рудного вещества служат вмещающие породы верхней коры (обычно вулканогенно-терригенная толща), нижняя кора (базит-ультрабазитового состава) и верхняя мантия.

Теоретический, экспериментальный и фактический материал показывают, что блоковая склад-

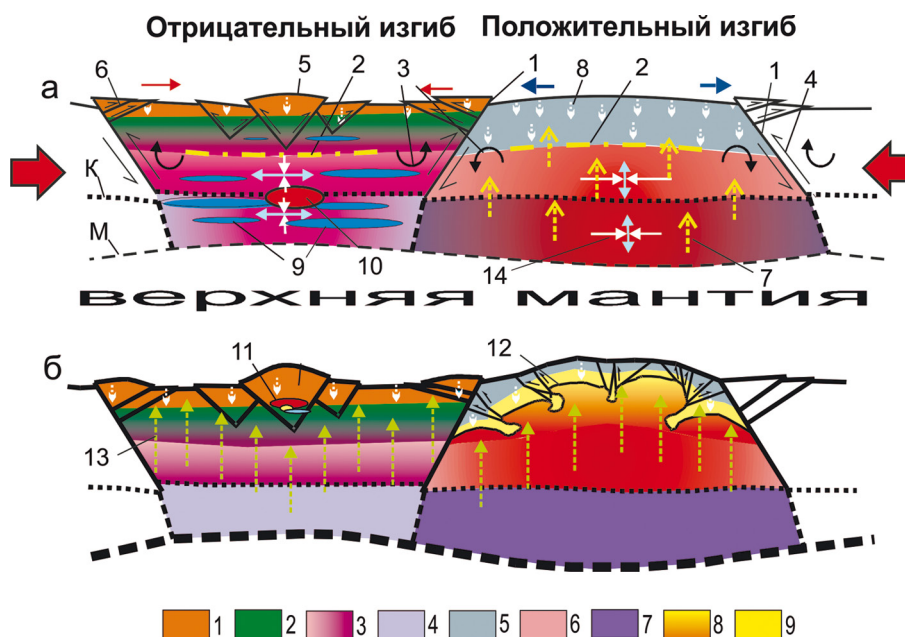


Рис. 1. Двумерная модель блоковой складчатости земной коры на коллизионном (а) и постколлизионном (б) этапах.

1 – зона бескорневой складчатости и мегабрэкчирования; 2 – зона зеленосланцевого метаморфизма и бескорневой складчатости; 3 – зона метаморфизма зеленосланцевой и эпидот-амфиболитовой фаций; 4 – зона метаморфизма эпидот-амфиболитовой фации; 5 – породы нижней коры, метаморфизованные в условиях эпидот-амфиболитовой фации, и анатектические граниты; 6 – породы верхней коры, метаморфизованные в условиях гранулитовой фации; 7 – то же для пород нижней коры, метаморфизованные в условиях амфиболитовой фации; 8 – породы, метаморфизованные в условиях зеленосланцевой до эпидот-амфиболитовой фации; 9 – породы, метаморфизованные в условиях эпидот-амфиболитовой фации; 10 – породы, метаморфизованные в условиях амфиболитовой фации; 11 – многофазные бескорневые малые интрузии; 12 – гранитогнейсовые купола; 13 – постколлизионные рудоносные флюиды; 14 – векторы главных нормальных напряжений.

Буквы – геофизические границы: К – Конрада, Мохоровичича.

Цифры: 1 – зона надвига; 2 – нейтральная поверхность; 3 – изгибающие моменты; 4 – направление сдвига; 5 – осевой горст, мегабрэкчирование, осевое поднятие; 6 – дуплексы скалывания или красные валы; 7 – восходящие движения метаморфогенного флюида и разогретых пластичных масс; 8 – метеорный флюид; 9 – запертые метаморфогенные флюиды; 10 – запертые магматические очаги; 11 – многофазные бескорневые малые интрузии; 12 – гранитогнейсовые купола; 13 – постколлизионные рудоносные флюиды; 14 – векторы главных нормальных напряжений.

чатость земной коры существует. Она структурирует коллизионные пояса и активизированные окраины платформ в зоне их динамического влияния, что может и должно использоваться для прогноза эндогенных месторождений. Блоковая складчатость преобразует тектоническую энергию горизонтального сжатия в другие виды энергии (тепловую, химическую и др.), вызывая глубокие структурно-вещественные преобразования коры. Блоковая складчатость обладает огромным потенциалом формирования и закономерного размещения многих эндогенных рудных и нерудных месторождений. Модель блоковой складчатости может стать эффективным инструментом при прогнозе и поисках различных месторождений полезных ископаемых.

Далее кратко приводятся основные результаты исследований в рамках госзадания, проведенных сотрудниками лаборатории в 2018–2022 гг., кото-

рые опубликованы в периодической научной отечественной и зарубежной печати. Часть их хорошо укладываются в модель блоковой складчатости земной коры.

Полученные результаты – новые или подтверждают ранее установленные факты. Исследования по теме вносят существенный вклад в теорию рудообразования, а также имеют практическое приложение при прогнозно-поисковых работах. Экономическая эффективность работы не определялась.

1. ТАМУНЬЕРСКОЕ ЗЛОТОСУЛЬФИДНОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ (СЕВЕРНЫЙ УРАЛ)

На рис. 2 представлена модель формирования Тамуньерского месторождения. Предполагается, что месторождение локализовано в осевом горсте блока отрицательного изгиба. Однако нет структурных исследований месторождения.

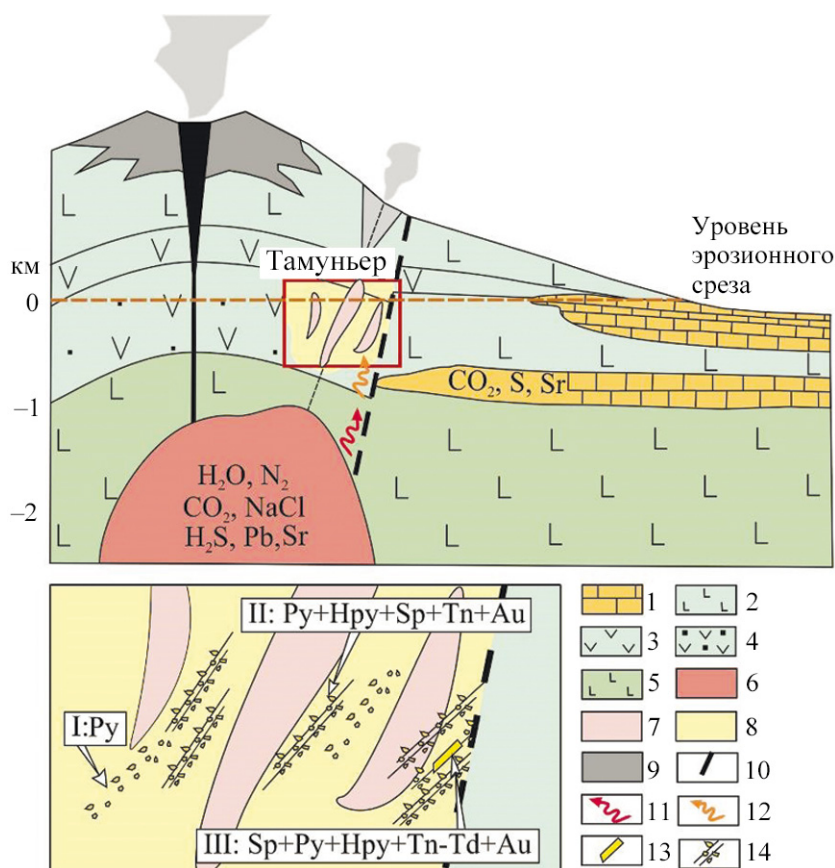


Рис. 2. Модель формирования Тамуньерского месторождения.

1 – известняки (D_2); 2 – порфириды базальтовые и их туфы (D_1); 3 – порфириды андезито-дацитовые и их туфы (D_1); 4 – туфы базальтового и андезитового состава, песчаники, известково-глинистые сланцы, туффины (D_1); 5 – вулканогенные комплексы основания Ауэрбаховского вулканоплутонического пояса (O-S₁); 6 – интрузии габбро-диорит-гранитов ауэрбаховского комплекса; 7 – субвулканические тела порфировых дацитов (D_1); 8 – метасоматические изменения березит-лиственитовой формации; 9 – породы околожерловой фации; 10 – тектонические нарушения; 11, 12 – рудоносный флюид; 11 – магматический, 12 – провзаимодействовавший с вулканогенно-осадочными породами; 13, 14 – сульфидные зоны: 13 – прожилково-вкрапленные, 14 – массивные. I–III – рудные стадии. Py – пирит, Hpy – халькопирит, Sp – сфалерит, Tn – теннантит, Tn-Td – теннантит-тетраэдрит, Au – золото.

Согласно этой модели в раннем девоне проявляется активный вулканизм с накоплением отложений андезито-базальтовой формации, в последствии пропилитизированных [Замятина, Мурзин, 2018]. Затем произошло внедрение в вулканогенно-осадочную толщу интрузии Ауэрбаховского комплекса. Из расположенного на глубине магматического очага отделился хлоридно-натриевый флюид, несущий основную массу компонентов (Fe, Cu, Au, S, Sr, Pb). Этот флюид взаимодействовал с вулканогенно-осадочными породами, в том числе с морскими карбонатными, извлекая из них дополнительно петрогенные и рудные компоненты (в том числе CO₂, S, Sr, возможно, и Au), и проникал в вышележащие породы по системе разломов и трещин. В зоне разгрузки флюида вулканогенно-осадочные породы подверглись метасоматическим изменениям березит-лиственитового типа с рассеянной сульфидной минерализацией I стадии. Рядовые руды II стадии сформировались в зонах трещиноватости в вулканогенно-осадочных породах, а также вдоль контактов тел порфировых дацитов. Богатые рудные тела III стадии пространственно сопряжены с глубинным разломом, образовались благодаря продолжающемуся поступлению рудонесного флюида из магматического очага.

2. ЗОЛОТОЕ ОРУДЕНЕНИЕ В ХЛОРИТ-КАРБОНАТНЫХ МЕТАСОМАТИТАХ КАРАБАШСКОГО МАССИВА НА ЮЖНОМ УРАЛЕ

Минералогическими, изотопно-геохимическими и термобарогеохимическими методами изучено специфическое золото-редкометалльно-редкоземельное оруденение в хлорит-карбонатных метасоматитах Карабашского массива в зоне Главного уральского разлома (ГУР) на Южном Урале, кото-

рое завершено созданием геодинамической, флюидной и физико-химической моделей его формирования [Murzin et al., 2018]. На основе геологических наблюдений и минералого-геохимического изучения пород предложена геодинамическая и флюидная модели формирования оруденения (рис. 3). Эти модели предполагают следующую последовательность процессов: 1) деформация и утолщение верхней коры при коллизии, пластические деформации и тектоническое течение в нижней коре (блоковая складчатость); 2) нагнетание нижней коры в зону разуплотнения верхней мантии, метаморфизм повышенных *P-T* условиях, реакции дегидратации; 3) формирование корово-мантийной смеси и восходящего тектонического потока, декомпрессия, разуплотнение, перемешивание в нижней неметаморфизованной корой; 4) внедрение восходящего тектонического потока в верхнюю кору, обогащение ксеногенным материалом, возникновение трещин растяжения на поверхности коры и проникновение метеорной воды на ее глубокие горизонты. Источником петрогенных и рудных компонентов рассматриваются породы, глубинный магматогенный флюид, возможно в смеси с метаморфогенным, а также метеорная вода.

Золотосодержащие породы, сложенные магнетитом, хлоритом и карбонатом, образуются в 3-м резервуаре, моделирующем разгрузку в открытых трещинах. *P-T* параметры, принятые для 3-го резервуара, находятся в соответствии с условиями образования магнетит-хлорит-карбонатных пород Карабашского массива (480–280°C, 2–3 кбар). Количественные соотношения основных минералов (магнетита, хлорита и карбоната) в модельном резервуаре находятся в пределах их вариаций в природных парагенезисах. Хорошее соответствие модельных и природных парагенезисов наблюдается также в наборе аксессуарных минералов пород. Они

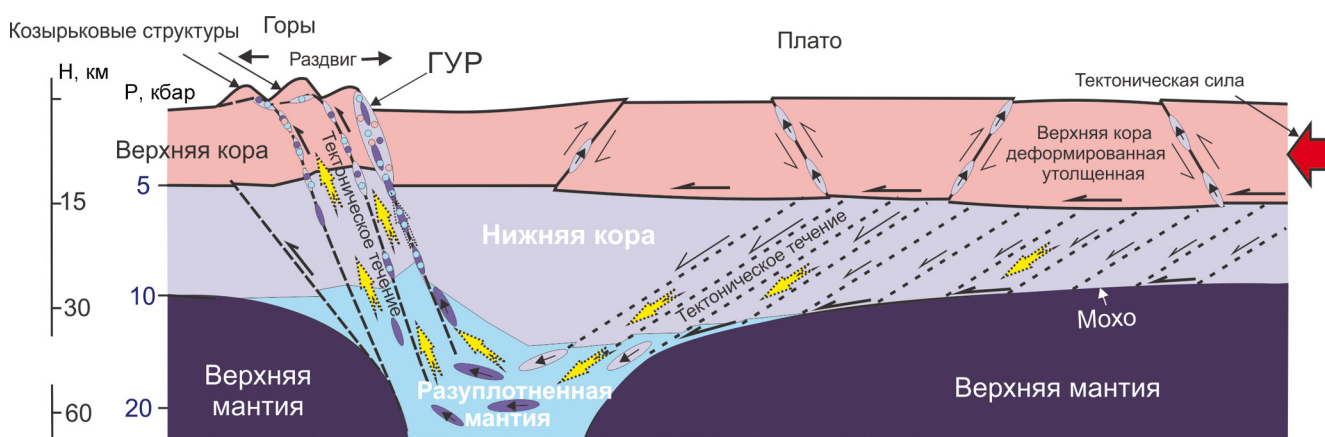


Рис. 3. Геодинамическая и флюидная модели формирования золото-редкометалльно-редкоземельного оруденения в хлорит-карбонатных метасоматитах Карабашского массива на Южном Урале в зоне ГУР [Murzin et al., 2018].

идентичны и представлены ильменитом, апатитом, халькопиритом и Au-Ag-Cu твердыми растворами.

3. ЗОЛОТОМАГНЕТИТОВОЕ ОРУДЕНЕНИЕ В СЕРПЕНТИНИТАХ КАГАНСКОГО МАССИВА (Ю. УРАЛ)

Изучена золотая минерализация в антигоритовых серпентинитах и в сульфидно-магнетитовых рудах Каганского массива (ГУР). Первый тип минерализации развит в тектонических зонах рассланцованных серпентинитов. Второй тип представлен жильными массивными, прожилковыми и вкрапленными магнетитовыми рудами, содержащими до 5 об. % сульфидов раннего и позднего парагенезиса. Сульфиды раннего парагенезиса (халькопирит, пирротин, талнахит, кубанит, Cu, Co, Ni-содержащий макинавит) образуют округлые включения размером менее 50 мкм в магнетите. Сульфиды позднего парагенезиса (халькопирит, борнит, пирротин, Co-пентландит, Fe-сфалерит) локализованы в межзерновом пространстве агрегатов магнетита. В сульфидах обоих парагенезисов присутствуют включения самородного Au [Мурзин, Варламов, 2018; Murzin et al., 2019].

Предложена геолого-генетическая схема формирования золотой минерализации.

4. СВЕТЛИНСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ ЗОЛОТА

Одним из объектов исследований в рамках проекта принято Светлинское месторождение золота, которое в настоящее время является наиболее крупным на Ю. Урале и с 1992 г. отрабатывается открытым способом. По результатам исследований с позиции модели блоковой складчатости земной коры предложена геолого-генетическая модель формирования месторождения [Кисин и др., 2022]. Глубинный надвиг сопровождался продольным положительным изгибом коры, переходом тектонической энергии в химическую и тепловую, выжиманием пластичного вещества вверх, формированием куполов с зональным метаморфизмом (рис. 4). Светлинский купол контролирует одноименное месторождение золота.

5. ПОЛДНЕВСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ ДЕМАНТОИДА

Исследованиями установлено следующее.

1. Геология месторождения обусловлена декомпрессионным разуплотнением ультрабазитов при подъеме корово-мантийной смеси в зоне ГУР на коллизионном этапе (см. рис. 3).

2. Минералообразование синдекомпрессионное, гидротермальное, многостадийное. Форма тел минерализации отвечает рудным столбам. Структурный контроль отсутствуют.

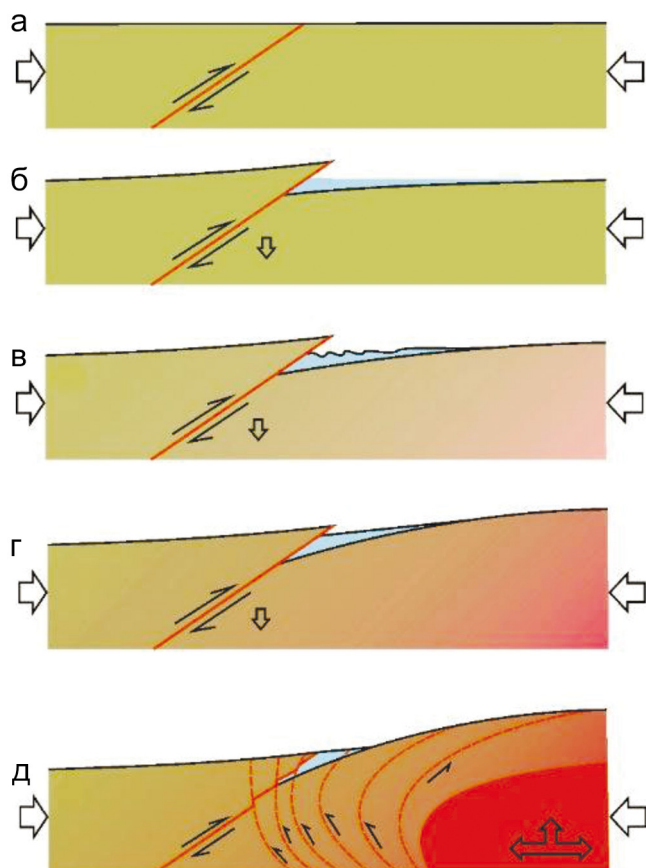


Рис. 4. Схема геологического развития площади, прилегающей к Светлинскому надвигу.

а – начало коллизии и заложение надвига D_3 ; б – опускание лежащего бока надвига и появление мелководного морского бассейна D_3-C_1 ; в – формирование блока положительного изгиба и образование оползневых структур C_1 ; г – разогрев пород в ядре антиклинория, региональный метаморфизм C ; д – подъем разогретого пластичного материала, формирование куполов и зонального метаморфизма, преобразования зоны надвига (образование флюидоподводящих каналов) C_{2-3} .

3. Зерна демантоида собраны в агрегаты овальной формы, с укрупнением зерен от центра к периферии. Демантоид рос в условиях декомпрессии и тектонического покоя, что обусловило сохранность его ювелирных качеств.

4. Исследованы включения в уральских демантоидах, известные под названием “конский хвост”, которые оказались ростовыми полыми каналами, обусловленными сфероидальным ростом агрегатов демантоида в условиях декомпрессии.

6. РУБИН И ЭСКОЛАИТ В МРАМОРАХ КУЧИНСКОГО ПРОЯВЛЕНИЯ

Кочкарский антиклинорий показан примером блока положительного изгиба во многих публикациях автора, включая монографию 2017 г. Впервые изучена ассоциация рубина (Al_2O_3 с примесью Cr)

и эсколаита (Cr_2O_3 с примесью Al) в мраморах Кочкарского антиклинория [Kissin et al., 2020]. На Кучинском проявлении эсколаит ассоциирует только с высокохромистыми рубинами прогрессивного и регрессивного этапа метаморфизма. На пике метаморфизма образовались низкохромистые розовые корунды. Образование эсколаита проходило на завершающем этапе роста кристаллов рубина и позднее. Эсколаит прогрессивного этапа содержит примесь титана, а регрессивного этапа – без титана. Параметры и морфология минерализованных зон предполагают привнос Al и Cr метаморфогенными флюидами.

7. ПРОЯВЛЕНИЯ РУБИНА В МУРЗИНСКО-АДУЙСКОМ АНТИКЛИНОРИИ (СР. УРАЛ)

Мурзинско-Адуйский антиклинорий приводится в качестве примера блока положительного изгиба. Исследованы Липовское и Алабашское проявления рубина в мраморах Мурзинско-Адуйского антиклинория (Ср. Урал). Определен химический состав горных пород и минералов, изотопный состав кислорода корунда и силикатов, выполнено датирование слюд K–Ar-методом. По геологическим условиям и минеральным ассоциациям эти проявления подобны проявлениям рубина Ю. Урала и месторождениям Юго-Восточной Азии. На Алабашском проявлении рубин выявлен также в минерализованных брекчиях по гранитам и амфиболитам. Минерализованные брекчии и рубиноносные мраморы в целом обогащены K- и Sr-содержащими минералами. Рубин характеризуется узким диапазоном значений изотопного состава кислорода ($\delta^{18}\text{O} = 14.2\text{--}17.8\text{‰}$), отвечающего метаморфогенному и метасоматическому корунду. Изотопный состав водорода фуксита варьирует от -78.5 до -89.6‰ , а расчетный изотопный состав равновесного с фукситом водорода флюида – от -48.8 до -79.7‰ , что отвечает высокотемпературному равновесию с магматическими породами. Al и Cr в процессе рубинообразования были подвижными элементами. Время образования корундовой минерализации обоих проявлений составляет $280\text{--}260$ Ма и отвечает началу постколлизийной релаксации. Мурзинско-Адуйский антиклинорий является наиболее перспективной площадью на обнаружение месторождений высококачественного рубина на Урале [Кисин и др., 2020].

8. ДАТИРОВАНИЕ ДАЕК НА ВОРОНЦОВСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ ЗОЛОТА

По результатам изотопных исследований Sm-Nd-системы впервые получены данные о возрасте даек на Воронцовском месторождении золота: 340 ± 35 млн лет, что может указывать на проявление магматизма коллизийного этапа. Положитель-

ные значения ϵNd указывают на глубинный магматический источник [Azovskova et al., 2020].

9. КАРБОНАТИТОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ УРАЛА

С использованием Sm-Nd-, Rb-Sr-, U-Pb-изотопных систем проведена оценка возраста пироклоровых карбонатитов и пегматитов Ильмено-Вишневогорского комплекса (ИВК), Ю. Урал. Объект недостаточно изучен с позиций модели блоковой складчатости. Минеральная Sm-Nd-изохрона пироклоровых карбонатитов (5 точек) показала возраст 229 ± 16 млн лет, минеральная Rb-Sr-изохрона (5 точек) показала близкий возраст 250.5 ± 1.2 млн лет (Вишневогорское месторождение). Возраст миаскит-пегматитов по результатам Rb-Sr-изохронного датирования (4 минерала + вал) оценивается в 274 ± 12 млн лет. U-Pb-возраст циркона пегматитов (метод лазерной абляции) составил 259 ± 15 млн лет, $\text{MSWD} = 0.67$, $n = 6$ (Вишневогорское месторождение) и 258.7 ± 3.1 млн лет, $\text{MSWD} = 0.026$, $n = 28$ (Увильдинское рудопроявление), близок к результатам Rb-Sr-датирования. Полученные данные свидетельствуют о том, что процессы Zr-Nb рудообразования в ИВК происходили $\sim 275\text{--}250$ млн лет назад, почти на 200 млн лет позднее, чем внедрение и кристаллизация ($440\text{--}420$ млн лет) щелочных и карбонатитовых расплавов ИВК, и были связаны с новым этапом тектонической активизации и рудогенеза на постколлизийной стадии развития Урала [Недосекова и др., 2020].

10. БЛАГОРОДНЫЕ МЕТАЛЛЫ ВОЛКОВСКОГО Cu-Fe-Ti-V МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Объект недостаточно изучен с позиций модели блоковой складчатости. Впервые в титаномagnetитовых рудах Волковского Cu-Fe-Ti-V месторождения обнаружены самородное золото двух генераций и теллурид палладия – кейтконнит (Pd_{3-x}Te). Золото первой генерации пробностью около 1000‰ образует включения в титаномagnetите, отлагалось на магматической стадии становления титаномagnetитовых руд. Кейтконнит и самородное золото второй генерации пробностью 850–860‰ ассоциируют с борнитом и гидроксилсодержащими минералами, прежде всего хлоритом. Эти минералы образовались на гидротермальной стадии становления оруденения. Титаномagnetитовые руды, таким образом, являются потенциальным источником благородных металлов.

11. РУДНАЯ СПЕЦИАЛИЗАЦИЯ КАРБОНАТИТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ УРАЛА И ТИМАНА

Изучены факторы рудной специализации карбонатитовых комплексов Урала и Тимана, кото-

рые могут быть использованы для прогноза месторождений стратегических металлов в складчатых областях [Nedosekova et al., 2021]. Установлено, что различная рудная специализация (Nb и Nb-REE – для карбонатитов Урала, REE – для карбонатитов Тимана) определяется коровой эволюцией щелочных и карбонатитовых магм и неоднородностью их мантийных источников. Изотопные составы щелочных комплексов Урала близки мантийным (плюмовым) источникам карбонатитовых комплексов внутриплитных обстановок, что определяет их Nb и REE-Nb специализацию. Карбонатиты Тимана показывают контаминированные мантийные изотопные составы и REE-специализацию, что характерно для карбонатитовых комплексов и связанных с ними REE-месторождений.

12. НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО ГЕОЛОГИИ И МИНЕРАЛОГИИ САФЬЯНОВСКОГО Cu-Zn-МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Сафьяновское Cu-Zn-сульфидное месторождение приведено в качестве примера блока отрицательного изгиба, локализованного в осевом горсте. Приурочено к комплексу измененных вулканогенно-осадочных пород на южном окончании Режевской структурно-формационной зоны (СФЗ) Восточно-Уральской мегазоны Ср. Урала. Впервые получены U-Pb датирования циркона из риолита рудовмещающего комплекса месторождения, с конкордией 422.8 ± 3.7 млн лет [Притчин и др., 2021]. U-Pb датирование циркона из линзовидных тел андезитов западного борта Сафьяновского карьера также дало возраст 422.8 ± 2.0 млн лет, что соответствует пржидольскому отделу S_2 . Таким образом, установлено, что среди рудовмещающих пород Сафьяновского месторождения находятся эффузивные образования верхнего силура, что отвечает осевой горстовой структуре блока отрицательного изгиба.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная ранее теоретическая модель блоковой складчатости объясняет структурно-вещественные преобразования земной коры, источники рудоносных флюидов, закономерности распределения месторождений полезных ископаемых на коллизионном и постколлизионном этапах. Для ее совершенствования и доработки необходимо пройти верификацию. Полученные результаты исследований по теме НИР “Коллизионные и постколлизионные рудообразующие процессы внутриплитных коллизионно-складчатых поясов (на примере Урала)” подтверждают ее прогностические способности.

1. Представлена геолого-структурная модель формирования Тамуньерского золотосульфидного месторождения.

2. На основе геологических наблюдений и минералого-геохимического изучения пород предложена геодинамическая и флюидная модели формирования золотого оруденения месторождения Золотая гора на г. Карабаш (Ю. Урал).

3. Предложена геолого-генетическая схема формирования золотой минерализации в серпентинитах массива Каган (Ю. Урал).

4. С позиций модели блоковой складчатости предложена геолого-генетическая модель Светлинского месторождения золота.

5. Геология и минералогия Полдневского месторождения демантоида сходны с геологией г. Карабаш и обусловлены декомпрессионным разуплотнением Коркодинского массива ультраосновных пород при подъеме корово-мантийной смеси в зоне ГУР на коллизионном этапе развития Урала.

6. Включения типа “конский хвост” в уральских демантоидах являются ростовыми полыми каналами, устья которых могут содержать сопутствующие минералы (серпентин, магнетит, карбонат).

7. Исследования ассоциации рубина с эсколаитом в мраморах Кучинского проявления в Кочкарском антиклинории поставили точку в проблеме источника Al и Cr: в блоке положительного изгиба земной коры данные элементы подвижны как на коллизионном этапе, так и на этапе постколлизионной релаксации.

8. Рубин-шпинелевая минерализация в мраморах Мурзинско-Адуйского антиклинория подобна таковой в Кочкарском антиклинории, что свидетельствует о близких условиях образования и подтверждает прогностические способности модели блоковой складчатости.

9. Sm-Nd-методом установлен возраст даек на Воронцовском месторождении золота: 340 ± 35 млн лет, что может указывать на проявление магматизма коллизионного этапа.

10. Установлено, что рудная специализация (Nb и Nb-REE – для карбонатитов Урала, REE – для карбонатитов Тимана) определяется коровой эволюцией щелочных и карбонатитовых магм и неоднородностью их мантийных источников.

11. Впервые получены U-Pb датирования циркона из риолита рудовмещающего комплекса Сафьяновского Cu-Zn-сульфидного месторождения с конкордией 422.8 ± 3.7 млн лет, что подтверждает его приуроченность к осевому горсту (блока отрицательного изгиба коры).

12. Получены новые данные о минералах благородных металлов и последовательности их образования в титаномagnetитовых и медносульфидных рудах Волковского Cu-Fe-Ti-V месторождения (Средний Урал).

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИГГ УрО РАН, тема № НИОКТР 123011800011-2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Замятина Д.А., Мурзин В.В. Источники вещества и рудоносного флюида при формировании Тамуньерского золотосульфидного месторождения (Северный Урал) по изотопным данным // Докл. АН. 2018. Т. 478. № 4. С. 456–458. <https://doi.org/10.7868/S0869565218040175>
- Кисин А.Ю., Притчин М.Е., Озорнин Д.А. Геологоструктурная позиция Светлинского месторождения золота (Южный Урал) // Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 369–376.
- Кисин А.Ю., Коротеев В.А. Блоковая складчатость и рудогенез. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2017. 349 с.
- Кисин А.Ю., Мурзин В.В., Томилина А.В., Смирнов В.Н., Притчин М.Е. Рубиновая минерализация в Мурзинско-Адуйском метаморфическом комплексе (Средний Урал) // Геология руд. месторождений. 2020. Т. 62. № 4. С. 369–388.
- Леонов Ю.Г. Тектоническая расслоенность коры платформ: факты и соображения // Вестник Отделения геологии, геофизики, геохимии и горных наук РАН. 1997. № 1. С. 131–152.
- Мурзин В.В., Варламов Д.А. Химический состав самородного золота в магнетитовых рудах Каганского ультрабазитового массива (Ю. Урал) // Тр. ИГГ УрО РАН. 2018. Вып. 165. С. 194–199.
- Недосекова И.Л., Коротеев В.А., Баянова Т.Б., Серов П.А., Попова В.И., Червяковская М.В. О возрасте пироклоровых карбонатитов Ильмено-Вишневогорского щелочного комплекса, Ю. Урал (по данным Sm-Nd и Rb-Sr изотопных методов) // Литосфера. 2020. Т. 20. № 4. С. 486–498.
- Притчин М.Е., Сорока Е.И., Пучков В.Н. Новые U-Pb изотопные данные для циркона из риолита Сафьяновского медноколчеданного месторождения (Средний Урал) // Литосфера. 2021. Т. 21. № 6. С. 884–893.
- Тектоническая расслоенность литосферы и региональные геологические исследования / Отв. ред. Ю.М. Пущаровский, В.Г. Трифионов. М.: Наука, 1990. 290 с.
- Azovskova O.B., Soroka E.I., Rovnushkin M.Yu., Soloshenko N.G. Sm-Nd isotopy of the dykes of the Vorontsovskoe gold-ore deposit (Northern Urals) // Vestnik of Geosciences. 2020. V. 9(309). P. 3–6. <https://doi.org/10.19110/geov.2020.9.1>
- Kissin A., Gottman I., Sustavov S., Murzin V., Kiseleva D. The first find of Cr₂O₃ eskolaite associated with marble-hosted ruby in Southern Urals and the problem of Al and Cr sources // Minerals. 2020. V. 10. P. 101.
- Murzin V., Chudnenko K., Palyanova G., Kissin A., Varlamov D. Physicochemical model of formation of gold-bearing magnetite-chlorite-carbonate rocks at the Karabash massif of ultramafic rocks (Southern Urals, Russia) // Minerals. 2018. V. 8. No. 7. P. 306.
- Murzin V., Chudnenko K., Palyanova G., Varlamov D. Formation of Au-bearing antigorite serpentinites and magnetite ores at the massif of ophiolite ultramafic rocks: thermodynamic modeling // Minerals. 2019. V. 9. P. 758. <https://doi.org/10.3390/min9120758>
- Nedosekova I., Vladykin N., Udoratina O., Belyatsky B. Ore and Geochemical Specialization and Substance Sources of the Ural and Timan Carbonatite Complexes (Russia): Insights from Trace Element, Rb-Sr, and Sm-Nd Isotope Data // Minerals. 2021. V. 11. No. 7. P. 711. <https://doi.org/10.3390/min11070711>

COLLISION AND POST-COLLISION ORE-FORMING PROCESSES OF INTRAPLATE MOBILE BELTS

A. Yu. Kissin

The article presents main results of the research on the State assignment AAAA-A18-118052590028-9 “Collision and post-collision ore-forming processes of intraplate mobile belts” carried out by the laboratory of Geochemistry and ore-forming processes for 2018–2022. *Relevance:* the research is aimed at the developing and improving methods for increasing the mineral resource base of the Urals, in particular, and the Russian Federation, in general. *The object of the research:* the ore-forming processes of intraplate mobile belts, using the Urals as an example. The largest structural and material transformations here took place at the stage of the late Paleozoic collision and post-collision relaxation. *The aim of the research:* to establish the time and conditions of deposit formation, the role of collision and post-collision processes in the formation and transformation of ore and non-metallic deposits. *The main results.* The Au- mineralization in ultrabasites (Karabash, Kagan, Agardag massifs), Au-Pd mineralization in titanomagnetite and copper-sulfide ores of the Volkovskoye deposit, Au-sulfide mineralization of the Tamunerskoye deposit have been studied. The role of argillizites in the distribution of ore mineralization was estimated. New information on the geology of the Svetlinskoye gold deposit (Southern Urals) was obtained. Factors of ore and geochemical specialization of carbonatite complexes of the Urals and Timan were established. The time and conditions of formation of colored and precious stones

(demantoid, ruby and noble spinel) were considered. Inclusions of the “horsetail” type in the Ural demantoids have been studied, which turned out to be hollow growth channels. The scientific basis for geoecological safety of mineral resource base expansion has been clarified in terms of the impact of mineral exploration and production on groundwater and surface water. The researchers used traditional, well-proven methods, as well as modern precision analytical methods. The laboratory studies have been conducted mainly at the Geoanalyst Collective Use Center at the Institute of Geology and Geochemical of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. The results obtained are new or confirm the previously established facts.

Keywords: *geotectonic, mineralogy, isotopy, computer modeling, gold, precious stones, rare earths, chromite, carbonatites, geoecology*

Для цитирования: Кисин А.Ю. Коллизионные и постколлизионные рудообразующие процессы внутриплитных мобильных поясов // Труды ИГГ УрО РАН. 2024. Вып. 168. С. 75–84. <https://doi.org/10.24930/0371-7291-2024-168-75-84>