

Пространственная и генетическая связь эндогенной и экзогенной золотоносности на площади Первомайско-Зверевского рудного узла (Средний Урал)

Александр Григорьевич БАРАННИКОВ*

Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения эффективности оценочных работ на новые и нетрадиционные типы золотого оруденения в пределах известных рудно-россыпных районов и узлов.

Цель работы – отразить результаты исследования пространственной и генетической связи эндогенной и экзогенной золотоносности на примере Первомайско-Зверевского рудно-россыпного узла (РРУ).

Методы исследований – минералого-геохимическое опробование выходов рудных тел, химических кор выветривания; шлихо-минералогические исследования; изучение самородного золота на цифровой основе, учитывающей форму, размер и состав частиц; картирование параметров золотин в разрезе кор, верхнем горизонте мезозойского элювия.

Результаты. Обоснованы факторы, определяющие локализацию золотоносности в пределах РРУ. В числе *эндогенных факторов*: структурно-тектонический, магматический, металлогенической специализации отдельных блоков. В объеме Верхотурского гранодиоритового массива (объекта поисковых работ) выявлен линейный субштокверк с низким уровнем минерализации золото-полисульфидно-кварцевого типа. При рассмотрении *экзогенных факторов* установлена приуроченность рудоносных химических кор выветривания к сглаженным участкам рельефа, сопоставляемым с мезозойскими денудационными поверхностями выравнивания и содержащими в цоколе рассредоточенную золоторудную минерализацию. Профиль коры выветривания на Верхотурском участке сложный, без отчетливо проявленной вертикальной гипергенной зональности. Эти коры рассматривают как «наложенные», окончательно оформившиеся под воздействием более поздних низкотемпературных процессов аргиллизации. Наиболее значимые концентрации золота установлены в верхнем горизонте коры – зоне мезозойского элювия. На основе минералого-геохимического изучения частиц металла предложена модель его накопления – суффозионно-гравитационная. При определенных условиях обогащенный золотом горизонт коры может иметь самостоятельное прикладное значение. В прошлые годы золотосодержащие площадные накопления («поддержниковые» россыпи) успешно отрабатывались старателями. При картировании свободного золота установлен широкий диапазон колебаний пробы (от низко- до высокопробного), свидетельствующий в пользу многостадийности процессов рудообразования на площади РРУ.

Выводы. Многолетний опыт геолого-геоморфологического, минералого-геохимического изучения РРУ Уральского региона апробирован практикой прогнозно-поисковых работ. Изложенные подходы, учитывающие тесную пространственную связь эндогенной и экзогенной золотоносности, рекомендуются к внедрению и дальнейшему совершенствованию.

Ключевые слова: золото, рудный узел, россыпи, эндогенный, экзогенный, кора выветривания.

Введение

Первомайско-Зверевский рудный узел располагается на восточном склоне Среднего Урала вблизи поселков Первомайское–Верхотурское. Представлен субмеридионально вытянутой рудоносной полосой протяженностью до 12 км при ширине 0,5–1,5 км. Многочисленные распространенные на территории золоторудные объекты отвечают золото-кварцевому, золото-полисульфидно-кварцевому типам. По масштабу это мелкие месторождения и многочисленные рудопроявления. В совокупности представляют единую рудоносную зону, контролируруемую региональной зоной дробления и рас-

полагающуюся исключительно в породах ультраосновного состава.

Рудовмещающими являются дайки и малые интрузии пестрого состава – от плагиосиенитов, плагиогранит-порфиров до сиенит-порфиров и гранодиоритов разнообразной формы (штоки, штокообразные тела, лакколлиты). Рудоносность установлена и в обрамлении интрузивных тел, где выявлены локальные зоны смятия и минерализации в породах дунит-гарцбургитовой формации. По результатам геолого-съёмочных, разведочных и эксплуатационных работ выявлены особенности строения рудного

*barfam1@mail.ru

узла. Установлено, что многочисленные изолированные интрузивные тела вытянуты в субмеридиональном направлении в виде своеобразной цепочки. В совокупности с комплексом разноориентированных даек эти массивы образуют единое крупное тело сложной формы, свидетельствующее о выполнении гранитоидным материалом зоны глубинного раздвига сложного строения (Г. Н. Кузовков, Д. В. Двоглаголов, Д. С. Вагшаль, 1987).

Ограниченные друг от друга и метасоматически измененные (березитизированные) интрузивные тела с комплексом даек содержат золото-полисульфидно-кварцевую минерализацию, отличающуюся особенностями состава и строения. Предложено подразделять оруденение на отдельные типы – Зверевский, Березового массива, Первомайский, Верхотурский, а также в лиственитизированных и оталькованных змеевиках [1]. Пространственно разобщенные участки распространения золотого оруденения отмеченных типов рассматриваются в ранге *самостоятельных рудных полей*.

Экзогенная золотоносность представлена двумя генетическими типами: а – элювиальными, элювиально-делювиальными площадными золотосодержащими накоплениями на выравненных участках минерализованных пород; б – делювиально-аллювиальными (ложковыми) россыпями, спускающимися с гипербазитового массива в восточном и юго-восточном направлениях. Возраст элювиальных накоплений «древний» (мезозойский), отвечающий эпохе формирования химических кор выветривания на Урале (I_{2-3} – K_{1-2}). Ложковые золотосодержащие отложения отвечают россыпям «ближнего сноса», проявляют тесную пространственную связь с выходами коренных золотосодержащих пород. Протяженность россыпей обычно составляет первые сотни метров при малой мощности рыхлых отложений (1–4 м). Возраст ложковых россыпей четвертичный (Q_{1-2}), возможно, и более древний (N_1^{2-3}). В прошлые времена россыпные объекты старателями были полностью отработаны. Они называли подобные россыпи «поддерниками», «ручейниками».

Геологическая изученность объекта. Начало золотодобычи в пределах рудоносной площади достоверно неизвестно. Скорее всего, это относится к 1822 г., когда обнаружили и приступили к освоению россыпей по речкам Мостовке и Адуй. Золотосодержащие кварцево-жильные тела стали разрабатываться значительно позже (в 1879 г.) в пределах Верхотурского массива (жилы Верх-Надеждинская, Михайловская, Воровская). В 1902 г. эксплуатационные работы начались на Зверевском месторождении. Они с перерывами продолжались до середины 1930-х гг. В годы Великой Отечественной войны работы остановились в связи с исключительно высоким притоком подземных вод в горные выработки (до 250–300 м³/сут.), что требовало больших энергозатрат.

Разведка отдельных участков рудного узла проводилась Е. Н. Монаховой и Н. В. Бутыриной (1933), Г. Д. Казаченко (1948), И. Т. Поплавским (1971). Поисковые работы на рудное золото выполнены в 1980-е гг. Восточно-Уральским отрядом УГСЭ (Г. А. Букрин и др., 1990). В выполнении этих работ и камеральной обработке материалов автор принимал участие, что отражено в публикациях (А. Г. Баранников, Г. А. Букрин, В. Н. Кузнецов и др., 1990, 1992). В рамках выполнения упомянутых работ объектом

детального изучения явился Верхотурский участок, расположенный в южной части рудного узла. На основе обобщения накопленных материалов (в том числе фондовых, опубликованных) и результатов исследований (минералого-геохимического картирования самородного золота) разработана модель накопления зерен золота в верхних горизонтах мезозойского элювия. С учетом генетической природы протекавших процессов модель предложено рассматривать как *суффозионно-гравитационную*. Положительные результаты использования модели в практике прогнозно-поисковых работ могут быть получены в тех случаях, когда в их основу положен принцип исследования пространственно-генетической связи полей развития эндогенной и экзогенной золотоносности.

В рамках настоящей публикации сделана попытка охарактеризовать *направленность развития рудообразующих процессов* в Первомайско-Зверевском рудном узле, начиная с раннего этапа формирования эндогенной золоторудной минерализации на площади узла и заканчивая рассмотрением обозначенной проблемы обоснованием механизма накопления свободного золота в зоне мезозойского элювия, а также в продуктах размыва этого горизонта россыпями ближнего сноса.

Геотектоническая позиция, магматизм

Согласно схеме геотектонического районирования Урала (1969), Первомайско-Зверевский узел располагается в пределах региональной структуры второго порядка – Сысертско-Ильменогорского мегантиклинория (Сысертско-Первомайского блока), граничащего на западе с Верхисетско-Петрокаменским блоком и на востоке с Мурзинско-Адуйским. Отмеченные структуры разделяют сложные по строению глубинные разломы: на западе – Верхисетский взброс, на востоке – Мурзинский сбросо-сдвиг (рис. 1). Разломы сближаются в северном направлении, образуя клиновидную структуру.

В объеме Сысертско-Ильменогорского мегантиклинория выделены структуры III–IV порядков: Первомайский синклиний, Монетнинско-Седельниковский антиклинорий и др. Характеризуя структурно-тектоническое строение района, авторы листа геологической карты (0-41-XXV) (Г. Н. Кузовков, Д. А. Двоглаголов, Д. С. Вагшаль, 1987) отмечают сложность и длительность проявленных на площади тектонических процессов, многоэтапный магматизм. Складчатые и разрывные нарушения сыграли важную роль в формировании и размещении эндогенной минерализации. Относительно узкие (10–20 км) и ограниченные разломами структурно-фациальные зоны высокого порядка в объеме Сысертско-Первомайского блока оказались металлогенически специализированы на ряд рудных полезных ископаемых. В их числе: на золото-сульфидно-кварцевый тип – Карасьевская антиклиналь с комплексом даек и малых интрузий; Шарташская брахиантиклиналь, включающая Березовское золоторудное месторождение; Благодатская антиклиналь с одноименным золото-сульфидно-кварцевым месторождением и рудопроявлениями шеелита, молибденита; Адуйская брахисинклираль, перспективная на кобальт-меднорудное оруденение.

Формирование золоторудной минерализации в Сысертско-Первомайском блоке тесно связано с процессами становления и развития магматизма.

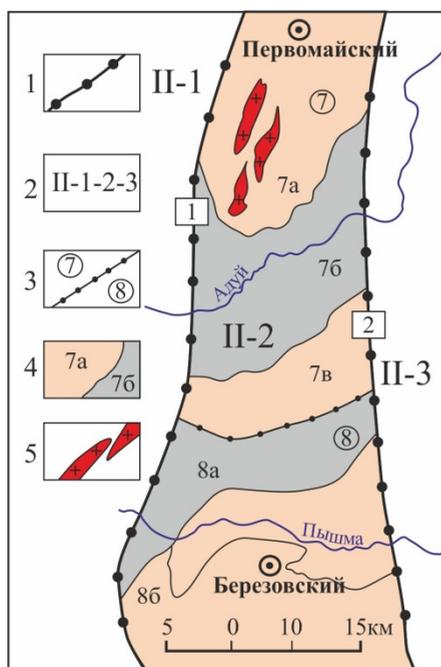


Рисунок 1. Тектоническая позиция Первомайско-Зверевско-го рудного узла (по Д. А. Двоглазову, 1987, с упрощением): 1 – глубинные разломы: Верхисетский взброс (1), Мурзинский сбросо-сдвиг (2); 2 – структуры второго порядка (блоки): II-1 – Верхисетско-Петрокамский, II-2 – Сысертско-Первомайский, II-3 – Мурзинско-Адуйский; 3 – структуры третьего порядка: 7 – Первомайский синклиорий, 8 – Монеткинско-Седельниковский антиклиорий; 4 – структуры четвертого порядка: 7a – Карасьевская антиклиналь, 7б – Адуйская синклираль, 7с – Благодатская антиклиналь, 8a – Октябрьская грабен-синклираль, 8б – Шарташская брахиантиклиналь; 5 – Первомайский комплекс даек и малых интрузий

Figure 1. Tectonic position of the Pervomaisko-Zverevsky ore cluster (according to D. A. Dvoeglazov, 1987, with simplification): 1 – deep faults: Verkhisetsky reverse fault (1), Murzinsky fault-slip (2); 2 – structures of the second order (blocks): II-1 – Verkhisetsko-Petrokamensky, II-2 – Sysert-Pervomaisky, II-3 – Murzinsko-Aduysky; 3 – structures of the third order: 7 – Pervomaisky synclinorium, 8 – Monetkinsko-Sedelnikovskiy anticlinorium; 4 – structures of the fourth order: 7a – Karasevskaya anticline, 7b – Aduysky synclinal, 7c – Blagodatskaya anticline, 8a – Oktyabrskaya graben-syncline, 8b – Shar-tashskaya brachianticline; 5 – Pervomaisky complex of dikes and small intrusions

Поля развития даек и малых интрузий средне-позднекаменноугольного возраста целиком располагаются в ультрабазитах дунит-гарцбургитовой формации. Основная часть рудовмещающих даек рудного узла приходится на площадь *Первомайского массива* (S_1). Это наиболее крупный в районе массив ультраосновных пород. В плане представляет овально вытянутое в меридиональном направлении тело на расстояние более 20 км при ширине 3,5–7,5 км. По геолого-геофизическим данным рассматривается как пластообразная залежь мощностью 0,5–1,2 км, полого погружающаяся на запад с постепенным выклиниванием по падению. Природа залежи протрузивная, пространственно связанная с Верхисетским глубинным разломом. По мнению Д. А. Двоглазова (1987), пластина ультраосновных пород оказалась перемещенной на восток на коллизионном этапе развития структуры, заняв субгоризонтальное положение. Морфология контактов массива с вмещающими породами относительно простая.

Контакты несут следы тектонических перемещений. Здесь отмечены рассланцевание пород, оталькование, хлоритизация. По периферии массива развиты габбровые породы. Они рассматриваются как кровля крупного интрузивного тела.

Породы дунит-гарцбургитовой ассоциации в той или иной степени серпентинизированы. Установлено (Г. А. Букрин и др., 1990), что в нижней части пластообразного тела присутствуют наиболее высокотемпературные антигоритовые серпентиниты (развитые на Зверевском месторождении). Более высокое положение в разрезе занимают лизардитовые разновидности (характерные для Первомайского месторождения). По тектоническим нарушениям в породах массива и контактовых частях гранитоидных даек развиты метасоматиты (процессы лиственитизации, хлоритизации, оталькования, аргиллизации).

Ранее отмечалось, что золотое оруденение в рудном узле пространственно связано с породами *гранитоидных формаций*, входящих в ассоциацию, сопоставляемую с Верхисетским и Первомайским магматическими комплексами [2].

Породы *Верхисетского комплекса* отнесены к тоналит-гранодиоритовой формации (D_3-C_1). Сформировались в четыре интрузивные фазы. К I–II фазам отнесены кварцевые диориты (D_3-C_1), к III–IV фазам – адамеллиты, гранит-порфиры, аляскиты (C_{2-3v}). С породами комплекса связано оруденение и на соседних площадях: золото-кварцевое (Верхисетский массив); молибден-кварцевое, шеелит-кварцевое (Кедровский массив). В породах тоналит-гранодиоритового состава Верхотурского массива установлена золотоносность.

Породы *Первомайского комплекса* отнесены к щелочно-гранитной формации. Этот комплекс сопоставлен с дайками Березовского комплекса (детально изученного на одноименном месторождении). Возраст пород средне-позднекаменноугольный (C_{2-3v}), возможно, и более молодой – позднепермский (P_2) (М. С. Рапопорт, 1981).

Отмеченные породы имеют гипабиссальный облик. Распространены преимущественно в ядерной части ультрабазитового тела, где траассируют зоны повышенной проницаемости. Форма тел в плане и морфология их контактов сложные, поверхности контактов как крутые, так и пологие. Имеют калий-натриевый состав. Сформировались в две интрузивные фазы. Ранняя малокалиевая группа представлена плагиосиенитами, плагиосиенит-порфирами; поздняя высококалиевая включает граносиениты, граносиенит-порфиры, сиенит-порфиры. Оруденение золото-полисульфидно-кварцевого типа преимущественно связано с породами ранней фазы.

Характеристика объектов исследования

Площади развития золото-полисульфидно-кварцевых жил, связанных с малыми интрузиями и дайками щелочно-гранитной формации, подразделены на отдельные пространственно разобщенные рудные поля: Зверевское (жилы Храпунчик, Зверевское), Березовый увал, Первомайское (жилы Троицких даек и лога Узкого), Верхотурское (жилы Верх-Надеждинская, Воровская, Верхотурская), а также в лиственитизированных, оталькованных змеевиках (жилы Михайловская, Васильевская и др.), рис. 2. Южнее, в пределах той же рудоносной полосы,

известны золотосодержащие кварцевые жилы на Чудском массиве, Карасьевском участке.

Выявленное в пределах участков золотое оруденение в березитизированных дайках может быть отнесено к «лестничному» типу [1]. Так, на Зверевском участке в дайках меридионального направления прожилки кварца имеют широтное простирание (азимут 40° – 50° – 70°), а в широтных – меридиональное (азимут 345°). Форма жил неправильная, усложненная изгибами по простиранию и падению, разветвленная. Структура жил, прожилков в интрузивных залежах и штокообразных телах относится к веерообразному типу или представлена сложной сетью взаимно перпендикулярных направлений (азимуты 300 – 345° и 40 – 70°).

На восточном фланге Верхотурского участка в лиственизитированных и оталькованных змеевиках известны жилы Михайловская, Васильевская, отработавшиеся до глубины 35–40 м. По облику, окраске вмещающих пород они близки к «красичным» жилам Березовского месторождения. Простирание жил 330 – 10° с крутым до 70 – 75° падением на юго-запад. Длина их не превышает 100 м, мощность колеблется от 0,15 до 0,65 м, в зальбандах 0,15–0,20 м. Сложены жилы серовато-белым кварцем, местами сильнопористым. Встречаются участки брекчированной руды, состоящей из обломков серовато-белого полупрозрачного кварца, сцементированного серым ноздреватым, обохренным кварцем второй генерации. Распределение золота в рудных телах неравномерное. Жилы этого типа являлись наиболее богатыми в рудном поле.

В 2015–2016 гг. партий АО «Полиметалл» проведены геологоразведочные работы на площади юго-восточного обрамления Верхотурского гранодиоритового массива. Выявлено, разведано и оценено месторождение Анна золото-полисульфидно-кварцевого типа, приуроченное к субмеридиональной зоне смятия и метасоматически измененных пород в объеме дунит-гарцбургитового массива [3]. В подготовленной публикации авторы обосновывают вертикальное зональное строение рудного тела, имеющего локальные размеры (40 м по простиранию и 80–90 м по падению при средней мощности чуть более 8 м). Верхняя зона рудного тела (20 м) представлена рыхлыми рыжевато-коричневыми породами (близкими по облику к «красичным жилам») при среднем содержании золота 3,34 г/т. В настоящее время ведется промышленное освоение месторождения.

Одной из особенностей оруденения, связанного с дайками и малыми интрузивными телами щелочно-гранитной формации, является *крайне неравномерное* и даже *кустовое распределение* золота в кварцево-жилных телах. Показательным является Зверевское месторождение, где встречались рядом кусты золота до 20 кг на 10 м^2 и почти пустые участки (Н. М. Трушков, 1934). Очевидно, что высокая изменчивость содержаний золота в рудных телах усложняет их разведку, определяет необходимость совмещения разведки с эксплуатацией месторождения (как это и осуществлялось при старательской отработке золотосодержащих объектов).

Вещественный состав золоторудных кварцево-жилных тел отражен в фондовых и опубликованных источниках [1, 2]. Эти сведения получили под-

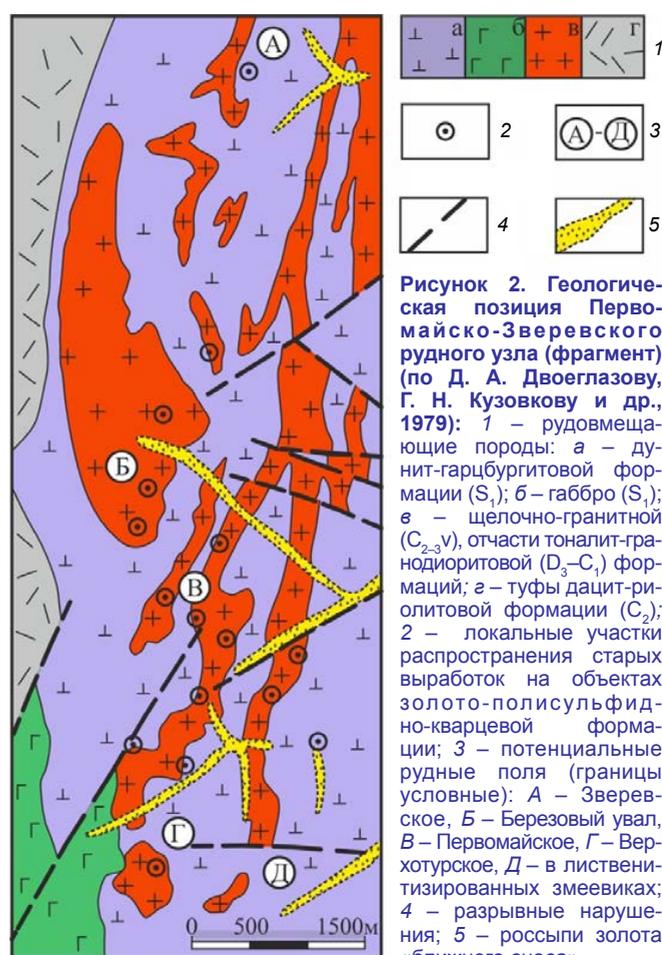


Figure 2. Geological position of the Pervomaisko-Zverevsky ore cluster (fragment) (according to D. A. Dvoeglazov, G. N. Kuzovkov et al., 1979): 1 – ore-bearing rocks: a – dunite-harzburgite formation (S_1); b – gabbro (S_1); c – alkaline-granite (C_{2-3V}), partly tonalite-granodiorite (D_3-C_1) formations; d – tuffs of the dacite-rhyolite formation (C_2); 2 – local areas of distribution of old workings on objects of gold-polysulfide-quartz formation; 3 – potential ore fields (conditional boundaries): A – Zverevskoye, B – Berezovoy ridge, C – Pervomaiskoye, D – Verkhoturskoye, E – in listvenitized coils; 4 – discontinuous disturbances; 5 – placers of gold “near demolition”

тверждение при опробовании отвалов старых горных выработок в пределах рудных полей узла (А. Г. Баранников и др., 1981).

В числе ведущих рудных минералов в золотоносных золотокварцевых телах установлены: пирит, халькопирит, галенит, сфалерит, блеклые руды, редко шеелит, арсенопирит, антимонит. Среди гипергенных: лимонит, церуссит, англезит, пироморфит, крокоит, ковеллин, валентинит и др. В изученных пробах из отвалов шурфов установлено: в жиле Храпунчик (5 проб, обн. 225) преобладание пирита 20–70 %, присутствие галенита (от зн. до 30 %) в виде отдельных знаков – арсенопирит, халькопирит, реже – антимонит, шеелит, ксенотим, муассанит; из гипергенных (знаки) – лимонит, крокоит, пироморфит, англезит, церуссит, ковеллин. В других жилах рудного узла (Зверевское месторождение – 9 проб, обн. 228/1-4, 229, 231/1-8; Первомайское – 3 пробы, обн. 232, 237, 242) установлен аналогичный минеральный состав. Близкие результаты получены и при изучении протоколов по Верхотурскому месторождению (4 пробы, обн. 239/2-4, 240/4-5). Помимо

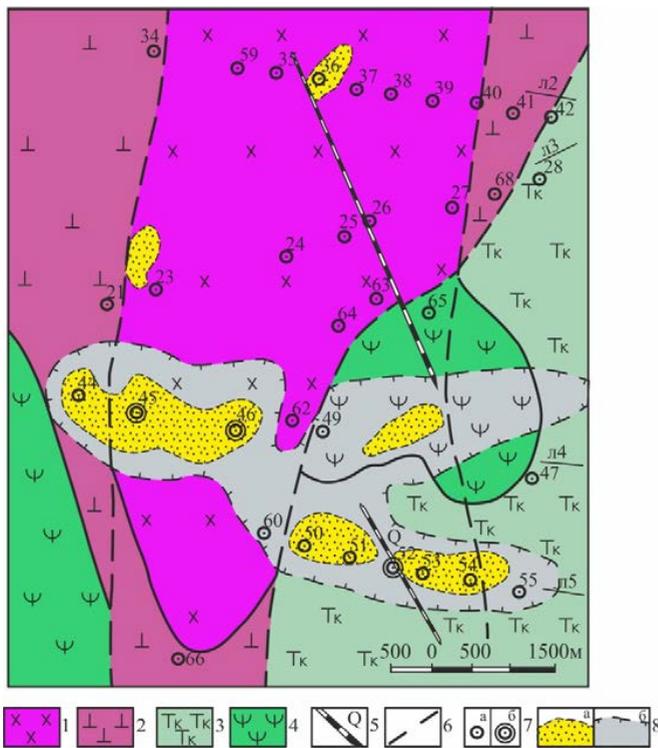


Рисунок 3. Геологический план Верхотурского участка (фрагмент), по Г. В. Букрину, В. Н. Кузнецову и др., 1990: 1 – гранодиориты; 2 – дуниты; гарцбургиты; 3 – тальк-карбонатные породы; 4 – лиственитизированные дуниты, гарцбургиты; 5 – золото-сульфидно-кварцевые жилы; 6 – тектонические нарушения; 7 – поисковые скважины, их номера (а); скважины, в которых изучался минеральный состав кор выветривания (б); 8 – локальные участки распространения в зоне мезозойского элювия самородного золота: а – низкой пробы (менее 700 ‰), б – относительно низкой (700–800 ‰)

Figure 3. Geological plan of the Verkhoturysky area (fragment), according to G. V. Bukrin, V. N. Kuznetsov et al., 1990: 1 – granodiorites; 2 – dunites; harzburgites; 3 – talc-carbonate rocks; 4 – listvenitized dunites, harzburgites; 5 – gold-sulfide-quartz veins; 6 – tectonic disturbances; 7 – exploratory wells, their numbers (a); wells in which the mineral composition of weathering crusts was studied (b); 8 – local areas of distribution of native gold in the Mesozoic eluvium zone: a – low fineness (less than 700‰), b – relatively low (700–800‰)

упомянутых минералов также отмечены (в количестве знаков) сфалерит, валентинит.

Приведенные сведения о минеральном составе золото-содержащих руд, результаты микроскопического изучения рудных образцов в отраженном свете позволяют сопоставлять оруденение Первомайско-Зверевского узла с золото-полиметаллическим минеральным типом золото-полисульфидно-кварцевой формации.

Опробование вмещающих жил метасоматически измененных пород на упомянутых объектах показало, что содержание золота в них колеблется в широком диапазоне – от 0,01 г/т до 1,00 г/т. Среднее содержание (по данным 18 проб) составило 0,14 г/т. В выделенном сульфидном концентрате содержание изменяется (по данным 6 проб) от 0,934 до 53,100 г/т, в среднем составляя 16,68 г/т.

Самородное золото, извлеченное из протолок золото-полисульфидно-кварцевых жил, имеет преимущественно объемный облик (комковидно-гнездовая, комковидно-угловатая формы выделений). Проба коле-

блется в пределах от 746 до 996 ‰, в среднем (по данным 11 определений) составляя 856 ‰. Микроанализ золотин, выполненный на рентгеновском микроанализаторе УХА-5, показал высокую чистоту металла; присутствуют лишь серебро (7–15 %) и медь (0,17–0,85 %).

В условиях континентального режима мезозоя (поздняя юра–мел) оруденелые породы претерпели глубокие преобразования. Сформировавшиеся химические коры выветривания мезозойской эпохи имеют площадное распространение. Сохранившаяся мощность кор колеблется в широких пределах, что во многом определяется тектонической подвижностью отдельных блоков земной коры в мезозое–кайнозое. Лучшая сохранность кор выветривания свойственна площадям, располагающимся в пределах «откопанного» Зауральского пенеплена, отчасти – в пределах Остаточных гор восточного склона Урала. Первомайско-Зверевский рудный узел находится на границе этих двух геоморфологических районов.

Объектом углубленного изучения явился Верхотурский участок, на площади которого элювиальные образования мезозоя развиты широко. Зерна самородного золота, высвободившиеся при выветривании золото-содержащих минерализованных пород, перешли в свободное состояние. При этом появилась возможность их перемещения по вертикали, дифференциации по форме и гидравлической крупности золотин. Возникли предпосылки для накопления золота в россыпях: элювиальных, элювиально-делювиальных, делювиально-аллювиальных (ложковых).

Верхотурский участок, его рудоносность. При проведении на участке поисковых работ (Г. А. Букрин и др., 1987–1990) дана оценка его золотоносности. Работы включали: проходку колонковых скважин глубиной до 100 м по сети 50(100) × 150(250) м; маршрутное обследование площади по сети 50 × 100 м; проходку отдельных шурфов, канав, закопшек; опробование керна на золото, серебро; промывку рыхлого материала (из кор выветривания); минералогический анализ шлихов; изучение выделенного самородного золота и другие исследования. Собранный при этом материал позволил уточнить геологическое строение участка, произвести оценку его золотоносности.

Геологическое строение. Оруденение золото-полисульфидно-кварцевой формации приурочено к небольшому по размеру (0,5 × 0,8 км) массиву гранодиоритов (D₁-C₁). По материалам поисковых работ в восточной эндоконтактной зоне массива выявлен линейный субштокверк, представленный системой разноориентированных маломощных (1–2 см, редко более) кварцевых прожилков. С ними связана небогатая (первые проценты) сульфидная минерализация. Общий уровень золотоносности пород невысок и отвечает близрудному уровню концентрации с отдельными интервалами, соответствующими минимально-промышленному содержанию для объектов подобного типа (рис. 3).

Рудовмещающие гранодиориты, как и породы обрамления дунит-гарцбургитовой формации, претерпели метасоматические изменения (пропилитизация, березитизация, лиственитизация, аргиллизация).

Пропилиты установлены в восточной и северо-восточной периферии массива. Изменения выражаются в

частичном замещении темноцветных минералов хлоритом, эпидотом, появлении сосюрита по плагиоклазу. Золотоносность связана с более поздним процессом березитизации, что выражается в серицитизации плагиоклаза, мусковитизации биотита. По интенсивности березиты подразделены на три типа. Наиболее характерен и продуктивен средний уровень березитизации. С завершающими стадиями формирования штокверка связана аргиллизация. Продукты низкотемпературного метасоматоза установлены в отдельных локальных участках площади, а также в пределах зоны субширотной ориентировки в южной части массива (рис. 3).

Как показали исследования, рассредоточенное в отдельных интервалах разреза эндогенное золотое оруденение в ранге возможного промышленного объекта в настоящее время не рассматривается. Попытки его освоения с использованием технологии подземного выщелачивания (на примере одного из выделенных блоков) оказались неэффективными. В то же время выявленные при опробовании скважин и глубоких шурфов повышенные концентрации зерен свободного металла (на уровне первых и десятков граммов на 1 м^3) в верхних горизонтах мезозойского элювия (до глубин 8–10 м) позволяют положительно оценивать потенциал золотоносности этой части разреза. Сконцентрированное в верхних горизонтах элювия золото может быть извлечено с использованием комплексной технологии: а – выделение свободного золота при промывке породы; б – извлечение тонкого и связанного золота из хвостов промывки с использованием сорбционного выщелачивания (о чем подробнее сказано далее).

Коры выветривания, их вещественный состав, рудоносность. Как уже упоминалось, минерализованные породы претерпели в юрско-меловое время существенные преобразования. Коры выветривания на участке имеют площадное распространение. По данным буровых работ (36 скважин глубиной до 100 м), установленная мощность зоны мезозойского элювия колеблется от 5 до 100 м и более, в среднем составляя несколько десятков метров. Значительный диапазон колебаний мощности объясняется петрографическими особенностями пород, их раздробленностью, тектонической мобильностью отдельных блоков, а также воздействием на коры более поздних наложенных низкотемпературных гидротермально-метасоматических процессов. Подтверждением сказанному является отсутствие в разрезе «глинизированных» пород отчетливо проявленной вертикальной гипергенной зональности, свойственной *остаточным корам выветривания*. Есть основания рассматривать глинистые, дресвяно-глинистые, щебнисто-дресвяно-глинистые образования не как составные части единого зонального химического профиля коры, а как элементы сложной по составу и строению *наложенной* (преобразованной) *коры выветривания*. О возможной природе подобных глинистых продуктов на Урале упоминал А. П. Сигов, рассматривая их как результат позднейшей химической переработки первичной коры [4, 5].

В отечественной и мировой литературе подробно обсуждается вопрос, базирующийся на изучении *профилей кор выветривания латеритного типа* в Австралии, Бразилии, Африке, Юго-Восточной Азии, поведении в них

золота. Результатом исследований явилось обоснование высокой подвижности золота в корях подобного типа [6–8]. В то же время широко распространенные в пределах Уральского региона *каолиновые коры сиаллитного типа* характеризуются уже иной подвижностью металла. При определенных условиях в породах, содержащих золото-теллуридную, золото-сурьмяную и иную минерализацию, образуется гипергенное, новообразованное золото в виде мелкокристаллических пленочных выделений, друзовидных и иных агрегатов. Однако общий масштаб гипергенного золотого рудогенеза при этом оказывается несопоставимым по масштабу с латеритной моделью [9–11].

Сложное и неоднородное строение профиля коры выветривания на площади Верхотурского массива, отсутствие отчетливо проявленной гипергенной зональности находят подтверждение и при полуколичественном минералогическом анализе тяжелой фракции шлихов, отобранных из различных горизонтов разреза кор, а также из элювиального материала шурфов, отвалов старых выработок. Изучение шлихов выполнено Е. Ю. Осининой (ЦЛ ПО «Уралгеология»). При обобщении результатов для оценки интенсивности процессов выветривания рассчитывался *палеогеографический коэффициент* $K_{\text{п}}$, представляющий отношение устойчивых к выветриванию минералов к сумме неустойчивых. Этот коэффициент широко используется в практике палеогеоморфологических исследований на Урале и возрастной систематизации древних континентальных отложений. Есть возможность применения $K_{\text{п}}$ и при изучении химических кор выветривания. При выполнении расчетов следует иметь в виду, что индикаторное значение в пробах будет иметь не количественное присутствие минералов двух обозначенных групп (% , $\text{кг}/\text{м}^3$), а их соотношение.

На основе приведенных далее сведений по шлиховым ассоциациям в скважинах 45, 46, 52 (рис. 3, 4) закономерного изменения $K_{\text{п}}$ с глубиной в профиле кор выветривания (по гранодиоритам, тальк-карбонатно-окремненным породам) в сторону уменьшения не наблюдается.

В **скв. 45** (л 4) на глубинах 7 и 8 м развиты *глинисто-песчаные коры выветривания по гранодиоритам*. Выход тяжелой фракции шлиха в пробах низкий ($0,045\text{--}0,067 \text{ кг}/\text{м}^3$), выявленная золотоносность 200 и $125 \text{ мг}/\text{м}^3$. Процентное соотношение устойчивых минералов (ильменита, хромита, магнетита мартитизированного) к неустойчивым (эпидоту, амфиболам, пироксену, сфену) составляет 1,41. В расчет $K_{\text{п}}$ не входят присутствующие в пробах аутигенные (гипергенно новообразованные) минералы (псевдоморфозы лимонита по пириту, гидроксиды железа, гематит и др.), в сумме составляющие не более 6–8 % шлиха, а также в количестве отдельных знаков рудные минералы (пирит, галенит, крокоит, пироморфит, золото). На глубине 44 м установлено присутствие *глинистых кор*, сформировавшихся по березитизированным породам с прожилками кварца. Соотношение в пробе упомянутых минералов не изменилось ($K_{\text{п}}$ равно 1,04, золото в пробе отсутствует).

В **скв. 46** (л 4) изучены пробы из *дресвяно-глинистых кор* с глубин 26 и 31 м. Выход шлиха низкий ($0,025\text{--}0,080 \text{ кг}/\text{м}^3$). Рассчитанный палеогеографический коэффициент равен 2,4 (глубина 26 м, содержание золота

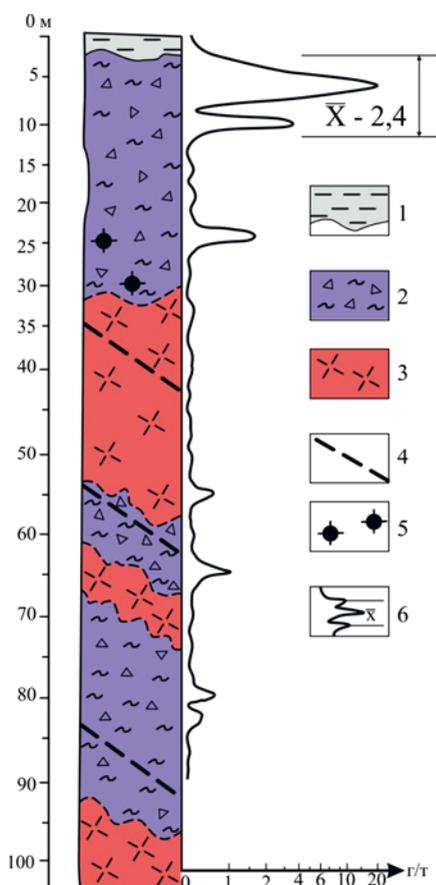


Рисунок 4. Распределение золота в профиле коры выветривания на Верхотурском участке (скв. 46, линия 4) (по Г. А. Букрину и др., 1990): 1 – покровные образования; 2 – дресвяно-глинистые, глинистые коры выветривания по гранодиоритам; 3 – гранодиориты, участками березитизированные; 4 – зоны разломов; 5 – места отбора проб на полуколичественный минералогический анализ; 6 – результаты опробования керна на золото; среднее содержание \bar{x} в выделенном интервале

Figure 4. Distribution of gold in the profile of the weathering crust in the Verkhotursky area (well 46, line 4) (according to G. A. Bukrin et al., 1990): 1 – cover formations; 2 – grass-clayey, clayey weathering crusts after granodiorites; 3 – granodiorites, locally beresitized; 4 – fault zones; 5 – sampling sites for semi-quantitative mineralogical analysis; 6 – results of core testing for gold; average content \bar{x} in the selected interval

2067 мг/м³) и 3,9 (глубина 31 м, содержание золота 10 мг/м³).

Несколько иное соотношение отмеченных минеральных ассоциаций установлено в глинисто-дресвяно-щебнистых корах, сформированных по тальк-карбонатным породам. Выход шлиха в пробах из скв. 52 (л 5) с глубин 8–20–35 м более высокий – от 0,113 до 0,310 кг/м³, содержание золота изменяется от знаков до 2150 мг/м³. На глубине 43 м в песчано-щебнистых корах выход шлиха возрос до 1,0 кг/м³ при содержании золота 400 мг/м³. На глубине 8 м (в верхней части элювия) сумма устойчивых к выветриванию минералов составила около 74 %, а сумма неустойчивых 7,05 %. Значение $K_{\text{п}}$ равно 10,2. На глубине 20 м это соотношение снизилось до 5,07, но резко возросло до 85 на глубине 35 м. В песчано-щебнистых корах на глубине 43 м значение $K_{\text{п}}$ оказалось равным 26,0.

Обобщая приведенные сведения, отметим: а) отчетливой зависимости между составом тяжелой фракции шлиховых проб из кор выветривания и уровнем их золотоносности не наблюдается; б) результаты опробования пород на золото (пробирный анализ, промывка породы с выделением и взвешиванием свободного золота) указывают, что во вскрытом разрезе кор зона вторичного золото-сульфидного обогащения отсутствует; в) наиболее значительные концентрации свободного металла установлены в верхних горизонтах мезозойского элювия (от поверхности до глубины 6–8–10 м). Сказанное подтверждают результаты изучения технологической пробы, а также некоторые типоморфные особенности самородного золота.

Технологическая проба отобрана из шурфа 18 (л 4). Представлена золотосодержащей алевритисто-глинистой корой выветривания, содержащей щебень березитизированных гранодиоритов и обломков кварца с окисленными сульфидами. Изучение пробы выполнено в лаборатории обогащения ЦЛ «Уралгеология» (С. Н. Грунтовская и др., 1990 г.). Содержание золота в пробе (атомно-абсорбционный метод) составило 2,31 г/т, серебра 2,88 г/т. Химический состав окисленной руды: SiO₂ – 70,08 %, Al₂O₃ – 17,39 %, K₂O – 5,87 %, Fe_{общ.} – 1,86 %, Fe₂O₃ – 1,53 %. На остальные химические элементы приходится десятые доли процента (Ti, BaO, S_{общ.}, MgO) и сотые доли (CaO, P₂O₅, Cu, MnO и др.). Проба самородного золота 633,6 ‰ (атомно-абсорбционный метод). Минеральный состав: кварц – 25 %, полевой шпат – 35 %, каолинит, монтмориллонит – 20 %, гидрослюда – 15 %, рудные минералы – гематит, магнетит, золото.

Фазовый анализ золотосодержащей руды показал, что на свободное золото и находящееся в сростках с породой приходится 95,67 % (что и определяет высокий россыпеобразующий потенциал руды); на остальное золото (связанное с сульфидами, покрытое пленкой и др.) – 4,33 %. При исследовании гравитационного концентрата установлено присутствие зерен крупного металла (класс +2,0 мм). Преобладающий размер золотинок приходится на класс от 0,04 до 0,25 мм. При обосновании схемы переработки золотосодержащей породы установлено, что при обогащении на концентрационном столе (СКЛ-2) и гидроциклоне (кГЦ) извлечение золота составит 90,35 % и серебра (21,71 %). После сорбционного выщелачивания цианистым натрием хвостов гравитации извлечение золота возрастает до 97,81 %.

Минералого-геохимическая характеристика самородного золота. Металл получен при промывке «глинизированных» пород (глинистых, дресвяно-глинистых, глинисто-дресвяно-щебнистых кор выветривания) в 36 поисковых скважинах и из верхних горизонтов элювия (шурфов, канав, отвалов старательских выработок). Изучено 314 проб (2625 золотинок) из различных горизонтов разреза.

Описание самородного золота на морфометрической основе предусматривало: определение для каждой золотины ее размерных параметров (длины, ширины, толщины) с последующим расчетом коэффициентов формы (уплощенности, удлиненности), гидравлической крупности зерен и иных особенностей металла [12, 13]; массовое

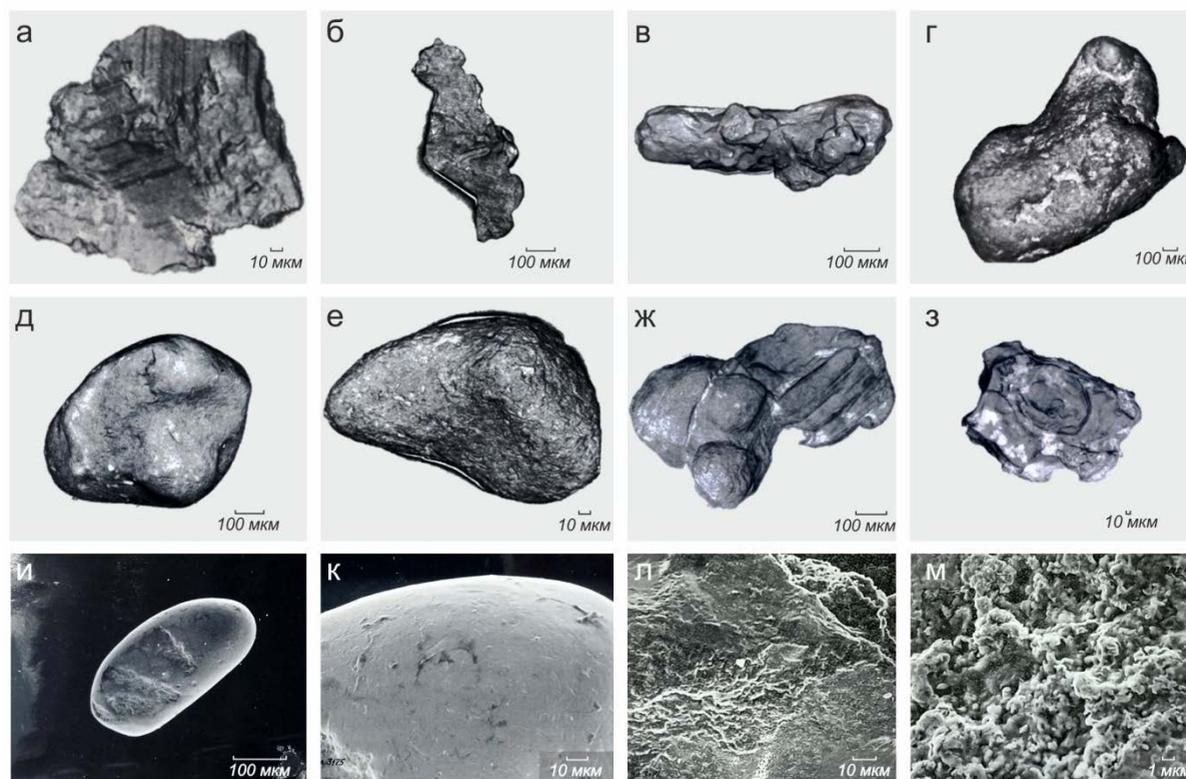


Рисунок 5. Морфологические разновидности самородного золота из кор выветривания Верхотурского участка: а – ступенчатый микрорельеф поверхности золота на контакте с кварцем; б, в – характер формы и поверхности идиоморфных зерен из зоны элювия; г – золотины из верхних горизонтов элювия псевдоокатанного облика; д, е – золотины «оплавленного» облика с тонкошагреновой поверхностью; ж – сростки золотины идиоморфного облика с признаками «оплавленности»; з – зерно золота зонального строения в сростании с кварцем; и – золото с идеально гладкой («леденцовой») поверхностью; к – то же (фрагмент); л – гипергенное золото в виде пленки с ямчато-бугорчатым микрорельефом; м – то же (фрагмент)

Figure 5. Morphological varieties of native gold from the weathering crusts of the Verkhoturys area: a – stepped microrelief of the gold surface at the contact with quartz; b, c – nature of the shape and surface of euhedral grains from the eluvium zone; d – gold grain from the upper horizons of the eluvium of a pseudo-rounded appearance; e, f – “melted” gold particles with a finely shagreen surface; g – intergrowths of euhedral gold particles with signs of “melting”; h – gold grain of zonal structure intergrown with quartz; i – gold with a perfectly smooth (“candy”) surface; k – the same (fragment); l – supergene gold in the form of a film with a pit-tuberous microrelief; m – the same (fragment)

определение пробности золотинок, отличающихся цветовыми оттенками, с использованием атомно-абсорбционного метода (250 проб) и рентгеноспектрального (42 пробы).

Собранные минералого-геохимические и цифровые данные, отвечающие условиям массовости и регулярности наблюдений, позволили выполнить минералогическое картирование зерен золота по размеру, уровню содержания, значениям гидравлической крупности и пробности для двух «рудовмещающих» горизонтов – элювиальных, элювиально-делювиальных площадных накоплений и химических (преобразованных) кор выветривания по минерализованным породам (для разных условных уровней среза). Полученные результаты взяты за основу для обоснования процессов дифференциации свободного золота в рыхлых толщах; разработки принципиальной модели накопления металла в верхних горизонтах мезозойского элювия; определения возможного уровня денудационного среза минерализованных пород на мезозойско-кайнозойском этапе; обоснования стадийности процессов рудообразования и рассмотрения других актуальных геолого-генетических вопросов.

В зоне элювия установлено золото нескольких морфолого-генетических типов: 1 – остаточное золоторудного облика, высвободившееся от сростков (с кварцем,

сульфидами) при химическом выветривании пород; 2 – механически и гипергенно-преобразованное остаточное золото, испытавшее обминание, загиб и развальцевание выступов при просадке зерен в рыхлой толще элювия; 3 – золото «оплавленного» облика из верхних горизонтов элювия; 4 – гипергенное (новообразованное) золото.

Кроме перечисленных типов в объеме минерализованных пород встречены мелкие золотины рудного облика, отличающиеся аномально светло-желтым цветом и относительно «свежим» (не окисленным) видом. Изучение пробности этих зерен показало, что металл соответствует как относительно низкопробному, так и низкопробному золоту.

Приведем характеристику металла.

Остаточное золото золоторудного облика присутствует в двух изученных горизонтах: элювиальных, элювиально-делювиальных накоплениях и площадных химических корах выветривания. Кристаллизация золота происходила в полостях, трещинных зонах кварца (белого, молочно-белого цвета), позднее нередко ожелезненного. Отмечена корродированность кварца на границе с выделениями золотинок, что свидетельствует в пользу его опережающего растворения. Характерно обилие плоскостей, отвечающих граням контактирующих с золотом минера-

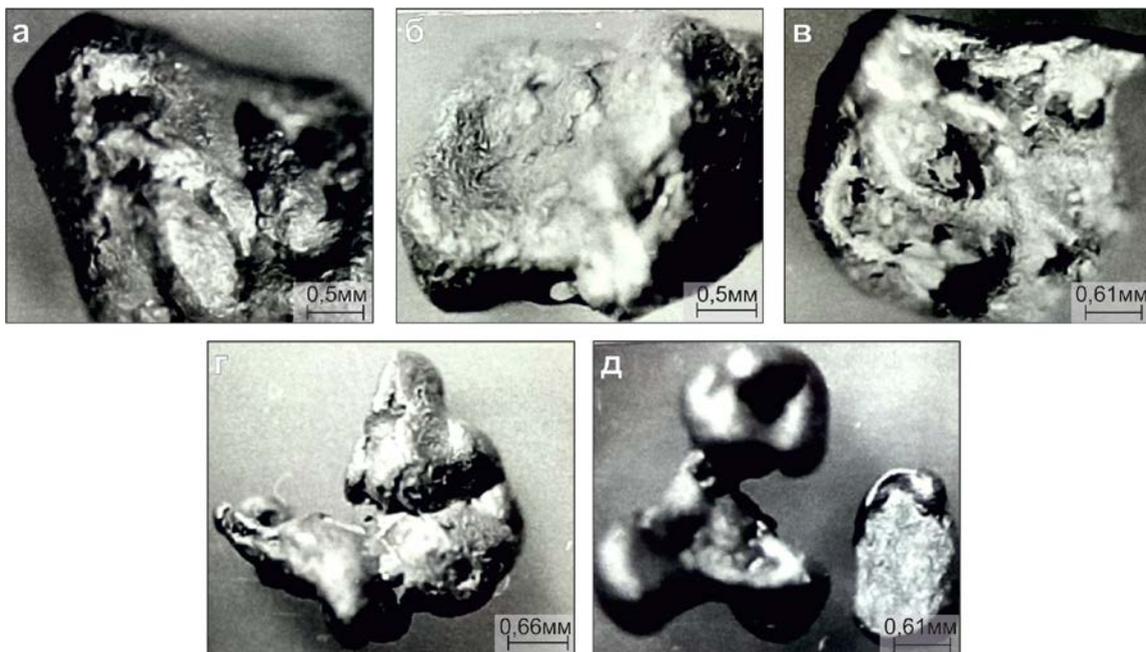


Рисунок 6. Крупные зерна самородного золота из зоны мезозойского элювия Верхотурского участка: а, б – зерно уплощенно-комковидной формы массой 184,2 мг; края загнуты, развальцованы; в кавернах остатки кварца; поверхность шагреновая; в – зерно уплощенно-комковидной формы массой 141,9 мг с остатками ожелезненного кварца; г – золотины сложной формы массой 56,8 мг с остатками кварца; д – группа крупных золотин «оплавленного» облика с тонкошагреновой поверхностью; отмечены загиб и развальцовка краев

Figure 6. Large grains of native gold from the zone of the Mesozoic eluvium of the Verkhoturye area: a, b – grain of a flattened-lumpy shape weighing 184,2 mg; the edges are bent, flared; remains of quartz in caverns; shagreen surface; c – flattened-lumpy-shaped grain weighing 141,9 mg with remains of ferruginous quartz; d – complex-shaped gold ore, weighing 56.8 mg, with quartz remains; e – a group of large gold particles of a "melted" appearance with a finely shagreen surface; marked bend and flaring of the edges

лов (кварца, сульфидов, карбонатов, слюд). Ступенчатый микрорельеф контактовой поверхности золота с кварцем наблюдается на многочисленных зернах (рис. 5, а). По морфологии свободное золото преимущественно объемной формы. Представлено комковидно-угловатыми, комковидно-гнездовыми, отчасти идиоморфными, гемиидиоморфными разновидностями (рис. 5, б, в). Уплотненные золотины прожилково-чешуйчатой, прожилково-пленочной и иной формы присутствуют в подчиненном количестве. На остальные морфологические разновидности (брусковидные, друзовидно-каркасные, проволоковидные и др.) приходится несколько процентов.

По крупности изученный металл отвечает среднему (-2,0+1,0 мм) и мелкому (-1,00+0,10 мм) классам. В зоне элювия отмечено присутствие крупных золотин и даже мелких самородков (рис. 6, а–д).

Преобразованное остаточное золото присутствует в верхних горизонтах коры выветривания совместно с зернами типично рудного облика. Является своеобразным «пришельцем», поступившим в зону элювия из верхней, уже эродированной части профиля коры. Отличается характерным обликом («псевдоокатанностью») и своеобразной тонкошагреновой поверхностью (рис. 5, г–е). «Псевдоокатанность» зерен, не испытавших значительного горизонтального перемещения, рассматривается как результат: а – механического обминания освободившихся при выветривании золотин (вследствие многоэтапного денудационного снижения минерализованных пород); б – активного гипергенного преобразования поверхности зо-

лотин на длительном этапе их пребывания в агрессивной среде. Следствием сказанного является формирование тонкошагренового и ямчато-бугорчатого микрорельефа, а также химическое переотложение золота (появление почковидных, остроугольно выступающих образований), рис. 5, ж. О гипергенном преобразовании поверхности также свидетельствует их обохренность, присутствие кремнисто-железистых пленок.

Золото «оплавленного» облика с абсолютно гладкой («леденцовой») поверхностью, не имеющее признаков более позднего гипергенного преобразования поверхности (рис. 5, и, к), встречено в верхних горизонтах элювия. Как показали исследования [14], появление тонкой пленки низкопробного золота, нарощенной на поверхности золотин с уже сформированной гипергенной высокопробной каймой, может быть связано с проявлениями в зоне элювия более поздних наложенных гидротермально-метасоматических процессов. Признаки термального воздействия на золотины, находившиеся в верхних горизонтах профиля кор выветривания, также проявились в виде сглаженных выступов и скульптур роста зерен; формировании дезинтегрированных агрегатов золотин; появлении по периферии золотин зон с признаками диффузионного перераспределения золота и серебра по контурам мозаичных блоков.

Гипергенное новообразованное золото установлено лишь в единичных изученных пробах. Помимо экзогенного преобразования периферии зерен в рыхлых толщах (сопровождавшегося формированием высокопробной

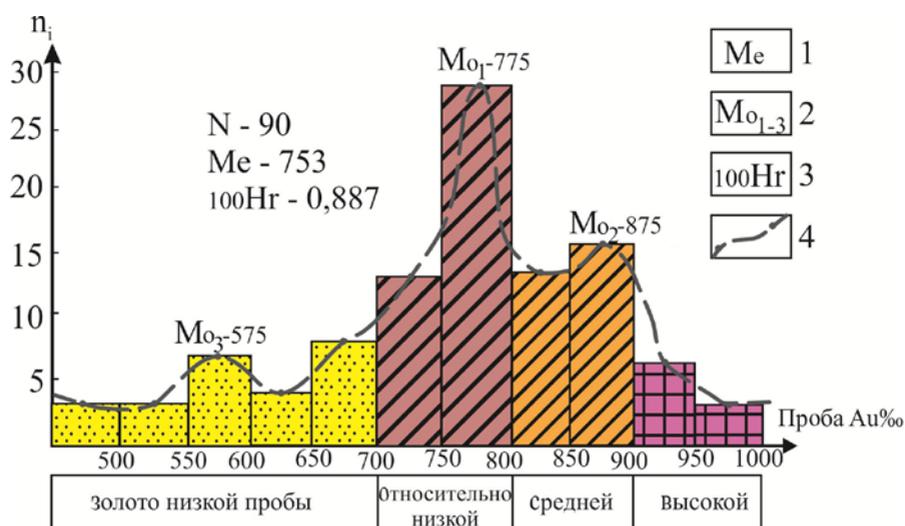


Рисунок 7. Полимодальное распределение значений пробы самородного золота из верхних горизонтов мезозойского элювия Верхотурского участка (N – количество определений): 1 – медианное значение пробы золота; 2 – модальные значения; 3 – относительная энтропия значений пробы золота; 4 – условная аппроксимирующая кривая
Figure 7. Polymodal distribution of native gold sample values from the upper horizons of the Mesozoic eluvium of the Verkhotursky area (N – is the number of determinations): 1 – the median value of the gold sample; 2 – modal values; 3 – relative entropy of gold fineness values; 4 – conditional approximating curve

каймы) новообразованное золото присутствует в виде пленочных образований с бугорчатым, ямчато-бугорчатым микрорельефом, наросших на поверхность золотин эндогенной природы (рис. 5, л, м).

Цвет этого новообразованного золота густо-желтый с охристо-коричневым оттенком. В единичных случаях встречены мелкие золотины прожилково-пленочной формы, имеющие тонкокристаллическое (порошковатое) строение. Их цвет охристо-коричневый («ржавый»), проба золота низкая (556 ‰). Его можно сопоставлять с «горчичным».

При массовом определении пробы золотин установлен широкий диапазон полученных значений (от 266 до 972 ‰). На отстроенной гистограмме – результаты 90 проб (рис. 7) видно, что проба большей части золотин (около 65 %) приходится на интервал от 700 до 900 ‰. Это соответствует золоту относительно низкопробному (700–800 ‰) и средней пробы (800–900 ‰). На высокопробное золото (более 900 ‰) приходится лишь 7,5 %, а на низкопробное (менее 700 ‰) – более 27 %. Среднее рассчитанное значение составило 753 ‰. При анализе гистограммы обращает на себя внимание неотчетливо проявленная полимодальность распределения значений пробы. Значения модальности равны: Mo_1 – 775, Mo_2 – 875, Mo_3 – 575. Высокий уровень разброса значений находит отражение и в рассчитанном значении относительной энтропии ($100 H_r$), составляющей 0,887 [15]. При дальнейшем расширении объема выборки, включающей уже данные по пробы из кварцево-жильных тел, кор выветривания и элювия (всего 250 проб), полимодальность распределения оказалась завуалированной, но при этом среднее рассчитанное значение пробы изменилось незначительно (786 ‰), как и значение относительной энтропии (0,890). Полученные данные по пробы самородного золота свидетельствуют, по нашему мнению,

в пользу полистадийности (возможно, полиэтапности) проявленных на объекте рудообразующих процессов.

При обобщении данных по изменению пробы золота с глубиной установлено, что рассчитанные средние значения этого параметра по 10 м интервалам опробования кор (до глубины 90 м) не испытывают резких колебаний. Некоторое увеличение значений пробы, отмеченное в верхних горизонтах изученного разреза кор выветривания, возможно произошло за счет гипергенного облагораживания металла.

При изучении металла значительное внимание уделялось исследованию зерен низкопробного золота (НПЗ) и относительно низкопробного (ОНПЗ). Кристаллизацию этого металла в объеме единых длительно функционировавших рудно-метасоматических систем есть основания связывать с проявлением процессов аргиллизации. Установлена важная деталь: в верхних горизонтах мезозойского элювия наряду с окисленными сульфидами присутствуют зерна низкопробного золота «свежего» облика (светло-желтого, зеленовато-желтого цвета), не затронутые процессами выветривания. Можно полагать, что завершающие этапы формирования эндогенной золотоносности в объеме гранодиоритового массива отчасти были сопряжены с гипергенной стадией развития рудовещающей структуры как во времени, так и пространстве. На отмеченную сопряженность гипогенных и гипергенных процессов ранее обращено внимание при изучении Березовского месторождения (Баранников, 2019). О присутствии в кварцево-жильных телах Зверевского золоторудного месторождения серебристого золота (с пробой около 700 ‰), самородного серебра упоминается и в работе [1]. Оно часто имеет губчатое строение, содержит в порах лимонит, охру, кварц.

Распределение НПЗ и ОНПЗ на площади гранодиоритового массива и его обрамления отражено на плане Вер-

хотурского участка (рис. 3). Большая часть этого металла локализована в его южной части в виде полосы субширотной ориентировки, в то время как в пределах центральной, северной и восточной частей участка преобладает золото средней пробы. По облику, кристалломорфным особенностям НПЗ золото кардинально не отличается от металла более ранних генераций, но имеет определенные особенности. В их числе: металл мелкий (–0,25 мм) и тонкий (–0,10 мм); зерна чаще находятся в сростании с молочно-белым, серовато-белым кварцем; отдельные золотины содержат на поверхности желтовато-охристую пленку, а другие абсолютно «свежего» облика. Ряд признаков свидетельствует в пользу относительно малоглубинных условий кристаллизации НПЗ: наличие сложных комбинаций мелких кристаллов; присутствие расщепленных и скелетных кристалловыделений; зональное строение отдельных зерен (рис. 5, з); совместное присутствие с НПЗ в «глинизированных» породах мелких короткостолбчатых кристаллов кварца «рисовидного» облика. При электронно-микроскопическом исследовании морфологии и поверхности зерен НПЗ установлено: локальное ячеисто-пятнистое изменение структуры поверхности и пробности; отчетливо фиксируемые ступени роста зерен [14].

Обобщение приведенных материалов по эндогенной и экзогенной золотоносности Верхотурского участка позволяет отметить следующее.

Отчетливого зонального строения в профиле кор выветривания не установлено. Об этом свидетельствует отсутствие направленного изменения в разрезе минерального состава кор и значений палеогеографического коэффициента.

Статус «остаточные коры» для изучения объекта неприемлем. Скорее всего, на участке развиты *наложенные* (преобразованные) *коры выветривания*, окончательно сформировавшиеся в результате более поздней их химической проработки. Доказательствами проявления наложенных низкотемпературных процессов являются: присутствие на глубоких горизонтах кор выветривания глинистых минералов, свойственных аргиллизитам, – гидрослюды, монтмориллонита, ассоциаций слюдистых минералов; наличие в «глинизированных» породах сульфидов полиметаллической ассоциации «свежего» облика; широкий диапазон колебаний пробы золота (от 266 до 972 ‰); особенности морфологии зерен самородного золота, отражающие длительную и многофакторную (типогенную и гипергенную) историю их накопления в верхних горизонтах мезозойского элювия.

Разработанная модель концентрирования свободного золота в верхних горизонтах золотоносных химических кор выветривания названа *суффозионно-гравитационной* (Баранников, 1998, 2021). Механизм концентрации металла в этой части геологического разреза обусловлен тем, что в мезозое при формировании пенеплена мог проявить себя эффект проецирования высвободившихся при выветривании частиц металла с повышенной гидравлической крупностью при последовательном и поэтапном плоскостном денудационном снижении «глинизированных» минерализованных пород. Золото, испытывавшее эффект «просадки» в щебнисто-глинистом элювии, приобретает определенные морфологические изменения. Отметим,

что описанный тип концентрирования свободных зерен металла (в пределах сохранившихся фрагментов мезозойских поверхностей выравнивания) свойственен тем участкам, где установлено их совмещение с полями развития эндогенной золотосодержащей минерализации. Отмеченную особенность необходимо учитывать при прогнозной оценке (переоценке) перспектив рудно-россыпных золотоносных узлов на Урале.

Заключение

Повышение эффективности поисковых и оценочных работ на современном этапе может быть достигнуто на основе разработки оптимальных технологических схем геологоразведочного процесса как совокупности методов выявления объектов прогноза на разных стадиях оценки недр. Этим целям служат прогнозно-поисковые комплексы (ППК) для ведущих геолого-промышленных типов месторождений [16]. В рамках реализации отмеченного подхода рекомендуется при прогнозно-поисковом изучении рудоносных площадей, переоценке перспектив золотоносности традиционных рудно-россыпных районов и узлов предусматривать углубленное исследование пространственной и генетической связи эндогенной и экзогенной золотоносности. Выявленные при этом факторы рудогенеза, установленные прямые и косвенные поисковые признаки могут способствовать локализации прогноза, позволяют обратить внимание на недостаточно изученные и связанные между собой звенья в едином эволюционном ряду: «коренной источник–золотоносный элювий (включающий химические коры выветривания)–россыпи различных генетических типов».

Значительное внимание в зарубежных и отечественных публикациях в последние десятилетия уделено рассмотрению вопроса, касающегося поведения золота при формировании химических кор выветривания. Месторождения золота, связанные с корами выветривания, рассматриваются как самостоятельный промышленно-генетический тип, относящийся к категории нового нетрадиционного типа оруденения. Углубленные исследования, раскрывающие закономерности миграции золота в корях выветривания, условия его концентрирования в определенных частях профиля коры приобрели не только теоретическое, но и прикладное значение. И в этом отношении перспективы рудоносности химических кор выветривания на площади Первомайско-Зверевского РРУ на сегодняшний день остаются далеко не исчерпанными.

Золоторудные и россыпные месторождения узла являлись объектами геологического изучения, разведки и эксплуатации на длительном временном отрезке (начиная с середины XIX в. и по настоящее время). Выполненное автором обобщение фондовых и опубликованных материалов, результатов геолого-съемочных, поисковых и разведочных работ; полевое обследование автором территории в 1980–1990-е гг.; камеральная обработка минералого-геохимических и иных данных позволили сформулировать ведущие геологические и палеогеоморфологические факторы локализации золоторудной минерализации на площади рудно-россыпного узла и прилегающей к нему территории.

А. Факторы, определяющие локализацию эндогенной золотоносности:

1. Структурно-тектонический: приуроченность оруденения к узкой (шириной 10–20 км) структурно-фациальной зоне в объеме Сысертско-Первомайского блока, ограниченного глубинными разломами – на западе Верхисетским взбросом, на востоке – Мурзинским сбросо-сдвигом.

2. Магматический (пространственно-генетическая связь): рудовмещающий комплекс – породы дунит-гарцбургитовой формации Первомайского массива; рудовмещающие и рудообразующие комплексы – малые интрузивные тела и дайки гранитоидных формаций – Верхисетский (D_3-C_1), Первомайский (C_{2-3v}), прорывающие гипербазитовое тело.

3. Рудно-формационный: высокий уровень структурной подготовленности блока («сквозность» рудовмещающих зон) и многоэтапный магматизм предопределили металлогеническую специализацию структурно-фациальной зоны для ряда полезных ископаемых: на золото – участки, насыщенные телами ультрабазитов с прорывающими их малыми телами гранитоидов; на вольфрам и молибден – гранитоиды Кедровского массива; на медно-кобальтовое оруденение – Адуйская площадь [2].

Б. Факторы экзогенной золотонности:

Обоснование факторов экзогенной золотонности возможно лишь на основе геолого-геоморфологического картирования рудно-россыпных площадей с выполнением палеогеоморфологических реконструкций рельефа [4]. Итогом должно быть обоснование истории формирования рельефа, ее отражение на карте в виде разновозрастных поверхностей выравнивания (раннемезозойской, позднемеозойской, раннеэоценовой, позднеэоценовой, плиоцен-четвертичной). Эти разновозрастные поверхности (порой весьма локальные по масштабу) соответствуют фрагментам рельефа, сформировавшимся в результате завершённых (например, позднемеозойских) или незавершённых (позднеэоценовых) эрозионных циклов. Отмеченное подразделение поверхностей выравнивания (порой с различным характером рельефа) имеет определяющее значение при прогнозно-поисковой оценке площадей на различные типы экзогенных полезных ископаемых.

Наибольший интерес (в аспекте рассматриваемой проблемы) имеют на площади РРУ мезозойские (позднеюрско-меловые) поверхности выравнивания. Представляют собой уплощенные фрагменты древнего рельефа, зафиксированные чехлом химических кор выветривания. В том случае, если в породах субстрата присутствует золо-

торудная минерализация (того или иного формационного типа), мезозойские поверхности следует рассматривать как объекты локального прогноза на экзогенное золотое оруденение.

Реализация сформулированного подхода на примере Первомайско-Зверевского рудного узла позволяет отметить следующее.

1. Обоснован механизм накопления свободного золота в верхних горизонтах мезозойского элювия – «суффозионно-гравитационный». Возможно, что он проявил себя при формировании высокопродуктивных выходов рудных тел и на других известных уральских объектах (Березовском, Благодатном, Пановская Ляга, Быньговском и др.).

2. Верхние горизонты химических кор выветривания, нередко содержащие высокие концентрации золота, следует рассматривать как самостоятельные объекты прогнозно-поисковой оценки. Промышленная значимость этого горизонта, как правило, отдельно не учитывается. Например, при оценке в 1980-е гг. мелких ложковых россыпей на площади Кунаро-Шайдурихинского рудного узла при опробовании керна скважин было установлено, что золотонность здесь не ограничивается узкой полосой (2–5 м) ложковых накоплений, но выходит на склоны логов и водоразделы. Необходимого подразделения при оконтуривании запасов по типам экзогенной золотонности при этом сделано не было (фигурировали единые контуры).

3. Профиль коры выветривания на площади Верхотурского гранодиоритового массива имеет сложное, неоднородное строение. Отчетливая вертикальная гипергенная зональность не наблюдается. Упомянутые коры следует рассматривать как наложенные (преобразованные), окончательно сформировавшиеся в результате более поздних низкотемпературных процессов аргиллизации.

4. При прогнозно-поисковой оценке рудоносных площадей углубленного изучения заслуживают россыпи золота ближнего сноса: их протяженность, рисунок в плане, генезис, литология, зональность. Полученные при этом сведения, как и результаты специализированного минералого-геохимического картирования золотин, могут способствовать локализации прогноза.

Изложенный в публикации подход к исследованию пространственной и генетической связи эндогенной и экзогенной золотонности может быть реализован при изучении других, уже известных рудно-россыпных объектов на Урале.

ЛИТЕРАТУРА

1. Заводчиков С. Г. Месторождения Невьянского района // 200 лет золотой промышленности Урала. Свердловск: Изд-во УФАН СССР, 1948. С. 195–234.
2. Кузовков Г. Н., Двоглазов Д. А., Вагшалль Д. С. Государственная геологическая карта СССР. Масштаб 1 : 200 000. Сер. Среднеуральская. Лист 0-41-XXV: объяснит. записка. Свердловск: УГСЭ, 1987. 167 с.
3. Несис В. Н., Мотов А. П., Бутняков А. В. Вертикальная геохимическая зональность окисленных руд золоторудных месторождений Анна и Шиловское, Центральный Урал // Руды и металлы. 2019. № 4. С. 34–45. <https://doi.org/10.24411/0869-5997-2019-10029>
4. Комплексное геолого-геоморфологическое картирование Урала с целью поисков гипергенных полезных ископаемых / А. П. Сигов [и др.]. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1968. 252 с.
5. Сигов А. П. Металлогения мезозоя и кайнозоя Урала. М.: Недра, 1969. 296 с.
6. Anand R. R., Butt C. R. M. A guide for mineral exploration through the regolith in the Yilgarn Craton, Western Australia // Australian Journal of Earth Science. 2010. Vol. 57. P. 1015–1114. <https://doi.org/10.1080/08120099.2010.522823>
7. Reith F., Stewart L., Wakelin S. A. Supergene gold transformation: secondary and nano-particulate gold from southern New Zealand // Chemical Geology. 2012. Vol. 320–321. P. 32–45. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.05.021>

8. Kalinin Yu. A., Palyanova G. A., Naumov E. A., Kovalev K. R., Pirajno F. Supergene remobilization of Au in Au-bearing regolith related to orogenic deposits: A case study from Kazakhstan // *Ore Geology Reviews*. 2019. Vol. 109. P. 358–369. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.04.019>
9. Graw D., MacKenzie D., Grieve P. Supergene gold mobility in orogenic gold deposits, Otago Schist, New Zealand // *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*. 2015. Vol. 58. Issue 2. P. 123–136. <https://doi.org/10.1080/00288306.2014.997746>
10. Nigai E. V. Gold-bearing weathering crusts of the eastern and north-eastern framing of the Sredneamyrskaya Depression (Khabarovsk Krai) // *Tectonics deep structure and minerageny of East Asia: Contribution of the 10 All Russian Conference with foreign participants in memory of Academician Yu. A. Kosygin*. Khabarovsk: Institute of Tectonics and Geophysics FEB RAS, 2019. P. 195–197.
11. Nigai E. V. On the Cold mineralization weathering crusts of the Rybachy site (Western Sikhote Alin) // *Региональные проблемы*. 2021. Vol. 24. No. 1. P. 26–33.
12. Баранников А. Г. К методике выделения шлиховых ореолов на основе морфометрического изучения золотин // *ДАН СССР*. 1988. Т. 302. № 3. С. 651–654.
13. Баранников А. Г. О цифровизации параметров частиц самородного золота при изучении россыпей и шлихо-минералогических исследованиях // *Известия УГГУ*. 2021. Вып. 2(62). С. 60–72. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2021-2-60-72>
14. Баранников А. Г., Азовскова О. Б. Золотоносные объекты гипогенно-гипергенного типа на Урале. Конвергентность признаков, их отличия от рудоносных кор выветривания // *Известия УГГУ*. 2017. Вып. 2(46). С. 13–22. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2017-2-13-22>
15. Кан Дж. С., Миллер Р. Статистический анализ в геологических науках. М.: Мир, 1965. 482 с.
16. Кривцов А. И. Прикладная металлогения. М.: Недра, 1989. 288 с.

Статья поступила в редакцию 07 июня 2023 года

Spatial and genetic relationship of endogenous and exogenous gold content in the area of the Pervomaisko-Zverevsky ore cluster (Middle Urals)

Aleksandr Grigor'evich BARANNIKOV*

Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

Abstract

The relevance of the work is due to the need to improve the efficiency of appraisal work on new and unconventional types of gold mineralization within the known ore-placer regions and clusters.

The purpose of the work is to show the results of the study of the spatial and genetic relationship between endogenous and exogenous gold content using the example of the Pervomaisk-Zverevsky ore-placer cluster (OPC).

Research methodology. Mineralogical and geochemical sampling of ore bodies outcrops, chemical weathering crusts; schlich-mineralogical studies; study of native gold on a digital basis, taking into account the shape, size and composition of particles; mapping of parameters of gold particles in the section of the crust, the upper horizon of the Mesozoic eluvium.

Results. The factors that determine the localization of gold content within the OPC are substantiated. Among the endogenous factors: structural-tectonic, magmatic, metallogenic specialization of individual blocks. In the volume of the Verkhoturksky granodiorite massif (an object of prospecting), a linear substockwork with a low level of mineralization of the gold-polysulfide-quartz type was revealed. When considering exogenous factors, the confinement of ore-bearing chemical weathering crusts to smoothed relief areas, comparable with Mesozoic denudation leveling surfaces and containing dispersed gold mineralization in the basement, was established. The profile of the weathering crust in the Verkhoturksk area is complex, without a distinct vertical hypergene zonality. These crusts are considered as “superimposed”, finally formed under the influence of later low-temperature argillization processes. The most significant concentrations of gold are established in the upper horizon of the crust - the zone of the Mesozoic eluvium. Based on the mineralogical and geochemical study of metal particles, a model of its accumulation, suffusion-gravity, is proposed. Under certain conditions, a gold-enriched crustal horizon can have an independent applied value. In past years, gold-bearing areal accumulations (poddernikovye placers) were successfully mined. When mapping free gold, a wide range of sample fluctuations (from low- to high-grade) was established, indicating in favor of the multi-stage processes of ore formation in the OPC area.

Conclusions. Many years of experience in the geological-geomorphological, mineralogical-geochemical study of the OPC of the Ural region has been tested by the practice of forecasting and prospecting. The approaches outlined, taking into account the close spatial relationship between endogenous and exogenous gold content, are recommended for implementation and further improvement.

Keywords: gold, ore cluster, placers, endogenous, exogenous, weathering crust.

REFERENCES

1. Zavodchikov S. G. 1948, Deposits of the Nevyansk region. *200 let zolotoy promyshlennosti Urala* [200 years of gold industry in the Urals]. Sverdlovsk, pp. 195–234. (*In Russ.*)
2. Kuzovkov G. N., Dvoeglazov D. A., Vagshal D. S. 1987, State geological map of the USSR. Sverdlovsk, 167 p. (*In Russ.*)
3. Nesis V. N., Motov A. P., Butnyakov A. V. 2019, Vertical geochemical zonality of oxidized ores of gold deposits Anna and Shilovskoe, Central Urals. *Rudy i metally* [Ores and metals], no. 4, pp. 34–45. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.24411/0869-5997-2019-10029>
4. Sigov A. P. [et al.]. 1968, Integrated geological and geomorphological mapping of the Urals for the purpose of searching for supergene minerals. Saratov, 252 p. (*In Russ.*)
5. Sigov A. P. 1969, Metallogeny of the Mesozoic and Cenozoic Urals. Moscow, 296 p. (*In Russ.*)
6. Anand R. R., Butt C. R. M. 2010, A guide for mineral exploration through the regolith in the Yilgarn Craton, Western Australia. *Australian Journal of Earth Science*, vol. 57, pp. 1015–1114. <https://doi.org/10.1080/08120099.2010.522823>
7. Reith F., Stewart L., Wakelin S. A. 2012, Supergene gold transformation: secondary and nano-particulate gold from southern New Zealand. *Chemical Geology*, vol. 320–321, pp. 32–45. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.05.021>
8. Kalinin Yu. A., Palyanova G. A., Naumov E. A., Kovalev K. R., Pirajno F. 2019, Supergene remobilization of Au in Au-bearing regolith related to orogenic deposits: A case study from Kazakhstan. *Ore Geology Reviews*, vol. 109, pp. 358–369. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.04.019>
9. Graw D., MacKenzie D., Grieve P. 2015, Supergene gold mobility in orogenic gold deposits, Otago Schist, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, vol. 58, issue 2, pp. 123–136. <https://doi.org/10.1080/00288306.2014.997746>
10. Nigai E. V. 2019, Gold-bearing weathering crusts of the eastern and north-eastern framing of the Sredneamyrskaya Depression (Khabarovsk Krai). Tectonics deep structure and minerageny of East Asia: Contribution of the 10 All Russian Conference with foreign participants in memory of Academician Yu. A. Kosygin. Khabarovsk, pp. 195–197. (*In Russ.*)

✉ barfam1@mail.ru

11. Nigai E. V. 2021, On the cold mineralization weathering crusts of the Rybachy site (Western Sikhote Alin). *Regional'nyye problem* [Regional issues], vol. 24, no. 1, pp. 26–33. (*In Russ.*)
12. Barannikov A. G. 1988, On the method of extracting schlich halos based on the morphometric study of gold particles. *Doklady Akademii nauk SSSR* [Reports of the Academy of Sciences of the USSR], vol. 302, no. 3, pp. 651–654. (*In Russ.*)
13. Barannikov A. G. 2021, On the digitalization of the parameters of native gold particles in the study of placers and schlich-mineralogical studies. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of the Ural State Mining University], issue 2 (62), pp. 60–72. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2021-2-60-72>
14. Barannikov A. G., Azovskova O. B. 2017, Gold-bearing objects of hypogene-hypergene type in the Urals. Convergence of signs, their differences from ore-bearing weathering crusts. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of the Ural State Mining University], issue 2 (46), pp.13–22. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2017-2-13-22>
15. Kahn J. S., Miller R. 1965, *Statistical Analysis in Geological Sciences*. Moscow, 482 p. (*In Russ.*)
16. Krivtsov A. I. 1989, *Applied metallogeny*, Moscow, 288 p. (*In Russ.*)

The article was received on June 07, 2023