На правах рукописи

Коломоец Александра Вячеславовна

ЗОЛОТОНОСНОСТЬ ЧЕРНОСЛАНЦЕВОЙ ФОРМАЦИИ КУМАКСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Оренбург – 2021

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет» (ОГУ) на кафедре геологии, геодезии и кадастра.

Научный руководитель:	**Панкратьев Пётр Владимирович** доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры ГГиК ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»
Официальные оппоненты:	**Мустафин Сабир Кабирович** доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геологии, гидрометеорологии и геоэкологии ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет»
	Горбатова Елена Александровна доктор геолого-минералогических наук, заместитель заведующего минералогическим отделом ФГБУ «ВИМС»
Ведущая организация:	**ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»**

Защита диссертации состоится «14» октября 2021 года в 15.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.364.02 (Д.212.121.04) при ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ) по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, зал диссертационных советов (каб. 4-73).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на сайте Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе (МГРИ) по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, http://mgri.ru/

Автореферат разослан «___» _____2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.364.02 (Д.212.121.04) С.Д. Ганова

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Одной из актуальных задач современного экономического развития является необходимость восполнения рудно-сырьевой базы золотодобывающей отрасли. Золоторудные месторождения во всём мире – один из наиболее привлекательных минерально-сырьевых объектов. Промышленными запасами благородного металла обладают месторождения черносланцевой формации, которые распространены на значительных территориях мира. Это углеродосодержащие в различной степени регионально метаморфизованные терригенно-вулканогенно-карбонатные комплексы, в которых локализованы крупнейшие золоторудные месторождения России – Сухой Лог, Олимпиадинское, Нежданинское, Майское, Наталкинское, Светлинское и др. В них заключено более половины всех запасов золота нашей страны, что позволяет говорить о золоторудных месторождениях в черносланцевых формациях, как о важном источнике золота не только в настоящее время, но и в ближайшие десятилетия, чем определяется перспективность исследований по данной проблеме.

Основные перспективы расширения отечественной минерально-сырьевой базы золота связаны с обнаружением типичных рудных объектов в пределах распространения продуктивных черносланцевых толщ в Оренбургской части Южного Урала. Решение этой задачи в существенной мере связано с открытием, оценкой и вовлечением в промышленное освоение золоторудных месторождений, залегающих в черносланцевых толщах. Их практическую значимость на основе существующих представлений можно рассматривать в нескольких аспектах: в первую очередь, это возможный источник металлов, второе – они являются восстановительным геохимическим барьером для осаждения рудного вещества глубинных флюидов. Образования черносланцевой формации являются благоприятной геохимической средой для первичной концентрации золота, элементов группы платины, вольфрама, молибдена и других металлов. Важное значение представляют участки проявления тектонической активности, зонального и контактового метаморфизма, дайкового комплекса. Более того, углеродистые отложения представляют собой весьма информативный материал для реконструкции палеогеографических и физико-химических условий их накопления.

В этой связи рудовмещающие черные сланцы Кумакского месторождения, породы которого имеют специализацию на золото, представляются очень привлекательным объектом для всестороннего изучения рудоносности. Они могут иметь важное практическое значение для поисков новых месторождений на Южном Урале и в других регионах со сходным геологическим строением.

Цель работы заключается в оценке перспектив золотоносности углеродистых отложений брединской свиты Оренбургской части Южного Урала.

Актуальность настоящей работы определяется необходимостью разработки целостного представления о закономерностях размещения, формах нахождения, вещественном составе и генетических особенностях благороднометального оруденения черносланцевого типа, определением перспектив наращивания запасов стратегически важных металлов и выработки подхода к их освоению.

Основные задачи исследования

1. Типизация углеродистых отложений Кумакского рудного поля, реконструкция условий их накопления.
2. Установление формы нахождения углеродистого вещества в черных сланцах, оценка степени его метаморфизма.
3. Выяснение геодинамических условий образования черносланцевой формации; петрографических, геохимических и минералогических особенностей.
4. Оценка перспектив углеродсодержащих черносланцевых толщ на благороднометальное оруденение.
5. Выделение типов минеральных ассоциаций среди золоторудной минерализации Кумакского рудного поля.
6. Изучение состава коренного золота из зоны окисления рудных тел, распределения главных и второстепенных элементов в пределах золотин.
7. Установление формационной принадлежности золотого оруденения.
8. Уточнение истории формирования золоторудных объектов Кумакского рудного поля.

Фактический материал и методы исследований.

Фактической основой диссертации послужили результаты полевых, лабораторных и научно-исследовательских работ на

золото, проведенных автором в 2018–2020 гг в пределах Кумакского рудного поля. Использованы также опубликованные и фондовые материалы геолого-съемочных, тематических, поисковых и геологоразведочных работ, выполненных в разные годы на изучаемой территории.

Исследования носят комплексный характер и включают в себя анализ и научное обобщение геологических материалов. Из основных методов исследований в процессе изучения Кумакского месторождения использовались следующие: **силикатный** – 30 проб углеродистых пород (Институт геологии УНЦ РАН, г. Уфа), **атомно-абсорбционный** – 81 штуфная проба на Au, 62 на Ag (Оренбургская многопрофильная компания, г. Оренбург); **термогравиметрический** – 10 проб углеродистых сланцев на дериватографе Q-1500 (Венгрия) (ИГ УНЦ РАН, г. Уфа), **изотопный** анализ углерода (орг.) – 10 проб (ЦКП «Геонаука» Института геологии Коми НЦ Уро РАН), **микроанализ методом ИСП-масс-спектрометрии** на приборах ELAN 900 и Nex-ION300 на редкие (14 РЗЭ) и рассеянные элементы (26 элементов Li, B, Be, Sc, Ti, Cr, Ni, V, Co, Cu, Zn, Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Sb, Cs, Ba, Hf, Ta, Pb, Th, U) – 20 проб (Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург), **пиролитический метод анализа нефтегенерационных свойств пород на установке Rock-Eval** (масс-спектрометрический анализатор «Литотерм-1000», АО «НВНИИГГ», г. Саратов), **определение Сорг** выполнялось с использованием экспресс-анализатора на углерод «АН-7529» (Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар).

Фотографии поверхности золотин, изучение состава золота, а также микрозондовый анализ полированных препаратов выполнены на растровом электронном микроскопе Tescan Vega 3 с энергодисперсионным спектрометром Oxford Instruments X-act в ЦКП (М. А. Рассомахин, ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, г. Миасс). Для **петрографического описания шлифов** пород брединской свиты использован поляризационно-оптический микроскоп Olimpus bx51 с цифровой видеокамерой (Е.О. Калистратова, г. Уфа). При анализе геохимических данных и геологическом картировании использованы современные геоинформационные системы (ArcGIS 10, CorelDRAW X8).

Научная новизна работы заключается в следующем:

– Обосновано отнесение черносланцевых отложений Кумакского рудного поля к терригенно-углеродистой и кремнисто-углеродистой формациям.

– Впервые проведена реконструкция условий накопления углеродистых толщ.

– Установлены формы нахождения углеродистого вещества, биогенная его природа и степень метаморфизма (эпидот-амфиболитовая фация).

– Доказана приуроченность золоторудной минерализации преимущественно к кварц-слюдисто-турмалиновым метасоматически измененным углеродистым сланцам брединской свиты.

– Изучен состав золота и турмалина, показана их близость к таковым орогенных золотых и золото-сульфидных месторождений.

– Предложена модель формирования золоторудных объектов Кумакского рудного поля.

Практическое значение работы:

– Полученные результаты и установленные закономерности размещения золотого оруденения могут быть востребованы при постановке поисково-оценочных работ на изученной площади и позволят с новых позиций подойти к её прогнозу на золото.

– Обоснована возможность использования метода скважинного подземного выщелачивания золота на золоторудных объектах Кумакского рудного поля.

Апробация результатов исследования

Основные положения и результаты диссертационной работы представлены автором в научных докладах на следующих конференциях: IV Российской молодёжной научно-практической школе с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования» (г. Москва, 2014 г.), IV Всероссийской молодежной геологической конференции «Геология, геоэкология и ресурсный потенциал Урала и сопредельных территорий» (г. Уфа, 2016 г), IX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Геология в развивающемся мире» (г. Пермь, 2016 г), V Всероссийской молодежной геологической конференции «Геология, геоэкология и ресурсный потенциал Урала и сопредельных территорий» (г.Уфа, 2017 г), Международной научно-практической конференции

«Маркшейдерское и геологическое обеспечение горных работ» (г. Магнитогорск, 2018 г), Всероссийской научно-практической конференции «Генезис, миграция и формирование месторождений углеводородного сырья в контексте их поиска, разведки и разработки» (г. Оренбург, 2018 г), III Всероссийской студенческой научно-практической конференции «Практика геологов на производстве» (г. Ростов-на-Дону, 2018), Международной молодежной научной конференции «Студенческие научные общества – экономике регионов» (г.Оренбург, 2018 г), Всероссийской научно-практической конференции «Новые направления работ на нефть и газ, инновационные технологии разработки их месторождений, перспективы добычи нетрадиционного углеводородного сырья» (г. Оренбург, 2019 г), Всероссийской научно-практической конференции «Геологические науки» (г. Саратов, 2019 г), Всероссийской молодежной конференции «Геологические исследования Урала и Поволжья» (г. Уфа, 2020 г), Международной молодежной стратиграфической конференции памяти Головкинского «Осадочные планетарные системы: стратиграфия, геохронология, углеводородные ресурсы» (г. Казань, 2020 г).

По теме диссертации опубликовано 26 печатных работ, из них 9 статей в изданиях, рекомендованных перечнем Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки РФ, 7 статей проиндексированы в международных базах цитирования Scopus и WoS.

Объем и структура работы. Диссертационная работа общим объемом 156 страниц состоит из введения, 7 глав, заключения и списка литературы из 165 наименований. Текст сопровождается 25 таблицами и 41 рисунком.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность своему научному руководителю – д.г.-м.н., профессору Панкратьеву П.В. за наставления, внимание и неоценимую помощь на всех этапах подготовки работы.

Особую благодарность автор выражает к.г.-м.н. Сначёву А.В. за активную поддержку в научном и творческом плане, ценные советы и помощь при проведении аналитических исследований.

Автор искренне благодарит д.г.-м.н. Сначёва В.И., д.г.-м.н. Навроцкого О.К., д.э.н. Воробьёва А.Г., к.г.-м.н. Политыкину М.А.,

к.г.-м.н. Тюрина А.М., к.г.-м.н. Багманову С.В., к.х.н. Раздобреева Д.А., Рассомахина М.А., Донецкову А.А. за советы при написании работы; д.г.н. Петрищева В.П., к.т.н. Степанова А.С., Репкина В.А. за помощь в решении организационных вопросов. Также автор выражает благодарность геологам Пантелееву В.С. и Кисилю Р.С. за помощь в проведении полевых работ и оформлении графических материалов диссертации.

За всестороннюю поддержку при подготовке работы автор сердечно благодарит свою семью.

Защищаемые научные положения

1. Черносланцевые отложения Кумакского рудного поля принадлежат терригенно-углеродистой и кремнисто-углеродистой формациям. Углеродистое вещество представлено тонкой рассеянной осадочной органикой и метаморфическим графитом, имеет биогенную природу и испытало метаморфизм в условиях эпидот-амфиболитовой фации.

2. Золоторудная минерализация приурочена преимущественно к кварц-слюдисто-турмалиновым метасоматически измененным углеродистым сланцам и принадлежит кварцево-турмалиновой золоторудной формации. По своему химическому составу турмалины относятся к дравиту и фойтиту и близки к таковым орогенных золотых и золото-сульфидных месторождений.

3. Золото на объектах Кумакского рудного поля в основном тонкодисперсное, относится к высокопробному (919–1000) типу и связано с двумя главными минеральными ассоциациями: золото-висмут-теллуридной и самородным золотом в срастании с турмалином. В зоне гипергенеза происходит вторичное переотложение золота и очищение от элементов – примесей.

Краткие сведения о геологическом строении

Кумакское рудное поле расположено в восточной части Аниховского грабена и приурочено к Кумакско-Котансийской зоне смятия, сложенной преимущественно черносланцевыми образованиями брединской свиты (C_1bd). Она впервые выделена А.А. Петренко в 1946 году и названа по поселку Бреды в Челябинской области. В её разрезе преобладают углеродсодержащие терригенно-осадочные образования: алевролиты, углеродисто-глинистые сланцы и песчаники, а также редкие прослои известняков и углей. Подчиненное значение имеют эффузивы типа дацитовых и андезитовых порфиритов и их туфы.

Промышленные концентрации золота в рудном поле связаны как с сериями кварцевых жил и прожилков, так и с зонами прожилково-вкрапленной минерализации в породах, обогащенных углеродистым веществом. Последний тип оруденения имеет ведущую роль, что и предопределило повышенный интерес со стороны геологов к этому объекту. Углеродсодержащие терригенно-осадочные отложения образуют мощную рудовмещающую пачку мощностью в 70–120 м на протяжении нескольких километров (рис. 1). Она имеет меридиональную вытянутость, с резкими колебаниями мощности. На востоке рудовмещающая черносланцевая толща контактирует с метаморфизованными дацитовыми порфиритами и альбитово-хлоритовыми сланцами по ним, а на западе – с парасланцами пачки хлоритовых сланцев. На глубине углеродистые сланцы прорываются интрузией кварцевых диоритов кумакского комплекса (δC_1k), протягивающихся вдоль всей рудной зоны. Диориты катаклазированы, рассланцованы и часто не имеют четких границ с вмещающими породами. Рудные тела представлены кварцево-хлорит-серицитовым и кварцево-турмалиновым составом в виде жил, линз и пластообразных залежей и апофиз, приуроченных к толще углеродсодержащих сланцев, с пластами которых они, в основном, залегают согласно, имея меридиональное простирание.

Также рудные тела тяготеют к зонам проявления интенсивного метасоматоза и минерализации. Гидротермальные изменения выражены развитием полос серицита, перекристаллизацией и обособлением кварца, присутствием карбоната, цементирующего кварц. Выделены следующие продукты гидротермального метасоматоза (Сазонов В.Н. и др., 2011): фельдшпатолиты, эйситы,

эпидозиты, березиты-лиственититы, кварц-серицитовые метасоматиты, зоны развития биотита, хлоритоида, а также кварцевых жил.

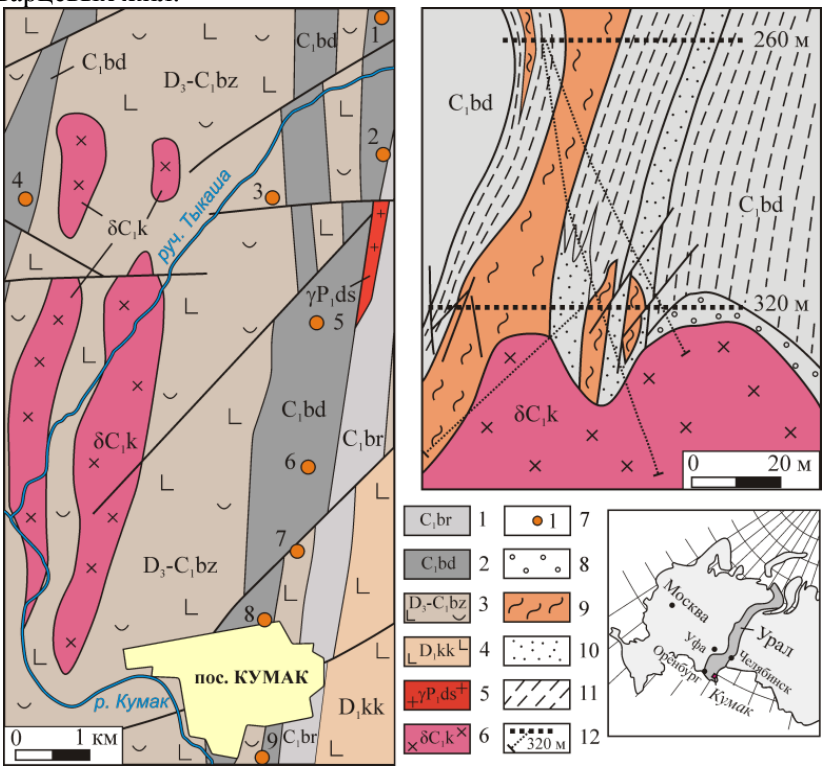

Рис. 1. Геологическая карта и схематический разрез Кумакского месторождения (составлена автором по Лядскому П.В. (2018) с упрощениями)

Условные обозначения: 1 – биргильдинская толща (конгломераты, песчаники, известняки); 2 – брединская свита (углеродистые сланцы, песчаники, алевролиты); 3 – березняковская толща (туфы основного и кислого состава, прослои алевролитов); 4 – кокпектинская толща (лавы и туфы базальтов); 5 – джабыкско-санарский гранит-лейкогранитовый комплекс; 6 – кумакский диорит-плагиогранитовый комплекс; 7 – проявления и месторождения золота: 1 – Восточно-Тыкашинское, 2 – Коммерческое, 3 – Миля, 4 – Тамара, 5 – Забайкальское, 6 – Байкал, 7 – Центральное, 8 – Кумак, 9 – Кумак-Южный; 8 – ороговикованные сланцы; 9 – рудовмещающие кварц-слюдисто-турмалиновые углеродистые сланцы, 10 – песчаники с углеродистым цементом, 11 – углеродистые серицит-кварцевые сланцы; 12 – подземные горные выработки, их глубина, скважины.

Обоснование защищаемых положений

1. Черносланцевые отложения Кумакского рудного поля принадлежат терригенно-углеродистой и кремнисто-углеродистой формациям. Углеродистое вещество представлено тонкой рассеянной осадочной органикой и метаморфическим графитом, имеет биогенную природу и испытало метаморфизм в условиях эпидот-амфиболитовой фации.

Распределение углеродистого вещества в отложениях брединской свиты Кумакского месторождения неравномерное. Оно находится в виде тонко рассеянных частиц, полосок, отвечающих слоистости; массы, цементирующей остальные минералы, а также мелких включений в центральных частях зерен турмалина. В областях тектонической переработки и метаморфизма углеродистое вещество представлено крупными прожилковидными и чешуйчатыми выделениями графита.

Содержание Сорг в черных сланцах брединской свиты изменяется в широком диапазоне от значений близких к 1% до почти 11% при среднем содержании 4,7%. Установлено, что в генетическом отношении углеродистое вещество представлено двумя типами: слабометаморфизованной тонкой рассеянной осадочной органикой и метаморфическим графитом (Рис.2). Изотопный состав углерода $\delta^{13}C$ по сравнению со стандартом PDB укладывается в интервал (-19,07) – (-22,80) (Рис. 3), что указывает на его биогенную природу, а незначительные вариации значений связаны с неоднородной степенью метаморфизма (Javoy et al.,1986 и др.). Термогравиметрический анализ углеродистых отложений показал, что органический углерод претерпел высокую степень метаморфизма, сопоставимую с высшими керитами, антраксолитом и шунгитом. Максимальная температура экзотермического эффекта углерода укладывается в интервал 630–770°С (температура метаморфизма 560–660°С), что соответствует эпидот-амфиболитовой фации.

С целью определения нефтематеринских свойств углеродистых сланцев один образец изучен по технологии Rock-Eval, а также выполнена экстракция хлороформенного битумоида. Проведенные исследования показали невысокие значения параметров S1 и S2 (0,1 и 0,14 соответственно), а также бесцветные экстракции ХБ, что свидетельствует о высокой стадии катагенеза органического вещества и низком (но не нулевом) нефтематеринском потенциале.

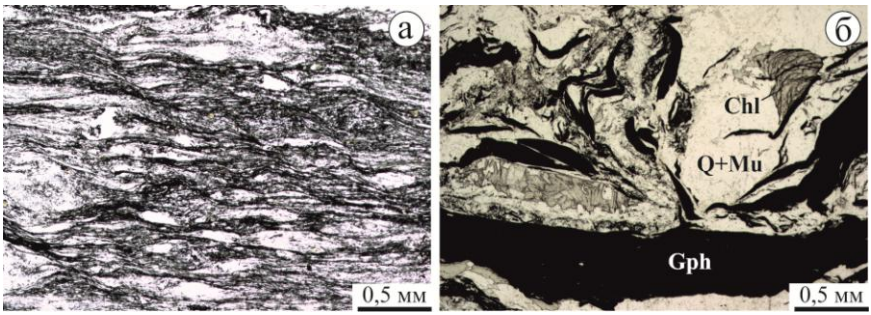

Рис. 2. Полосчатая первично осадочная текстура породы (**а**) и чешуйки метаморфического графита в кварц-слюдисто-хлоритовом сланце (**б**) (без анализатора, 40х). Минералы: *Mu – мусковит, Q – кварц, Gph – графит, Chl – хлорит.*

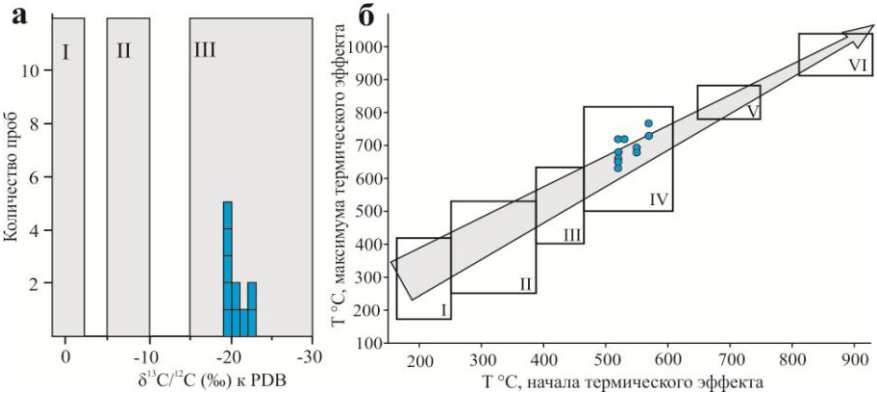

Рис. 3. Изотопный состав углерода (**а**) и положение точек черных сланцев брединской свиты на диаграмме термической устойчивости углеродистых веществ (**б**).

а*:поля типичных значений изотопов углерода для морских карбонатов (I), мантийного углерода (II) и биогенного углерода (III) по Javoy et al. (1986).* ***b****:ступени выгорания по Силаеву и др. (2012): I – современные растения, органическое вещество в неметаморфизованных осадочных породах, копролиты; II – асфальты, низшие кериты; III – асфальтиты, кериты; IV – высшие кериты, антраксолиты, шунгиты; V – графит, карбонады; VI – алмазы.*

Для определения формационной принадлежности черносланцевых отложений использовалась диаграмма A–S–C, полученная на основе обобщения большого количества химических

анализов пород углеродистых формаций (Горбачёв,Созинов,1985). Анализы, вынесенные на диаграмму, показывают, что фигуративные точки образуют непрерывный ряд по оси S от 500 до 1200 ед. и относятся преимущественно к терригенно-углеродистой формации. Несколько проб попадают в левую часть поля кремнисто-углеродистой формации (Рис. 4).

Для реконструкции состава и условий накопления углеродистых отложений использовались стандартные петрохимические параметры (модули), рассчитываемые по силикатным анализам (Юдович, Кетрис, 2015). Гидролизатный модуль (ГМ = (TiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + FeO + MnO) / SiO_2), основанный на содержаниях пяти главных петрогенных оксидов и являющийся универсальным для большинства терригенных и кремнистых пород, дает возможность разделить породы, содержащие либо продукты гидролиза (каолинит, оксиды алюминия, железа, марганца), либо кремнезем. Чем выше значение гидролизатного модуля, тем более сильное и глубокое выветривание претерпели исходные породы источников сноса и чем ниже его значение, тем «чище» осадок от продуктов выветривания, т.е. выше зрелость породы. Рассматриваемые углеродистые отложения относятся к типу сиаллитов и сиферлитов (ГМ = 0,3–0,5), но часть несет в своем составе продукты переотложения высокоглиноземистых кор выветривания и принадлежат к типу гидролизатов (ГМ > 0,55). Это находит свое отражение в значениях алюмокремниевого модуля (АМ = Al_2O_3 / SiO_2), служащего для разделения глинистых и песчанистых пород, максимальное значение которого в породах брединской свиты достигает 0,77 ед (среднее 0,38 ед), что указывает на принадлежность их к классу суперглинозёмистых отложений. Стабильно высокие значения индекса химического выветривания (CIA = 100Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)), рассчитанные по молекулярным количествам оксидов и составляющие от 70 до 94 ед., указывают на высокую степень выветривания осадочного алюмосиликокластического материала, характерную для отложений гумидных зон (Nesbitt, 1982). На классификационной диаграмме log(SiO_2 / Al_2O_3) – log($Fe_2O_{3общ}$ / K_2O), отражающей соотношение в породах кварца, полевых шпатов и глинистых минералов, подавляющее число фигуративных точек углеродистых сланцев брединской свиты

сосредоточено в поле сланцев, что свидетельствует о минимальном переносе осадочного материала (Рис. 4б).

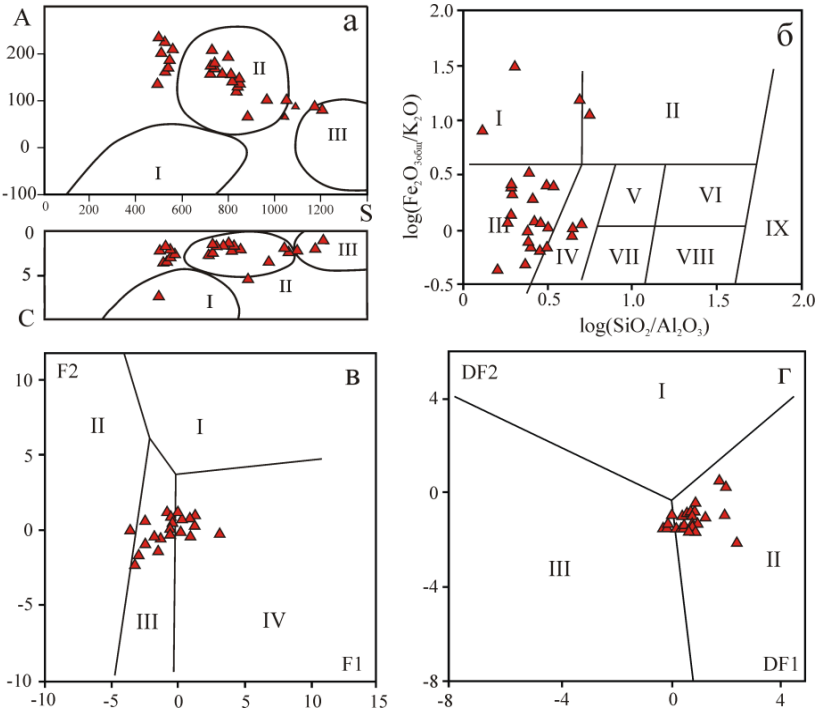

Рис. 4. Положение точек состава углеродистых сланцев брединской свиты на классификационных диаграммах

Примечание: а – классификационная диаграмма A–S–C (Горбачёв, Созинов, 1985). Поля формаций: I – карбонатно-углеродистая, II – терригенно-углеродистая, III – кремнисто-углеродистая. Параметры: A=(Al_2O_3–(CaO+K_2O+Na_2O))×1000 и S=(SiO_2–(Al_2O_3+ Fe_2O_3+FeO +CaO+ MgO)) × 1000 выражены в молекулярных количествах, параметр C=(CaO+MgO) – в массовых долях оксидов.

б – log(SiO_2/Al_2O_3) – log($Fe_2O_{3общ}$/K_2O) (Herron, 1988). Поля: I – Fe-сланцы, II – Fe-песчаники, III – Сланцы, IV – Вакки, V – Литарениты, VI – Сублитарениты, VII – Аркозы, VIII – Субаркозы, IX – Кварцевые арсениты.

в – F1-F2 (Roser et al., 1988), где: F1 = 30,638(TiO_2/Al_2O_3) – 12,541($Fe_2O_{3общ}$/Al_2O_3) + 7,329(MgO/Al_2O_3) + 12,031(Na_2O/Al_2O_3) + 35,402(K_2O/Al_2O_3) – 6,382, F2 = 56,5(TiO_2/Al_2O_3) –10,879($Fe_2O_{3общ}$/Al_2O_3) + 30,875(MgO/Al_2O_3) – 5,404(Na_2O/Al_2O_3) + 11,112(K_2O/Al_2O_3) – 3,89. Поля источников обломочного материала: I – богатые кварцем осадочные породы,

II – магматические породы основного состава, III – магматические породы среднего состава, IV – магматические породы кислого состава.

г – DF1-DF2 (Verma et al., 2013), где: $DF1 = -0{,}263\ln(TiO_2/SiO_2)_{adj} + 0{,}604\ln(Al_2O_3/SiO_2)_{adj} - 1{,}725\ln(Fe_2O_{3общ}/SiO_2)_{adj} + 0{,}66\ln(MnO/SiO_2)_{adj} + 2{,}191\ln(MgO/SiO_2)_{adj} + 0{,}144\ln(CaO/SiO_2)_{adj} - 1{,}304\ln(Na_2O/SiO_2)_{adj} + 0{,}054\ln(K_2O/SiO_2)_{adj} - 0{,}33\ln(P_2O_5/SiO_2)_{adj} + 1{,}588$; $DF2 = -1{,}196\ln(TiO_2/SiO_2)_{adj} + [1{,}064\ln(Al_2O_3/SiO_2)_{adj} + 0{,}303\ln(Fe_2O_{3общ}/SiO_2)_{adj} + 0{,}436\ln(MnO/SiO_2)_{adj} + 0{,}838\ln(MgO/SiO_2)_{adj} - 0{,}407\ln(CaO/SiO_2)_{adj} + 1{,}021\ln(Na_2O/SiO_2)_{adj} - 1{,}706\ln(K_2O/SiO_2)_{adj}] - 0{,}126\ln(P_2O_5/SiO_2)_{adj} - 1{,}068$ *Нижний индекс «adj» показывает, что расчет ведется по содержаниям оксидов, приведенным к 100 % сухого вещества. Поля обстановок осадконакопления: I – островодужные, II – коллизионные, III – рифтогенные.*

По данным химического состава осадочных пород можно в определенной мере судить и о составе пород-источников обломочного материала для них. Для этого обычно используется ряд различных диаграмм, наиболее широко из них – диаграмма F1-F2. Распределение фигуративных точек состава рассматриваемых углеродистых сланцев показывает, что источником терригенного материала были преимущественно породы основного состава, а также продукты размыва кислых вулканитов основания разреза брединской свиты (Рис. 4в). На диаграмме DF1-DF2 С. Верма и Дж. Армстронга-Алтрина эти же породы образуют уже компактный рой в переходной зоне от рифтогенной геодинамической обстановки к коллизионной (Рис. 4г). Учитывая особенности накопления и переноса некоторых элементов в процессе осадконакопления можно довольно уверенно реконструировать окислительно-восстановительные обстановки в древних седиментационных бассейнах. По совокупности значений параметров V/Cr, V/(V+Ni), Mo/Mn, $U_a=U_{total}$–Th/3 углеродистые осадки брединской свиты отлагались в закисных и частично в субокислительных условиях.

2. Золоторудная минерализация приурочена преимущественно к кварц-слюдисто-турмалиновым метасоматически измененным углеродистым сланцам и принадлежит кварцево-турмалиновой золоторудной формации. По своему химическому составу турмалины относятся к дравиту и фойтиту и близки к таковым орогенных золотых и золото-сульфидных месторождений.

Кумакское рудное поле характеризуется большим разнообразием золоторудной минерализации, а также сложным полиформационным типом оруденения, которое приурочено преимущественно к пачкам кварц-слюдисто-турмалиновым метасоматически измененным углеродистым сланцам. Преобразования выражены развитием полос серицита, перекристаллизацией и обособлением кварца в жилы и прожилки различной мощности, развитием карбоната и ожелезнения.

В ходе полевых работ на Кумакском месторождении опробованы на золото и серебро слабоизмененные и измененные углеродистые сланцы брединской свиты. В первых содержание Au достигает 0,6 г/т, Ag 3–4 г/т. В измененных сланцах распределение Au крайне неравномерное – от 0,1 до 17,7 г/т. В целом, анализ показал устойчивые надкларковые содержания в черных сланцах благородных металлов, достигающие в ряде образцов промышленных значений. Установлены обогащенные рудные участки: по внешнему виду они представлены турмалинизированными сланцами и массивными породами светло-серого цвета в темных породах углеродистой толщи с кварцевыми проводничками или телами. В них постоянно наблюдается прозрачная бесцветная слюда – найтрийсодержащий мусковит (Na_2O=1,25–2,34%). Морфология его выделений разнообразна.

Полевое изучение сланцев различного состава Кумакского месторождения показало, что турмалин широко развит во всех их разновидностях. Микроскопические наблюдения подтвердили эти данные. Его содержание колеблется от единичных зерен до 15–20%, поднимаясь, в редких случаях, до 60–70%. Он отмечен в виде идиоморфных кристаллов, ясно плеохроирует в зеленоватых оттенках, развит неравномерно в породе и преобладает в интервалах, обогащённых углеродистым веществом. Редко турмалин отмечается в прослоях кварц-слюдистого состава (Рис. 5б), причём вытянутые призматические кристаллы демонстрируют нарушение плойчатой текстуры. В продольных сечениях он представлен тонкими, вытянутыми, узкопризматическими кристаллами размерами до 0,8 мм, часто с трещинками, в поперечном сечении – в виде разнообразных шестиугольников. Трещинки в кристаллах турмалина (сомкнутые и слабо раскрытые) свидетельствуют о хрупких деформациях турмалина. Иногда на перегибах складок вблизи открытых трещин

наблюдаются пластические деформации турмалина, выраженные в слабом изгибании кристаллов. Часто в кристаллах наблюдается зональное строение турмалина, подчёркнутое окраской минерала: в центральной части – синевато-зелёный, на периферии – светло-зелёный (Рис. 5в). При больших увеличениях объектива в нём можно наблюдать пойкилитовые включения углеродистого вещества. По своему химическому составу центральная часть турмалинов соответствует фойтиту, середина – дравиту, изредка отмечается тонкая оторочка из шерла (Рис. 5г, д). Они достаточно высокомагнезиальные и не содержат примесей металлов, Mn, F и As, характерных для турмалинов порфировых месторождений и гранитов, и близки к метаморфогенному дравиту орогенных золотых и золото-сульфидных месторождений, а также турмалину золото-порфировых объектов.

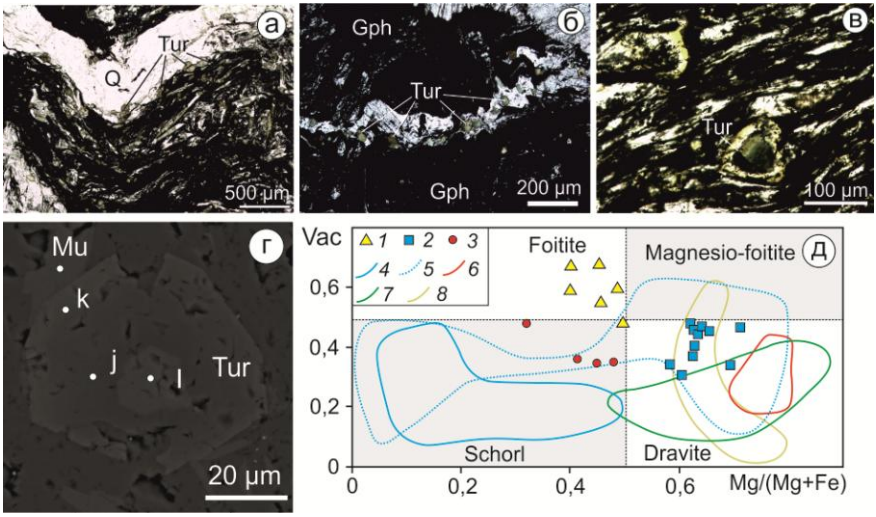

Рис. 5. Турмалиновая минерализация в углеродистых сланцах Кумакского месторождения

Минералы: Tur – турмалин, Mu – мусковит, Q – кварц, Gph - графит; а, б – полосчатая, плойчатая текстура углеродсодержащего кварц-слюдистого сланца; в – зональность турмалина с включениями углеродистого вещества; г – электронно-микроскопические фотографии поперечных срезов кристаллов турмалина и точки анализа; д – сравнение состава турмалина из месторождений различного генезиса. 1–3 – точки составов турмалинов Кумакского месторождения: 1 – центр, 2 – середина, 3 – край кристалла; 4–8 – поля составов турмалина из месторождений:4, 5 – оловорудного Хнилец,

Словакия (Jiang et al., 2008): 4 – из гранитов; 5 – из вмещающих метаморфических пород; 6 – орогенного золота Хатти, Индия (Hazarika et al., 2015); 7 – Cu-Mo-Au-Te порфирового Факос, Греция (Voudouris et al., 2019); 8 – золото-сульфидного месторождения Муртыкты (Рассомахин и др., 2020).

Тесное срастание турмалина и золота (Рис.6) указывает на синхронность их отложения и позволяет выделить в пределах Кумакского рудного поля кварцево-турмалиновую золотоносную формацию, сопоставимую с рядом объектов Восточного Забайкалья и Тувы (Кужугет и др., 2014; Гвоздев и др., 2020). Её вероятным источником в серицито-кварцево-углеродистых сланцах могли служить метаморфически преобразованные борсодержащие морские осадки, насыщенные глинистыми частицами и Сорг.

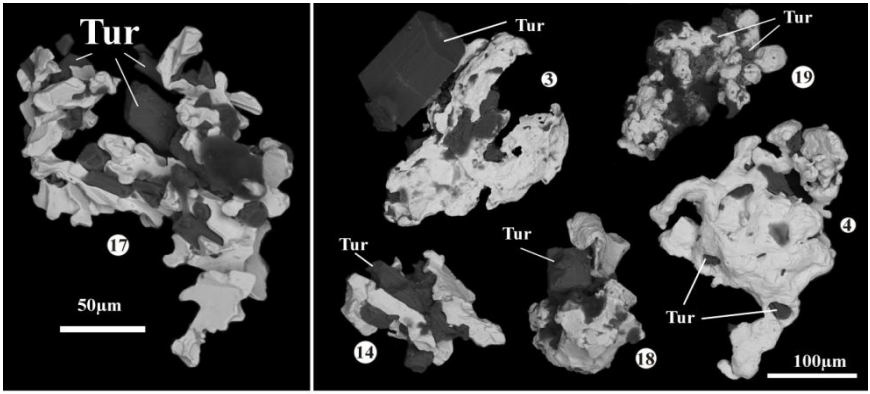

Рис. 6. Электронно-микроскопические изображения поверхности золотин, отмытых из углеродистых сланцев и кор выветривания Кумакского месторождения

3. Золото на объектах Кумакского рудного поля в основном тонкодисперсное, относится к высокопробному (919–1000) типу и связано с двумя главными минеральными ассоциациями: золото-висмут-теллуридной и самородным золотом в срастании с турмалином. В зоне гипергенеза происходит вторичное переотложение золота и очищение от элементов – примесей.

В рудной зоне выделяется четыре основных золотоносных минеральных ассоциаций. *Первая* из них развита на юге рудного

поля (Кумакское месторождение и проявление Байкал) и представлена целым спектром золото-висмут-теллуридной минерализации (Рис. 7, № 3), а также включениями раклежита и самородного золота в кобальтине (Рис. 7, № 2). Характер срастаний теллуридов и золота, а также постоянная высокая золотоносность участков рудных тел, обогащенных теллуридами, указывает на близко одновременное выделение этих минералов. *Вторая* – мелкое самородное золото, в виде пленок и гнезд наблюдается во всех разновидностях сланцев, а также накладывается на кварцевые и шеелит-кварцевые жилы (Рис. 8). *Третьей* ассоциацией является полиметаллическая минерализация с бедным содержанием благородного металла (слабо проявлена в пределах рассматриваемой площади). *Четвертая* – фиксируется в основной зоне смятия на северном участке и является преобладающей. Золото здесь тонкодисперсное, связано с мелкими кристаллами пирита, арсенопирита и приурочено к участкам обильной турмалинизации.

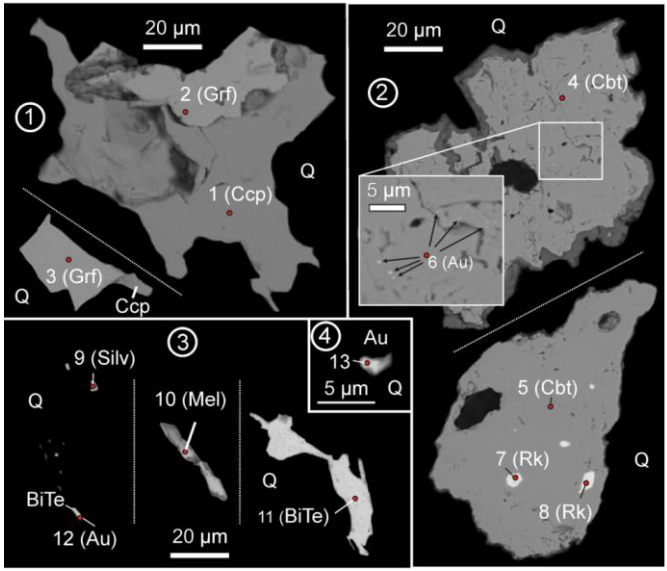

Рис. 7. Электронно-микроскопические изображения минералов включений в углеродистых сланцах Кумакского месторождения

1 – срастание халькопирита (Ccp) и герсдорфита (Grf);2 – зерна кобальтина (Cbt) с включениями самородного золота (Au) и раклежита (Rk);3 – срастание теллурида висмута (BiTe) и золота (Au), теллуриды никеля (мелонит, Mel) и золота (сильванит, Silv); 4 – самородное золото (Au) в кварце (Q)

Во время проведения полевых работ получено более сотни мелких и средних золотин, а также найдено небольшое скопление золота в прожилке кварца, пронизывающее образец вглубь на 1,5 см (Рис.8). Формы выделения самородного золота самые разнообразные: пластинчатая; изометричная, полуокатанная, пупырчатая, в виде сростков и листочков. Выделяется золото в виде пористых губчатых и друзовидных агрегатов, пластинок, пленок. Плёночное золото особенно характерно для сланцев. На поверхности золотин отмечаются колломорфные почковидные корочки лимонита, а также срастания с мусковитом и турмалином. Отмечена пластичность выделений с треугольными акцессориями роста размером 2–4 мкм, такое золото редко сопровождается рудными минералами. Анализ золотин выявил неоднородный их состав (Таблица). Золото относится к высокопробному типу (Au – 92–96%), содержание серебра составляет 4–8%.

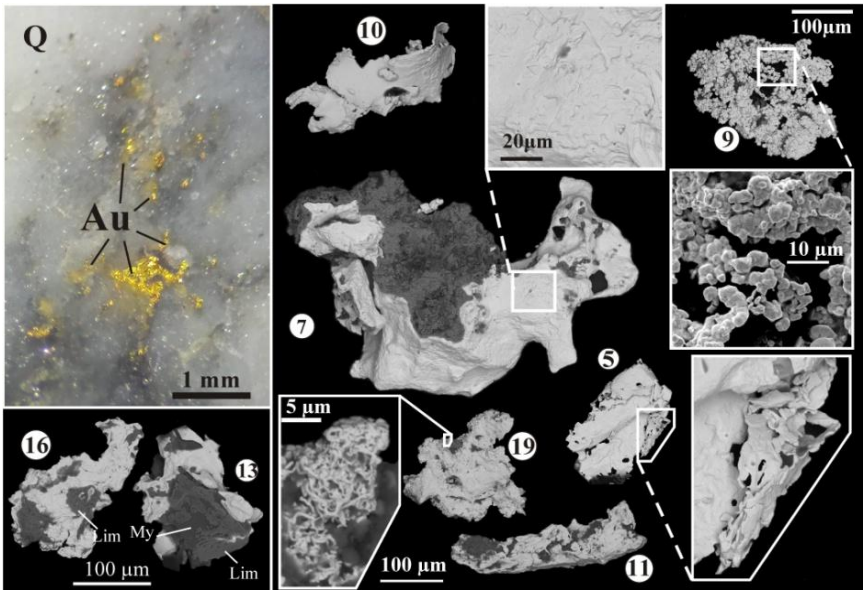

Рис. 8. Самородное золото в кварцевом прожилке и электронно-микроскопические изображения поверхности золотин, отмытых из углеродистых сланцев и кор выветривания на Кумакском месторождении

В верхних горизонтах месторождения широко развиты процессы гипергенеза. Здесь сланцы разрыхлены и отчасти каолинизированы. Установлено, что в зоне гипергенеза происходит вторичное переотложение золота в виде мелких высокопробных агрегатов (Рис.8, №9), а также образование на некоторых зернах каймы с явными признаками облагораживания и очищения от элементов-примесей (Таблица). Такого рода каймы типичны для гипергенного новообразованного золота. Обособления агрегатов имеют очертания неправильной формы – губчатое и хлопьевидное строение. В отдельных случаях отмечается ассоциация самородного золота с гипергенными минералами.

Таблица. Элементный состав золотин Кумакского месторождения

Золотина	Au, %	Ag, %	Пробность
1ц	93,91	6,09	939
1к	94,42	5,58	944
2	94,30	5,70	943
3	92,61	7,39	926
4ц	93,61	6,39	936
4к	100,00	0,00	1000
5	93,02	6,98	930
7ц	93,00	7,00	930
7к	94,28	5,72	943
8	91,86	8,14	919
9	100,00	0,00	1000
10	93,30	6,70	933
11	93,88	6,12	939
12	95,73	4,27	957
13	94,74	5,26	947
14	95,73	4,27	957
15	94,04	5,96	940
16	90,88	9,12	909
17	94,55	5,45	946

Примечание: номера золотин см. рис. 6,8

Необходимым условием для формирования благороднометальной минерализации является пространственное совмещение областей развития низкотемпературного регионального и приразломного метаморфизма, метасоматизма.

Заключение

Основные результаты диссертации сводятся к следующим выводам:

1. Черносланцевые образования брединской свиты относятся к углеродистому типу и попадают в поля терригенно-углеродистой и кремнисто-углеродистой формаций. Углеродистое вещество представлено двумя типами: тонким рассеянным осадочным органическим веществом и метаморфическим графитом, имеет биогенную природу и испытало метаморфизм в условиях эпидот-амфиболитовой фации.

2. Условия осадконакопления довольно специфичны для подобных отложений Южного Урала. Терригенный высокоглиноземистый осадочный материал претерпел минимальный перенос и формировался преимущественно за счет разрушения пород основного состава, а также продуктов размыва кислых вулканитов основания разреза брединской свиты.

3. Нормирование к постархейскому австралийскому глинистому сланцу показывает, что редкоземельные элементы в рассматриваемых углеродистых сланцах не накапливаются. Их содержания по отношению к PAAS укладываются в интервал от 0,1 до 1 ед. Основными минералами-концентраторами лёгких РЗЭ являются монацит (-Ce) и рабдофан (-Ce), тяжелых – ксенотим (-Y).

4. Углеродистые сланцы рудного поля имеют золото-турмалиновую специализацию. Богатые рудные зоны обусловлены узлами пересечения Восточно-Аниховских разрывов близмеридионального простирания с разломами других направлений, выраженных зонами интенсивно проявленного окварцевания, серицитизации, турмалинизации шириной 300–400 м и протяженностью до 10 км.

5. В кварц-слюдисто-турмалиновых метасоматически измененных углеродистых сланцах установлены промышленные содержания золота и стабильно высокие – серебра. Тесное срастание турмалина и золота указывает на синхронность их отложения и позволяет выделить в пределах Кумакского рудного поля кварцево-турмалиновую золотоносную формацию, сопоставимую с рядом объектов Восточного Забайкалья и Тувы. Наиболее вероятным источником турмалиновой минерализации в серицит-кварцево-углеродистых сланцах могли служить

подверженные метаморфическим преобразованиям борсодержащие морские осадки, насыщенные глинистыми частицами.

6. Золото кварц-слюдисто-турмалиновых метасоматически измененных углеродистых сланцев связано с двумя основными минеральными ассоциациям: золото-висмут-теллуридной и самородным золотом в срастании с турмалином. По своему химическому составу турмалины относятся к дравиту и фойтиту и близки к таковым орогенных золотых и золото-сульфидных месторождений.

7. Золото на объектах Кумакского рудного поля в основном тонкодисперсное и относится к высокопробному (919–1000) типу. В зоне гипергенеза золотины неоднородны, часто имеют каймы с явными признаками облагораживания и очищения от элементо-примесей. Здесь происходит вторичное переотложение золота в виде мелких губчатых высокопробных агрегатов.

8. Предложенная модель формирования Кумакского золоторудного месторождения в черносланцевых толщах связана с этапами накопления, перераспределения и концентрации.

9. В практической части работы выполнена оценка возможности использования метода скважинного подземного выщелачивания золота до глубины 50 м и вовлечения в разработку старых отвалов рудного поля.

Проведенные исследования и полученные результаты могут быть востребованы при постановке поисково-оценочных работ на изученной площади и позволят с новых позиций подойти к её прогнозу на золото.

Список опубликованных работ автора по теме диссертации

Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах Web of Science и Scopus:

1. Панкратьев П. В., **Коломоец А. В.,** Степанов А. С., Теплякова Е. В. Кумакское рудное поле как перспективный золоторудный объект в Оренбургской области / Горный журнал, 2019. № 1. С. 8-12. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.02

2. Сначёв А. В., Сначёв В. И., Рассомахин М. А., **Коломоец А. В.** Углеродистые сланцы Каменского участка: геология и рудоносность (Южный Урал) / Горный журнал, 2020. № 2. С. 24-29. DOI: 10.17580/gzh.2020.02.02

3. Pankratiev P. V., **Kolomoets A. V**., Bagmanova S. V., Panteleev V. S. Features of the Formation of Gold Manifestations in the Black Shale Deposits of the Kumakskoye Ore Field. Processes in GeoMedia – Volume I. Springer Geology. Springer, Cham. 2020. P. 11-15. DOI: 10.1007/978-3-030-38177-6_2

4. **Коломоец А. В.,** Сначёв А. В., Рассомахин М. А. Золото-турмалиновая минерализация в углеродистых сланцах Кумакского месторождения (Южный Урал) / Горный журнал, 2020. № 12. С. 11-15. DOI: 10.17580/gzh.2020.12.02

5. **Kolomoets Alexandra**, Snachev Alexander, Smoleva Irina Carbonaceous Matter in Black-Shale Deposits of the Bredy Formation (Southern Urals) // PROCEEDINGS 4th Kazan Golovkinsky Stratigraphic Meeting 2020. Sedimentary Earth Systems: Stratigraphy, Geochronology, Petroleum Resources, 2020. P. 82-86. DOI: 10.26352/E922_KAZAN2020

6. **Kolomoets A. V.,** Panteleev V. S., Kutuyeva N. R., Mumenov A. B., Yakshigulov D. F. Geology and gold mineralization of lower carboniferous deposits of the kommercheskoye deposit (kumak ore field). Processes in GeoMedia – Volume II. Springer Geology. Springer, Cham. 2021. P. 163-167. DOI: 10.1007/978-3-030-53521-6_19

7. Snachev A. V., **Kolomoets A. V**., Rassomakhin M. A., Snachev V. I. Geology and gold mineralization in Baikal carbonaseous schist in the South Urals. EURASIAN MINING. 2021. No 1. DOI: 10.17580/em.2021.01.01.

Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ:

8. **Коломоец А. В.** Условия формирования Кумакского месторождения черносланцевой формации (Оренбургская область) / Вестн. Забайкал. гос. ун-та. 2018. Т. 24. № 6. С. 28-35.

9. Панкратьев П. В., **Коломоец А. В.**, Пантелеев В. С. Разработка остаточных запасов Кумакского золоторудного месторождения (Оренбургская область) / Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16. № 3. С. 33-39.

10. **Коломоец А. В.**, Панкратьев П. В., Кисиль Р. С., Пантелеев В. С. Структурные факторы формирования золотого оруденения на примере Кумакского золоторудного месторождения

(Восточно-Уральское поднятие) / Процессы в геосредах. 2019. № 3 (21). С. 341-346.

11.**Коломоец А. В.** Особенности размещения и локализации золотого оруденения Кумакской группы месторождений // Вестник Забайкальского государственного университета. 2019. Т.25, №9. С.25-32. DOI: 10.21209/2227924520192592532.

12. **Коломоец А. В**., Панкратьев П. В., Ханнанова Ф. Ф., Клименко А. В., Фролова А. А., Хусаинова Л. Ф. Золотоносность рифтогенных структур Восточно-Уральского поднятия / Процессы в геосредах. 2019. № 4 (22). С. 497- 501.

13. **Коломоец А. В**., Сначёв А. В. Геология и петрогеохимические особенности углеродистых отложений Кумакского рудного поля / Процессы в геосредах. 2020. № 1 (23). С. 589-596.

Избранные материалы конференций:

14. **Коломоец А. В.** К вопросу о разработке остаточных запасов и отвалов золота в районах старых золотодобывающих предприятий (на примере Кумакского рудного поля) / Новое в познании рудообразования. Материалы Четвертой Российской молодежной Школы с международным участием, Москва: ИГЕМ РАН, 2014. – С.160-163

15. Панкратьев П. В., **Коломоец А. В**., Пантелеев В. С. Геологические особенности Кумакского месторождения на основе сравнительного анализа / Маркшейдерское и геологическое обеспечение горных работ: сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. Магнитогорск: Магнитогорский Дом печати, 2018. С. 64-69.

16.**Коломоец А. В.**, Сначёв А. В., Рассомахин М. А. Золотоносность углеродистых сланцев Кумакского рудного поля, Оренбургская область / Металлогения древних и современных океанов - 2020. Критические металлы в рудообразующих системах. Миасс: ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, 2020. С. 147-151.

17. Сначёв А. В., **Коломоец А. В.,** Рассомахин М. А., Сначёв В. И., Кисиль Р. С. Турмалиновая минерализация в углеродистых сланцах проявления Байкал (Южный Урал) // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского. 2021. № 24. С. 217-222.