

УДК 553.411.071

## МОРФОЛОГИЯ И СОСТАВ ЗОЛОТА КОР ВЫВЕТРИВАНИЯ ТОМЬ-ЯЙСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ

**Янченко Ольга Михайловна<sup>1</sup>,**  
olmininayanchenko@mail.ru

**Ворошилов Валерий Гаврилович<sup>1</sup>,**  
v\_g\_v@tpu.ru

**Тимкин Тимофей Васильевич<sup>1</sup>,**  
timkin@tpu.ru

**Мартыненко Ирина Владимировна<sup>1</sup>,**  
martynenko@tpu.ru

**Зиаи Мансур<sup>2</sup>,**  
m.ziai47@gmail.com

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 635050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

<sup>2</sup> Шахрудский технологический университет,  
Иран, Шахруд, бульвар Данешга.

**Актуальность.** Коры выветривания пород палеозойского фундамента Томь-Яйского междуречья являются потенциальными объектами промышленной добычи легко извлекаемого золота. Но морфология и состав этого золота изучены очень слабо, что затрудняет оценку уже выявленных рудопроявлений и определяет актуальность выполненной работы.

**Цель:** исследовать химический состав и морфологические особенности самородного золота в профиле кор выветривания Томь-Яйского междуречья.

**Объект:** самородное золото в корях выветривания по породам палеозойского фундамента Томь-Яйского междуречья.

**Методы.** Морфологические особенности золота, парагенетические ассоциации с рудными и жильными минералами изучались микроскопически под бинокляром, в отраженном свете. Химический состав золотин определялся методом ИСП-масс-спектрометрии и на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 SBU с ЭДС OXFORD X-Max 50, на рентгено-флюоресцентном микроскопе HORIBA Scientific XGT-7200.

**Результаты.** Выявлены две формы нахождения золота в корях выветривания и первичных рудах – свободное и связанное (невидимое) золото. Определен химический состав и проба первичного и гипергенного золота. Установлено уменьшение содержания примесных элементов и увеличение пробы в гипергенном золоте по сравнению с золотом первичной минерализации. Описаны основные морфологические типы золотин разных частей разреза коры выветривания. Предполагается присутствие гипергенного золота «бактериоморфного» происхождения. Все разновидности гипергенного золота ассоциируют с гипергенными минералами (карбонатами, глинистыми минералами, гидроокислами железа). Наибольшие содержания золота характерны для верхней части разреза коры выветривания – зоны гидролиза остаточной коры выветривания и перекристаллизованной коры выветривания.

### **Ключевые слова:**

Золото, кора выветривания, типоморфные особенности гипергенного золота, химический состав золота, Томь-Яйское междуречье.

### **Введение**

Коры выветривания пород палеозойского фундамента Томь-Яйского междуречья являются потенциальными объектами промышленной добычи легко извлекаемого золота. Но вопрос о масштабах растворения, перераспределения и формирования нового золота остается дискуссионным. Остаются недостаточно изученными характерные особенности гипергенного и эндогенного золота. Данное исследование посвящено сравнению морфологических и геохимических особенностей золота первичных руд, остаточной и перекристаллизованной кор выветривания с целью выявления признаков гипергенной природы золота и определения масштабов его перераспределения.

### **Геологическое строение района**

В региональном плане территория Томь-Яйского междуречья находится в области сочленения крупных геологических структур – Кольвань-Томской складчатой зоны, Западно-Сибирской плиты, Кузнецкого прогиба и Кузнецкого Алатау.

В геологическом строении принимают участие вещественные комплексы трех структурных этажей.

Нижний структурный этаж сложен сложнодислоцированными вулканогенно-осадочными отложениями киргислинского метаморфического комплекса докембрийского возраста (a, mR<sub>3</sub>k) и единичной свиты (C<sub>1</sub>ed) кембрийского возраста, выходящими на поверхность в пределах Яйского горста, продолжающего структуры Кузнецкого Алатау.

Средний структурный этаж представлен вулканогенными и терригенными отложениями прибрежно-морских и лагунно-континентальных фаций среднего девона – среднего карбона Колывань-Томской складчатой зоны, Кузнецкого Алатау и Кузнецкого прогиба. В основании стратиграфического разреза палеозойского фундамента залегают вулканогенные образования митрофановской свиты ( $D_2mt$ ), которые перекрываются мощной толщей терригенных отложений, представленной алевролитами, песчаниками, аргиллитами и глинистыми сланцами пачинской ( $D_3pc$ ) и юргинской свит ( $D_3jur$ ), нерасчлененных саламатовской и ярской толщ ( $D_3sl-C_1jar$ ), лагерносадской ( $C_1lg$ ) и ба-сандайской ( $C_{1-2}bs$ ) свит.

Разрывные структуры, проявленные в смятых в складки терригенных отложениях, подразделяются на две группы: 1) продольные син- и после-складчатые, пермского возраста, сформированные в процессе образования Колывань-Томской складчатой зоны и Томского синклинория; 2) рифтогенные, триасового возраста, связанные с развитием Сибирского суперплума, заложением Западно-Сибирской плиты и внедрением даек и силлов томского комплекса ( $\mu-\varepsilon VT_{1-2}t$ ).

Верхний структурный этаж сложен отложениями меловой, палеогеновой, неогеновой и четвертичной систем платформенного чехла. Они залегают с резким угловым несогласием на отложениях палеозоя. Формирование осадочного чехла происходило в условиях нестабильной тектонической обстановки, о чем свидетельствуют частые местные перерывы в стратиграфическом разрезе и наличие коры выветривания.

Остаточная кора выветривания (К–Р) повсеместно развита по терригенным черносланцевым отложениям, вулканитам и дайкам основного состава. Палеогеновые отложения представлены песчано-глинистыми осадками с включениями и линзами лигнитов озерно-аллювиального и пролювиально-аллювиального происхождения новомихайловской ( $P_3^1nm$ ) и лагернотомской ( $P_3^2lt$ ) свит. Отложения неогена залегают на поверхности выветрелых коренных пород палеозоя в виде разобщенных тел неправильной формы, приуроченных к понижениям палеоповерхности рельефа фундамента, в центральной части Томь-Яйского водораздела. Они представлены пестроокрашенными глинами евсинской свиты ( $N_1ev$ ) со щебнем выветрелых пород фундамента. Кирсановская свита ( $pdN_2-Q_Ekr$ ) выделена как возрастная аналог кочковской свиты для Чулымо-Енисейской и Колывань-Томской возвышенных равнин. В отличие от кочковской свиты, в ее составе преобладают не аллювиальные, а пролювиальные и делювиальные глинистые отложения со щебнем, гравием и песком в основании глинистого разреза.

Разрывные нарушения в слабоуплотненных осадках представлены флексурно-разрывными зонами. Наиболее значительная активизация этой системы разломов произошла в олигоцене и в конце

неогена-эоплейстоцена. В это время произошла существенная эрозия кор выветривания и их переотложение в результате плоскостного делювиального смыва остаточной коры выветривания в виде аллювиально-пролювиальных отложений нижней части новомихайловской свиты ( $P_3nm$ ), евсинской ( $N_1ev$ ) и кирсановской свит ( $pdN_2-Q_Ekr$ ).

Четвертичные отложения представлены аллювиально-озерными, озерными фациями тайгинской ( $Q_{1-2}tg$ ) свиты, лессово-делювиально-элювиальными субаэральными покровными образованиями ( $Q_{III}$ ), осадками террасового комплекса ( $aQ_{III}$ ) и аллювием современных пойм ( $aQ_{IV}$ ) [1].

#### Общая характеристика кор выветривания и коренной минерализации

Коры выветривания на изучаемой площади широко развиты. Они имеют преимущественно монтмориллонит-каолинит-гидрослюдистый состав. По генезису подразделяются на остаточные и переотложенные, по морфологии – на площадные и линейные. Линейные коры выветривания приурочены к тектонически ослабленным зонам и характеризуются наибольшей степенью преобразования исходных пород и глубиной распространения. В строении этих кор выветривания наряду с зонами дезинтеграции и гидратации выделяется зона гидролиза. В результате размыва остаточных кор выветривания формировались переотложенные коры выветривания. Выявленные содержания золота в переотложенной коре выветривания достигают 1,5 г/т, в зоне гидролиза остаточной коры выветривания – до 6,26 г/т [2].

Предполагается, что коренным источником золота кор выветривания являются золотоносные минерализованные зоны и золото-кварцевые жилы, подобные вскрытым скважинами и обнажающимся в карьере Батуриного рудопроявления, расположенного на восточном крыле Томского синклинория Колывань-Томской складчатой зоны. Коренное золотое оруденение представлено линейными зонами кварцевых жильно-прожилковых и прожилково-вкрапленных руд в катагенно- и метаморфогенно-гидротермальных углеродистых метасоматитах, развитых в согласных (продольных) зонах графитизации, трещиноватости и смятия на границе алевритовых и псаммитовых горизонтов терригенных пород. Породы анкеритизированы и насыщены прожилками кварц-карбонатного состава со свободным золотом и сульфидами, представленными пиритом, арсенипиритом, сфалеритом, пирротинном, халькопиритом, галенином. По результатам укрупненно-лабораторных испытаний на Ново-Беркульской золотоизвлекательной фабрике содержание золота в отобранной на рудопроявлении технологической пробе составило 5,3 г/т [3].

#### Морфологические особенности и состав золота

Золотоносные коры выветривания, минерализованные зоны и золото-кварцевые жилы Батури-

ского рудопроявления содержат как свободное, так и связанное (невидимое) золото [4, 5].

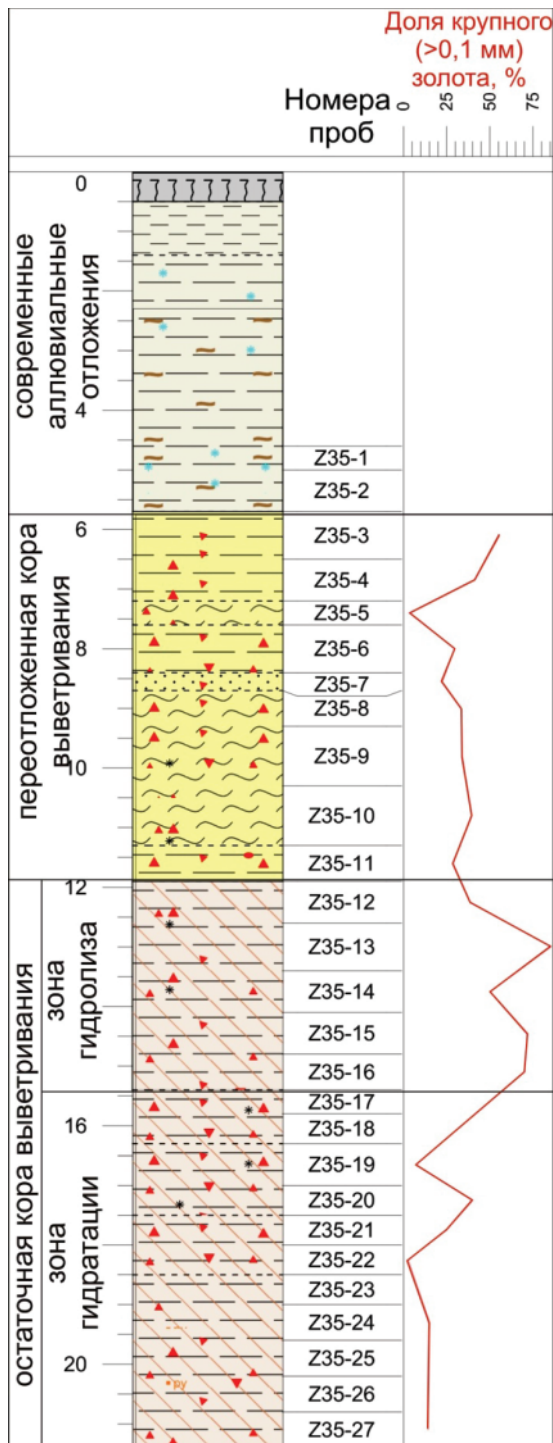


Рис. 1. График распределения крупного золота по разрезу скважины Z35

Fig. 1. Graph of large gold distribution in the section of the well Z35

Главными носителями химически связанного золота являются сульфиды – арсенопирит и пирит [4, 6–9]. Химическим анализом в мономинеральной фракции пирита с окисной пленкой из зоны

гидратации по алевролитам нами установлено содержание золота до 256 г/т, в пирите из дайки основного состава – до 0,8 г/т. В мономинеральных фракциях окисленного пирита из слабовыветрелых алевролитов содержание золота не превышает десятых долей г/т. По-видимому, из этого пирита золото в процессе окисления было удалено. В пробах, где установлены высокие концентрации золота в сульфидах, свободное золото не обнаружено.

На Батурином рудопоявлении коренное свободное золото наблюдается в виде микрочернистого пылеватого агрегата, единичных вкраплений проволоковидной, нитеобразной, пластинчатой формы. Размеры выделений 0,001...0,2 мм, редко до 1...2 мм, проба 898...913 ‰. Характерные примеси – ртуть (0,12...0,6 %) и медь (0,02...0,06 %). Выделения золота приурочены к зальбандовым частям карбонат-кварцевых прожилков, на контакте с вмещающими их графитизированными алевролитами [3, 10].

В остаточной коре выветривания минералогическим анализом установлены единичные знаки и граммовые содержания золота (до 6,264 г/т). Наибольшие содержания золота установлены в верхней части разреза остаточной коры выветривания – в зоне гидролиза.

По размерам выделений золотины остаточной коры выветривания представлены всеми классами крупности (от пылевидного (0,01...0,05 мм) до среднего (>1,0...2,0 мм)), с общей тенденцией увеличения размеров выделений золота снизу вверх по разрезу (рис. 1). Укрупнение золота наблюдается в зоне гидролиза остаточной коры выветривания, где присутствует видимое золото мелкого класса крупности (>0,25...1,0 мм). Формирование гипергенного золота происходит на фоне растворения тонкодисперсного «невидимого» золота, содержащегося в сульфидах и других неустойчивых в зоне гипергенеза минералах-носителях, а также его локального хомогенного перераспределения. Укрупнение золотины объясняется «слипанием» подвижных мелких частиц самородного золота размером 15–20 мкм в крупные агрегаты золота. Процесс «слипания» происходит по механизму взаимодиффузии на границах соприкасающихся частиц [2, 4, 11].

Золото этой части разреза не обнаруживает следов транспортировки, в подавляющем большинстве относится к неправильному морфологическому типу. Среди золотины преобладают цементационные, имеющие ажурную и комковидную формы, когда пылевидные «шарики» (кристаллики, комочки) соединены между собой тончайшими перемычками (возможно, это сростки плохоогранных кристаллических индивидов размером менее 0,01 мм либо сростки частиц сферической С. Metallidurgans, имеющих способность накапливать золото [12–17]). В большинстве случаев эти золотины трехмерные, единичные уплощены. Интерстициальное золото, как правило, имеет комковидную форму, значительно реже отмечаются крющ-

коватые агрегаты. На поверхности выделений золота данного вида постоянно присутствуют отпечатки вмещающих минералов с угловатой блестящей поверхностью либо следы вдавливания с шагреновой поверхностью. Единичные трещинные и интерстициальные выделения имеют чешуйчатую и пластинчатую формы. Гемиидиоморфные зерна представлены неправильными комковидными и пластинчатыми формами, преимущественно с ксеноморфными ответвлениями и отдельными ограниченными выступами (рис. 2, Б). Реже присутствует идиоморфный тип выделений, представленный пластинчатыми и проволоковидными образованиями, а также единичными плохоограниченными кристаллами округлой формы (рис. 2, А) [18, 19].

В зоне гидратации установлено единичное включение псевдоморфозы гидроокислов железа по пириту кубического габитуса в комковидном агрегате золота с короткими отростками. Для зоны дезинтеграции характерны срастания золота с кварцем, для зоны гидролиза – обрастание золоти-

нок анкеритом [20]. Часто золото встречается в сростках с гидрослюдисто-каолинитовым агрегатом и в псевдоморфозах по пириту. Для большинства выделений характерно присутствие гетита в углублениях от вмещающих минералов, реже наличие на поверхности охристой «рубашки» гидроокислов железа.

В *переотложенной коре выветривания* минералогическим анализом установлены единичные знаки и граммовые содержания золота (до 1,5 г/т).

По размерам выделений золото *переотложенной коры выветривания* соответствуют классам крупности от пылевидного (0,01...0,05 мм) до среднего (>1,0...2,0 мм). Практически во всех пробах характерно присутствие видимого золота с преобладанием мелкого класса. В отдельных пробах присутствуют все установленные классы крупности (от пылевидного до среднего) с преобладанием видимого золота.

Для верхней части *переотложенной коры выветривания* характерно наличие зерен золота со следа-

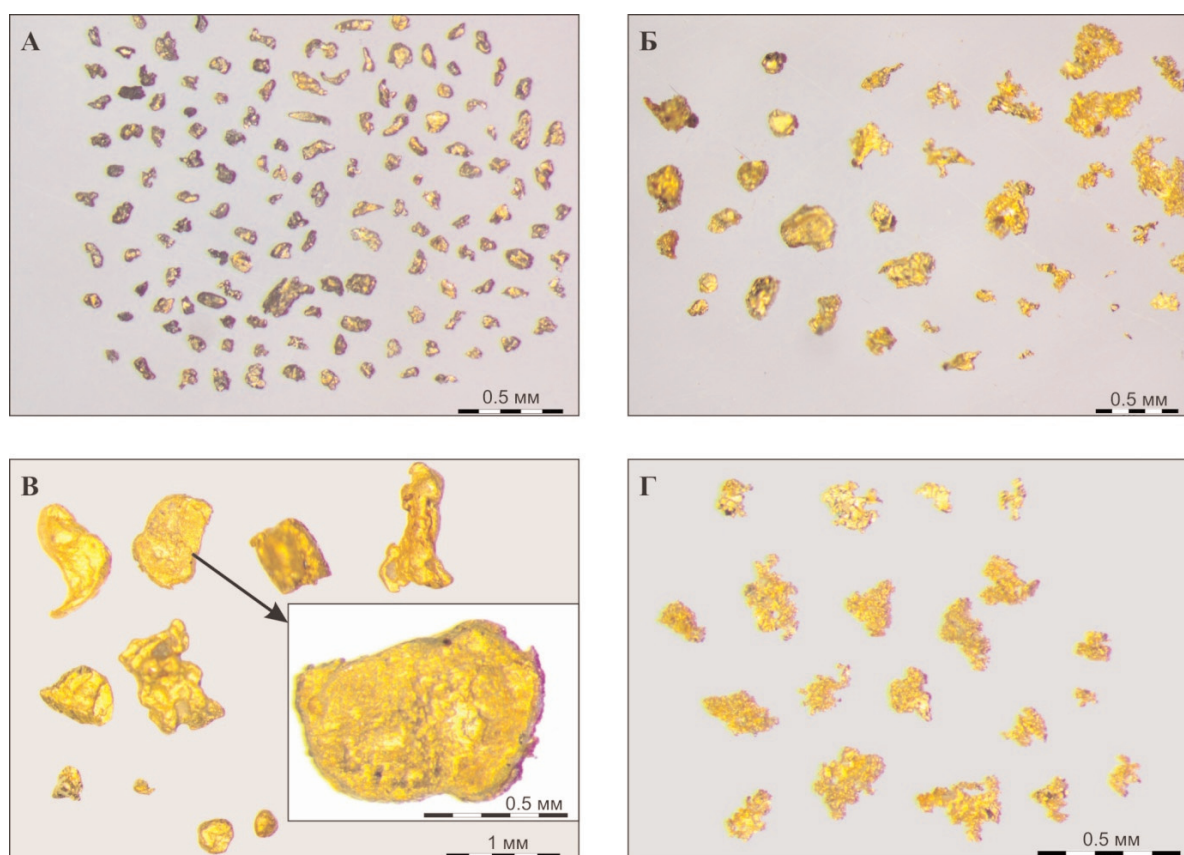


Рис. 2. Морфологические типы золотин: А – идиоморфного типа из остаточной коры выветривания: проволочные, ленточные, пластинчатые, плохоограниченные; Б – гемиидиоморфные зерна с отростками, интерстициальные выделения золота с блестящими отпечатками вмещающих минералов, ажурные цементационные золотины из остаточной коры выветривания; В – золото из переотложенной коры выветривания различной степени окатанности, иногда с корочкой новообразованного золота; Г – интерстициальные выделения золота с блестящими отпечатками вмещающих минералов, ажурные цементационные золотины из переотложенной коры выветривания

Fig. 2. Morphology of Au: A – gold idiomorphic type of residual weathering crust: wire, tape, lamellar, loose gold; B – hemiidiomorphic gold with sprouts, interstitial gold with shiny prints of enclosing minerals, openwork cementation gold of residual weathering crust; C – gold of redeposited weathering crust of varying degrees of roundness, one gold with a crust of newly formed gold; D – interstitial gold with shiny imprints of the enclosing minerals, delicate cementation gold of redeposited weathering crust

ми транспортировки, по мере перехода к подошве отложений количество их снижается. Выделения золота со следами транспортировки характеризуются более крупными (по сравнению с золотом «рудного» облика) размерами, имеют сглаженные очертания (сглаживание и загиб отростков, но уплощённость несущественная), часто заметны структуры растворения, обуславливающие шагреновую поверхность золотин. Степень окатанности их значительная, до совершенной. Золото этого типа трёхмерное, представлено изометричными, близкими к округлой форме, неправильными или несколько удлинёнными зёрнами. Часто на их поверхности наблюдаются следы вдавливания вмещающих минералов, у единичных – следы штриховки кристаллов пирита. Характерно наличие корочек новообразованного (шероховатого, агрегатного, мозговидного) более высокопробного золота (рис. 2, В). Описанные морфологические особенности гипергенного золота в целом характерны для кор выветривания различных регионов мира [21–24].

В переотложенной коре выветривания присутствуют выделения золота «рудного» облика, среди которых преобладают цементационные ажурные и комковидные агрегаты, аналогичные описанным выше в остаточной коре выветривания [12–17]. Иногда они содержат включения зёрен кварца, вокруг которых, возможно, и происходила локализация золота. У золотинок из интерстиций наблюдаются блестящие поверхности отпечатков вмещающих минералов. Выделения золота пластинчатой и чешуйчатой форм встречаются редко. Ещё реже присутствуют зёрна идиоморфного типа в виде еди-

ничных плохоограненных или искаженных индивидов с преобладанием граней октаэдра, брусочковидные формы и гемиидиоморфные образования с ксеноморфными отростками и предполагаемыми недооформленными гранями (рис. 2, Г) [18, 19].

В некоторых случаях золото покрыто корочкой гидроокислов железа.

Проба гипергенных ажурных золотин цементационного типа по данным химического анализа методом ИСП-масс-спектрометрии 920,63...923,13 ‰, установлены примеси серебра (7,44...7,53 %), ртути (0,14...0,30 %), меди (до 0,03 %), мышьяка (до 0,038 %) и других элементов. По данным электронной микроскопии проба золота такого типа 949,99 ‰, примесь серебра составляет 5,00 % (рис. 3, Б, таблица).

Проба гипергенного золота интерстициального типа в сростании с гетитом (высвобожденного из состава сульфидов при окислении) по данным электронной микроскопии – 911,19...938,61 ‰, примесь серебра составляет 5,94...6,14 %, в краевой части золотин появляется примесь железа – 2,94 % (рис. 3, А). По данным химического анализа методом ИСП-масс-спектрометрии, проба золота – 988,15 ‰, установлены примеси серебра (1,06 %), ртути (0,08 %), меди (до 0,03 %) и других элементов (таблица). В золоте гипергенного типа уменьшается содержание примесных элементов, происходит увеличение его пробы [9].

Проба переотложенного золота – 962,41...986,29 ‰, в нем установлены примеси серебра (1,10...3,67 %), ртути (0,05...0,09 %), меди (0,03...0,04 %) и других элементов (таблица).

Таблица. Химический состав золота коры выветривания

Table. Chemical composition of gold in the weathering crust

Тип и морфология золота Type and morphology of gold	Проба Fineness (‰)	Содержание химических элементов Content of chemical elements (%)					
		Hg	Ag	Cu	As	Se	Fe
Переотложенная кора выветривания/Redeposited weathering crust							
Золото со следами транспортировки, переотложенное <sup>1</sup> Gold with traces of transportation, redeposited <sup>1</sup>	962,41	0,052	3,67	0,034	<0,005	<0,0002	<0,050
Золото со сглаженными очертаниями с гидроокислами железа и гидрослюдами, переотложенное <sup>1</sup> Gold with smoothed outlines with iron hydroxides and hydrous, redeposited <sup>1</sup>	986,29	0,087	1,10	0,038	<0,005	<0,0002	0,050
Золото со следами транспортировки, переотложенное <sup>2</sup> Gold with traces of transportation, redeposited <sup>2</sup>	964,65	–	3,54	–	–	–	–
Цементационное ажурное в сростании с кварцем <sup>1</sup> Cementation openwork in coalescence with quartz <sup>1</sup>	920,63	0,30	7,44	0,031	0,038	0,06	<0,050
Остаточная кора выветривания/Residual weathering crust Зона гидролиза/Zone of hydrolysis							
Интерстициальное объемное с гидроокислами железа <sup>1</sup> Interstitial volume with iron hydroxides <sup>1</sup>	988,15	0,076	1,06	0,025	<0,005	<0,0002	0,015
Интерстициальное <sup>2</sup> /Interstitial <sup>2</sup>	938,61	–	6,14	–	–	–	–
Интерстициальное с гидроокислами железа <sup>2</sup> Interstitial with iron hydroxides <sup>2</sup>	911,19	–	5,94	–	–	–	2,94
Цементационное ажурное в сростании с кварцем <sup>1</sup> Cementation openwork in coalescence with quartz <sup>1</sup>	923,13	0,14	7,53	<0,0002	<0,005	<0,0002	<0,050
Цементационное ажурное <sup>2</sup> /Cementation openwork <sup>2</sup>	949,99	–	5,00	–	–	–	–

Примечание: <sup>1</sup> – химический состав определен методом ИСП-масс-спектрометрии, <sup>2</sup> – методом сканирующей электронной микроскопии.

Note: <sup>1</sup> – chemical composition is determined by the ISP-mass spectrometry method, <sup>2</sup> – by scanning electron microscopy.

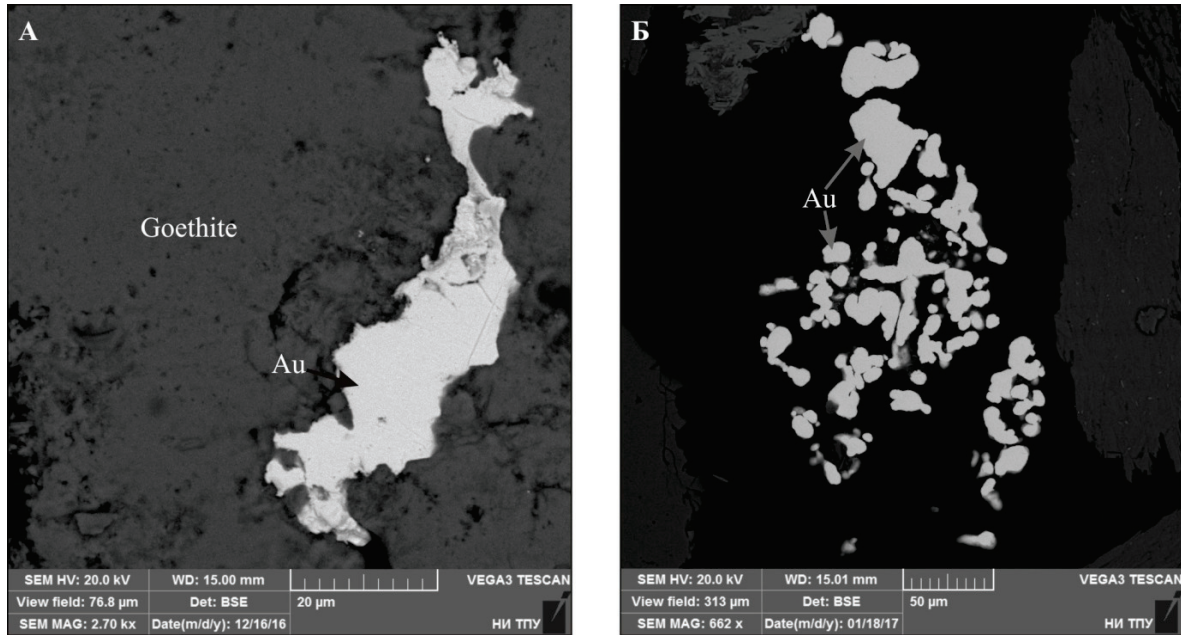


Рис. 3. Морфология золотин на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 SBU с ЭДС OXFORD X-Max 50

Fig. 3. Morphology of gold on a scanning electron microscope TESCAN VEGA 3 SBU with EMF OXFORD X-Max 50

#### Выводы

1. Изучение золота первичной золоторудной минерализации позволило установить две основные формы его нахождения – свободную и связанную. Связанное золото установлено химическим анализом в составе сульфидов.
2. В коре выветривания установлены собственно гипергенное и гипергенное переотложенное золото, характеризующиеся по отношению к золоту первичной минерализации увеличением пробы и уменьшением содержания примесных элементов. Часть гипергенного золота образована за счет растворения невидимого золота сульфидов. Возможно «бактериоморфное» происхождение ажурного гипергенного золота.
3. Золото относится к правильному, неправильному и гемиидиоморфному морфологическим ти-

пам. Для переотложенной коры выветривания характерны выделения золота с признаками транспортировки.

4. Установлено укрупнение размеров зерен и общее повышение содержаний золота в верхней части разреза коры выветривания – в зоне гидролиза (до 6,264 г/т) и в переотложенной коре выветривания (до 1,5 г/т).
5. Все разновидности гипергенного золота ассоциируют с гипергенными минералами – анкеритом, гидрослюдисто-каолинитовым агрегатом, псевдоморфозами гидроокислов железа по пириту. Гипергенное ажурное золото находится в сростании с кварцем.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-45-700019) и в рамках гранта Программы повышения конкурентноспособности Томского политехнического университета.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Парначев В.П., Парначев С.В. Геология и полезные ископаемые окрестностей города Томска. Материалы к полевой геологической экскурсии: справочное пособие. – Томск: ТГУ, 2010. – 144 с.
2. Черняев Е.В. Генезис и золотоносность кор выветривания Томского района // Цветные металлы и минералы: Сборник тезисов докладов восьмого международного конгресса. – Красноярск, 2016. – С. 336–337.
3. Черняев Е.В. Томское золото // Журнал «Глобус: Геология и бизнес», 2009. – № 1. URL: <http://www.vipstd.ru/mag/index.php/news-/271-a> (дата обращения 05.12.2018).
4. Gold in the weathering crust at the Suzdal' deposit (Kazakhstan) / Yu.A. Kalinin, K.R. Kovalev, E.A. Naumov, M.V. Kirillov // Russian Geology and Geophysics. – 2009. – V. 50. – № 3. – P. 174–187.

5. Этапность формирования и минералого-геохимические особенности золоторудной минерализации на Суздальском месторождении в углеродисто-терригенно-карбонатных толщах Западной Калбы (Казахстан) / К.Р. Ковалев, Ю.А. Калинин, Е.А. Наумов, В.В. Колпаков, М.В. Баулина // Актуальные проблемы рудообразования и металлогении. – Новосибирск, Академ. изд-во «Гео», 2006. – С. 101–102.
6. Попов А.Б. Свойства пиритов золоторудных месторождений восточной части Гонжинского выступа // Вестник Амурского государственного университета. – 2013. – Вып. 63: Сер. Естеств. и экон. науки. – С. 123–128.
7. Vikentyev I.V. Invisible and microscopic gold in pyrite: Methods and new data for massive sulfide ores of the Urals // Geology of ore deposits. – 2015. – V. 57. – № 4. – P. 237–265.
8. Абрамов Б.Н., Калинин Ю.А., Посохов В.Ф. Любавинское золоторудное месторождение (Восточное Забайкалье): петрогео-

- химия, источники пород и руд // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 3. – С. 134–144.
9. Wilson A.F. Origin of quartz-free gold nuggets and supergene gold found in laterites and soils – a review and some new observations // Australian Journal of Earth Sciences. – 1984. – V. 31. – P. 303–316.
  10. Butt C.R.M., Hough R.M. Gold nuggets: supergene or hypogene? // Australian Journal of Earth Sciences. – 2007. – V. 54. – № 7. – P. 959–964.
  11. Porto C.G., Hale M. Gold redistribution in the stone line lateritic profile of the Posse Deposit, central Brazil // Econ. Geol. – 1995. – V. 90. – № 2. – P. 308–321.
  12. Nanoparticles of noble metals in the supergene zone / S.M. Zhmodik, Y.A. Kalinin, N.A. Roslyakov, D.K. Belyanin, N.A. Nemirovskaya, G.V. Nesterenko, E.V. Airiyants, T.N. Moroz, T.A. Bul'bak, A.G. Mironov, Y.L. Mikhlin, A.M. Spiridonov // Geology of Ore Deposits. – 2012. – V. 54. – № 2. – P. 141–154.
  13. Калинин Ю.А., Жмодик С.М., Спиридонов А.М. Сфероидальное золото из латеритной коры выветривания // Россыпи и месторождения кор выветривания: современные проблемы исследования и освоения: Материалы XIV международного совещания по геологии россыпей и месторождений кор выветривания (РКВ-2010). – Новосибирск, 2–10 сентября 2010. – Новосибирск: Апельсин, 2010. – С. 290–294.
  14. Казаков П.В. Нетрадиционные типы экзогенных месторождений золота // Геологический сборник № 11. Информационные материалы. – Уфа: ДизайнПресс, 2014. – С. 224–227.
  15. The dynamics of gold in regolith change with differing environmental conditions over time / R. Anand, M. Lintern, R. Hough, R. Noble, M. Verrall, W. Salama, J. Balkau, N. Radford // Geology. – 2017. – V. 45. – № 2. – P. 127–130.
  16. Reith F. et al. Nanoparticle factories: Biofilms hold the key to gold dispersion and nugget formation // Geology. – 2010. – V. 38. – P. 843–846.
  17. The biogeochemistry of gold / G. Southam, M.F. Lengke, L. Fairbrother, F. Reith // Elements. – 2009. – V. 5. – P. 303–307
  18. Петровская Н.В. Самородное золото. – М.: Наука, 1973. – 347 с.
  19. Петровская Н.В., Яблокова С.В. Золото в корях выветривания // Рудоносные коры выветривания. – М.: Наука, 1974. – С. 173–182.
  20. Янченко О.М. Карбонаты золотоносных кор выветривания Малоушайской зоны // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXI Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 130-летию со дня рождения профессора М.И. Кучина. – Томск, 3–7 апреля 2017. – Томск: Изд-во ТПУ, 2017. – Т. 1. – С. 193–194.
  21. Larizzatti J.H., Oliveira S.M.B., Butt C.R.M. Morphology and composition of gold in a lateritic profile, Fazenda Pison «Garimpo», Amazon, Brazil // Journal of South American Earth Sciences. – 2008. – V. 25. – P. 359–376.
  22. Nair N.G.K., Santosh M., Mahadevan R. Lateritisation as a possible contributor to gold placers in Nilambur Valley, Southwest India // Chem. Geol. – 1987. – V. 60. – № 1–4. – P. 309–315.
  23. Biological and Geochemical Development of Placer Gold Deposits at Rich Hill, Arizona, USA / E.B. Melchiorre, P.M. Orwin, F. Reith, M.A.D. Rea, J. Yahn, R. Allison // Minerals. – 2018. – V. 8. – Iss. 2. – P. 56–75.
  24. Lawrance L.M., Griffin B.J. Crystal features of supergene gold at Hannan South, Western Australia // Mineralium Deposita. – 1994. – V. 29. – P. 391–398.

Поступила 12.12.2018 г.

#### Информация об авторах

**Янченко О.М.**, аспирант Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Ворошилов В.Г.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Тимкин Т.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Мартыненко И.В.**, ассистент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Зиаии М.**, PhD, доцент Шахрудского технологического университета, Иран, Шахруд, бульвар Данешга.

UDC 553.411.071

## MORPHOLOGY AND COMPOSITION OF GOLD IN WEATHERING CRUST OF THE TOM-YAYA INTERFLUVE

**Olga M. Yanchenko**<sup>1</sup>,  
olmininayanchenko@mail.ru

**Valery G. Voroshilov**<sup>1</sup>,  
v\_g\_v@tpu.ru

**Timofey V. Timkin**<sup>1</sup>,  
timkin@tpu.ru

**Irina V. Martynenko**<sup>1</sup>,  
martynenko@tpu.ru

**Mansour Ziiai**<sup>2</sup>,  
m.ziiai47@gmail.com

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>2</sup> Shahrood University of Technology,  
Bolvar Daneshka, Iran.

**Relevance.** Weathering crusts of rocks of the Paleozoic basement of the Tom-Yaya interfluve are potential targets for commercial extraction of readily recoverable gold. But the morphology and composition of this gold are very poorly studied, which makes it difficult to assess the already identified ore occurrences and determines the relevance of the work performed.

**The main aim** of the research is to investigate chemical composition and morphological features of native gold in weathering crust profile of the Tom-Yaya interfluve.

**Object:** native gold in weathering crusts according to the rocks of the Paleozoic basement of the Tom-Yaya interfluve.

**Methods.** Composition, crystallographical features of gold, paragenetic associations with ore and vein minerals were analyzed microscopically under a binocular, in reflected light, by inductively coupled plasma-atomic emission mass spectrometry (ICP-AES/MS) and on a scanning electron microscope TESCAN VEGA 3 SBU with EMF OXFORD X-Max 50, X-ray fluorescence microscope HORIBA Scientific XGT-7200.

**Results.** Two forms of gold were found in weathering crusts and primary ores – free and bound (invisible) gold. The authors have determined chemical composition and the sample of primary and hypergenic gold are determined. The decrease in the content of impurity elements and the increase in the strength of hypergenic gold in comparison with the gold of primary mineralization were found. The authors established the main morphological types of gold for different parts of weathering crust section. The presence of hypergene gold of «bacteriomorphic» origin is assumed. All gold varieties are associated with hypergene minerals (carbonates, clay minerals, iron hydroxides). The highest gold content is characteristic for the upper part of the section of the weathering crust – the zone of hydrolysis of residual weathering crust and redeposited weathering crust.

### Key words:

Gold, weathering crust, typomorphic features of hypergene gold, gold chemical composition, Tom-Yaya interfluve.

The research was financially supported by the RFBR grant no. 18–45–700019.

### REFERENCES

1. Parnachev V.P., Parnachev S.V. Geologiya i poleznye iskopaemye okrestnostey goroda Tomsk [Geology and mineral resources around Tomsk]. *Materialy k polevoy geologicheskoy ekskursii: spravochnoe posobie* [Materials for field geological excursion: reference book]. Tomsk, Tomsk State University Publ., 2010. 144 p.
2. Chernyaev E.V. Genesis i zolotonosnost kor vyvetrivaniya Tomskogo rayona [Genesis and mineralization of weathering mantle of Tomsk region]. *Tsvetnye metally i mineral. Sbornik tezisov dokladov vosmogo mezhdunarodnogo kongressa* [Non-ferrous metals and minerals. Book of abstracts of the eighth international congress]. Krasnoyarsk, 2016. pp. 336–337.
3. Chernyaev E.V. Tomskoe zoloto [Tomsk Gold]. *Zhurnal «Globus: Geologiya i biznes*, 2009, no. 1. Available at: <http://www.vip-std.ru/mag/index.php/news-/271-a> (accessed 5 December 2018).
4. Kalinin Yu.A., Kovalev K.R., Naumov E.A., Kirillov M.V. Gold in the weathering crust at the Suzdal' deposit (Kazakhstan). *Russian Geology and Geophysics*, 2009, vol. 50, no. 3, pp. 174–187.
5. Kovalev K.R., Kalinin Yu.A., Naumov E.A., Kolpakov V.V., Baulina M.V. Etapnost formirovaniya i mineralogo-geokhimicheskie osobennosti zolotorudnoy mineralizatsii na Suzdalskom mestorozhdenii v uglerodisto-terrigenno-karbonatnykh tolshchakh Zapadnoy Kalby (Kazakhstan) [Stages of formation and mineralogical and geochemical features of gold mineralization at the Suzdal deposit in the carbon-terrigenous-carbonate strata of Western Kalba (Kazakhstan)]. *Aktualnye problemy rudoobrazovaniya i metallogenii* [Urgent problems of ore formation and metallogeny]. Novosibirsk, 10–12 April 2006. Novosibirsk, Geo Publ., 2006. pp. 101–102.
6. Popov A.B. Properties of pyrite of gold deposits in the eastern part of the Gonzhinsky bulge. *Bulletin of the Amur State University*.



- sity, 2013, Iss. 63: Series of Natural and Economic Sciences, pp. 123–128. In Rus.
7. Vikentyev I.V. Invisible and microscopic gold in pyrite: Methods and new data for massive sulfide ores of the Urals. *Geology of ore deposits*, 2015, vol. 57, no. 4, pp. 237–265.
  8. Abramov B.N., Kalinin Yu.A., Posokhov V.F. Lubavinsky gold deposit (Eastern Transbaikalia): petrogeochemistry, sources of rocks and ore. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 3, pp. 134–144. In Rus.
  9. Wilson A.F., Origin of quartz-free gold nuggets and supergene gold found in laterites and soils – a review and some new observations. *Australian Journal of Earth Sciences*, 1984, vol. 31, pp. 303–316.
  10. Butt C.R.M., Hough R.M. Gold nuggets: supergene or hypogene? *Australian Journal of Earth Sciences*, 2007, vol. 54, no. 7, pp. 959–964.
  11. Porto C.G., Hale M. Gold redistribution in the stone line lateritic profile of the Posse Deposit, central Brazil. *Econ. Geol.*, 1995, vol. 90, no. 2, pp. 308–321.
  12. Zhmodik S.M., Kalinin Yu.A., Roslyakov N.A., Belyanin D.K., Nemirovskaya N.A., Nesterenko G.V., Airiyants E.V., Moroz T.N., Bul'bak T.A., Mironov A.G., Mikhlin Y.L., Spiridonov A.M. Nanoparticles of noble metals in the supergene zone. *Geology of Ore Deposits*, 2012, vol. 54, no. 2, pp. 141–154.
  13. Kalinin Yu.A., Zhmodik S.M., Spiridonov A.M. Sferoidalnoe zoloto iz lateritnoy kory vyvetrivaniya [Spheroidal gold from the lateritic weathering crust]. *Rossypti i osnovaniya kor vyvetrivaniya: sovremennyye problemy issledovaniya i osvoeniya. Materialy XIV mezhdunarodnogo soobshchestva po geologii rossyptey i mestorozhdeniy kor vyvetrivaniya (RKV-2010)* [Alluvial deposits and weathering deposits: current research and development problems. Proc. of the XIV International Meeting on the geology of placers and weathering deposits (RKV-2010). Novosibirsk, September 2–10, 2010. Novosibirsk, Apelsin Publ., 2010. pp. 290–294.
  14. Kazakov P.V. Netraditsionnyye tipy ekzogennykh mestorozhdeniy zolota [Non-traditional types of exogenous gold deposits]. *Geologicheskyy sbornik № 11. Informatsionnyye materialy* [Geological collection № 11. Information materials]. Ufa, Design Press, 2014. pp. 224–227.
  15. Anand R., Lintern M., Hough R., Noble R., Verrall M., Salama W., Balkau J., Radford N. The dynamics of gold in regolith change with differing environmental conditions over time. *Geology*, 2017, vol. 45, no. 2, pp. 127–130.
  16. Reith F. Nanoparticle factories: Biofilms hold the key to gold dispersion and nugget formation. *Geology*, 2010, vol. 38, pp. 843–846.
  17. Southam G., Lengke M.F., Fairbrother L., Reith F. The biogeochemistry of gold. *Elements*, 2009, vol. 5, pp. 303–307.
  18. Petrovskaya N.V. *Samorodnoe zoloto* [Native Gold]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 347 p.
  19. Petrovskaya N.V., Yablokova S.V. Zoloto v korakh vyvetrivaniya [Gold in weathering crusts]. *Rudonosnye kory vyvetrivaniya* [Ore bearing weathering crusts of the Maloushayskaya zone]. *Problemy geologii i osvoeniya nedr. Trudy XXI Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchennykh, posvyashchennogo 130-letiyu so dnya rozhdeniya professora M.I. Kuchina* [Problems of geology and subsoil development. Proc. of the 21<sup>st</sup> International Symposium of Academician M.A. Usov for students and young scientists, dedicated to the 130<sup>th</sup> anniversary of the birth of Professor M.I. Kuchin]. Tomsk, 3–7 April 2017. Tomsk, TPU Publ. house, 2017. Vol. 1, pp. 193–194.
  21. Larizzatti J.H., Oliveira S.M.B., Butt C.R.M. Morphology and composition of gold in a lateritic profile, Fazenda Pison «Garimpo», Amazon, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 2008, vol. 25, pp. 359–376.
  22. Nair N.G.K., Santosh M., Mahadevan R. Lateritisation as a possible contributor to gold placers in Nilambur Valley, Southwest India. *Chem. Geol.*, 1987, vol. 60, no. 1–4, pp. 309–315.
  23. Melchiorre E.B., Orwin P.M., Reith F., Rea M.A.D., Yahn J., Allison R. Biological and Geochemical Development of Placer Gold Deposits at Rich Hill, Arizona, USA. *Minerals*, 2018, vol. 8, Iss. 2, pp. 56–75.
  24. Lawrence L.M., Griffin B.J. Crystal features of supergene gold at Hannan South, Western Australia. *Mineralium Deposita*, 1994, vol. 29, pp. 391–398.

Received: 12 December 2018.

#### Information about the authors

**Olga M. Yanchenko**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Valery G. Voroshilov**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Timofey V. Timkin**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Irina V. Martynenko**, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Mansour Ziiai**, PhD, associate professor, Shahrood University of Technology.