



Оригинальная статья / Original article

УДК 550.423

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-39-47>



Структура поверхности высокопробного самородного золота Приамурья

© С.М. Радомский^a, В.И. Радомская^b

^{a,b}Институт геологии и природопользования ДВО РАН, г. Благовещенск, Россия

Резюме: Целью данного исследования являлось изучение структуры поверхности высокопробного золота. Предметом исследования служили золоторудные месторождения Приамурья, объектом исследования стали образцы самородных высокопробных золотин с этих месторождений. В ходе работы были использованы методы термодинамики и рентгеновской электронной микроскопии. В результате была установлена многослойная структура поверхности высокопробных минералов самородного золота Приамурья со следующими уровнями: пограничный слой с нулевой степенью окисления Au^0 в форме металлического золота желтого цвета; оксидный слой со степенью окисления Au^{+1} в форме Au_2O фиолетового цвета; оксидный слой со степенью окисления Au^{+3} в форме Au_2O_3 желто-коричневого цвета; гидратированный оксидный слой со степенью окисления Au^{+3} в форме $Au(OH)_3$ красно-желто-коричневого цвета. Методами электронной микроскопии выделяются внешние структуры поверхности – плотные оксидные слои формы Au_2O_3 и рыхлые гидратированные слои формы $Au(OH)_3$, тогда как внутренние слои металлического и одновалентного золота не просматриваются. Важными термодинамическими характеристиками представленных уровней являются значения стандартных окислительно-восстановительных потенциалов E° , определяющих их физико-химические свойства: для металлического золота $E^\circ = +1,68$ В; для оксидного слоя со степенью окисления Au^{+1} в форме Au_2O $E^\circ = +0,32$ В; для оксидного слоя со степенью окисления Au^{+3} в форме Au_2O_3 $E^\circ = +1,36$ В; для гидратированного оксидного слоя со степенью окисления Au^{+3} в форме $Au(OH)_3$ $E^\circ = +0,7$ В. Результаты проведенных авторами исследований свидетельствуют о том, что структура поверхности имеет несколько понижающих окислительно-восстановительный потенциал слоев, что объясняет генерирование и образование мигрирующих форм золота в увлажненных гипергенных условиях окружающей природной среды.

Ключевые слова: геохимия, золото, структура поверхности, Приамурье

Для цитирования: Радомский С.М., Радомская В.И. Структура поверхности высокопробного самородного золота Приамурья. *Науки о Земле и недрапользование*. 2021. Т. 44. № 1. С. 39–47. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-39-47>

Surface structure of Amur region high grade native gold

© Sergej M. Radomskiy^a, Valentina I. Radomskaya^b

^{a,b}Institute of Geology and Nature Management, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Blagoveschensk, Russia

Abstract: The purpose of the research is to study the surface structure of high grade gold. The subject of research is gold ore fields in the Amur region. The object of the study is samples of native high grade gold grains from these fields. The study uses the methods of thermodynamics and X-ray electron microscopy. The study results in revealing a multilayer structure of the surface of high grade minerals of the Amur region native gold with the following levels: a boundary layer with zero oxidation degree Au^0 in the form of yellow metallic gold; an oxide layer with the oxidation degree Au^{+1} in the form of purple Au_2O ; an oxide layer with the oxidation degree Au^{+3} in the form of a yellow-brown Au_2O_3 ; a hydrated oxide layer with the oxidation degree Au^{+3} in the form of a red-yellow-brown $Au(OH)_3$. The methods of electron microscopy have allowed to identify external surface structures – dense oxide layers of the form of Au_2O_3 and loose hydrated layers of the form of $Au(OH)_3$, whereas the inner layers of metallic and monovalent gold are not visible. Important thermodynamic characteristics of the presented levels are the values of standard oxidation-reduction potentials (E°), which determine their physicochemical properties: for metallic gold $E^\circ = +1.68$ V; for the oxide layer with the oxidation degree Au^{+1} in the form of Au_2O – $E^\circ = +0.32$ V; for the oxide layer with the oxidation degree Au^{+3} in the form of Au_2O_3 – $E^\circ = +1.36$ V; for the hydrated oxide layer with the oxidation degree Au^{+3} in the form of $Au(OH)_3$ – $E^\circ = +0.7$ V. The results of the conducted studies indicate that the surface structure has several layers that lower the oxidation-reduction potential, which explains the generation and formation of migratory forms of gold in humid hypergene conditions of natural environment.

Keywords: geochemistry, gold, surface structure, Amur region

For citation: Radomskiy SM, Radomskaya VI. Surface structure of Amur region high grade native gold. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(1):39–47. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-39-47>



Введение

Золото среди химических элементов имеет самый высокий окислительно-восстановительный потенциал, поэтому обычно встречается в виде минералов самородного золота. При этом оно обладает геохимической двойственностью проявляемых свойств: с одной стороны, накапливается в виде минералов самородной формы, с другой – активно мигрирует в природной среде [1], что дало основание В.И. Вернадскому считать его «всюдным элементом». Поверхность минералов самородного золота разграничивает эти крайние формы проявляемых свойств и определяет его поведение в природной среде. Целью данной работы является изучение структуры поверхности высокопробных минералов самородного золота Приамурья методами термодинамики и растровой электронной микроскопии, поэтому представляется актуальным исследовать закономерности процесса природной самоорганизации выделений минералов высокопробного самородного золота.

Количество атомов золота, обладающих избыточной «связанной» энергией $T\Delta S$ более 30 Дж/моль, характеризует поверхностные оксидные слои ионов золота, а количество атомов, обладающих минимальной энергией ΔH менее 15 Дж/моль, – внутренние металлические слои атомов золота при абсолютной температуре T , К, изменении энтропии ΔS , Дж/моль·К, и изменении энтальпии ΔH , кДж/моль [2]. Критерием направления протекания химических реакций было выбрано значение изобарно-изотермического потенциала (свободной энергии Гиббса) $\Delta G^\circ = -E^\circ zF$, кДж/моль, которое определяют: значения стандартных электродных окислительных потенциалов E° , В; количество электронов z , число Фарадея F , равное 96500 Кл/моль. Для водных растворов благородных металлов при стандартных термодинамических условиях (давлении $P = 10^5$ Па и температуре $T = 298,15$ К) значения E° составляют +(0,45–1,85) В, а для случаев, отличающихся от стандартных, потенциал реакции окисления принято записывать по именному уравнению Нернста. Отрицательное значение ΔG° характеризует термодинамически возможное и самопроизвольное протекание реакций [3].

Материалы и методы исследования

Материалом для данного исследования послужили образцы высокопробного самородного золота месторождений Приамурья, а инструментами – методы и методики электронной микроскопии, реализованные на растровом электронном микроскопе РЭМ JSM-6390LV (JEOL, Япония), интегрированном с микрорентгеноспектральным энергодисперсионным анализатором Oxford INCAEnergy (Oxford Instrument, Англия) с режимами высокого (HV) и низкого (LV) вакуума и детекторами вторичных (SEI) и обратно рассеянных (BEI) электронов при аппаратном разрешении 3 нм и пошаговом увеличении до 300000 раз [4]. Анализы были выполнены в Аналитическом центре минералого-геохимических исследований Института геологии и природопользования ДВО РАН оператором Т.Б. Макеевой.

Результаты исследования

На рис. 1. представлен рентгенографический снимок природного высокопробного самородного золота с месторождений Приамурья с сеткой геометрических размеров исследуемой золотины. Качественный энергодисперсионный спектр золотины представлен на рис. 2.

«Неопределяемый» элемент водород в форме молекул воды H_2O и гидроксидов $[OH]^-$ характеризует первый пик слева от начала со значением в максимуме 0,1 кэВ [5]. Гипотетическую возможность того, что это может быть пиком бериллия, мы не поддерживаем вследствие кларковых количеств последнего 0,01 %, что намного – на три порядка единиц концентраций – ниже порога обнаружения рентгеновскими методами.

Следующий пик со значением 0,4 кэВ принадлежит атому кислорода для всех форм – радикальной, оксидной и гидроксидной [6]. Стандартных программ для определения количеств водорода и кислорода нет, хотя массовая доля кислорода может быть определена по разности 100 % и количества известных компонентов. Массовые доли золота характеризуются пиком 2,2 кэВ и отмечены программой на рис. 2. На рис. 3 изображена поверхность высокопробной золотины Au_2O_3 , представленная оксидной пленкой. При этом

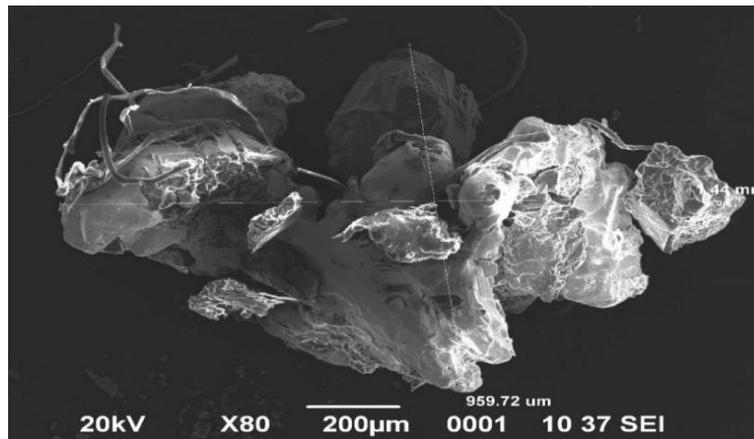


Рис. 1. Высокопробная золотина
Fig. 1. A high grade gold grain

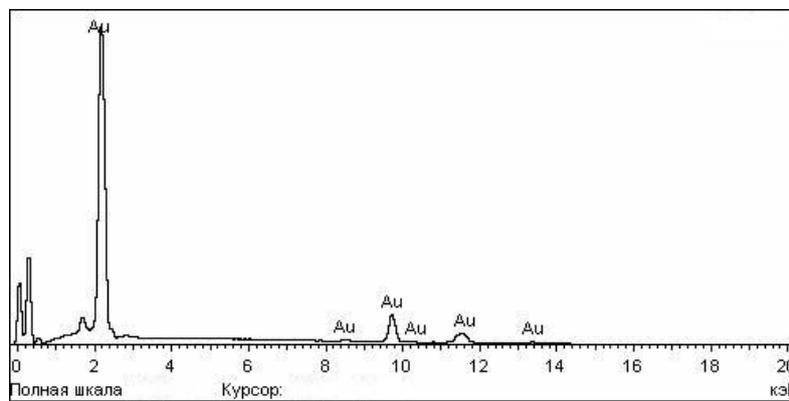


Рис. 2. Энергодисперсионный спектр высокопробной золотины
Fig. 2. Energy dispersive spectrum of a high grade gold grain

границы на фотографии получаются резкими и четкими вследствие плотнейшей упаковки атомов, а сама свободная поверхность стремится к минимальным значениям. На рис. 4 поверхность образована гидратированными оксидными формами $Au(OH)_3$, которые испы-

тывают более дальнедействующие силы отталкивания по сравнению с силами взаимного притяжения. В этом случае свободная поверхность увеличивается, становится рыхлой, а атомы расталкивают друг друга, поэтому фотография получается размытой и нечеткой.

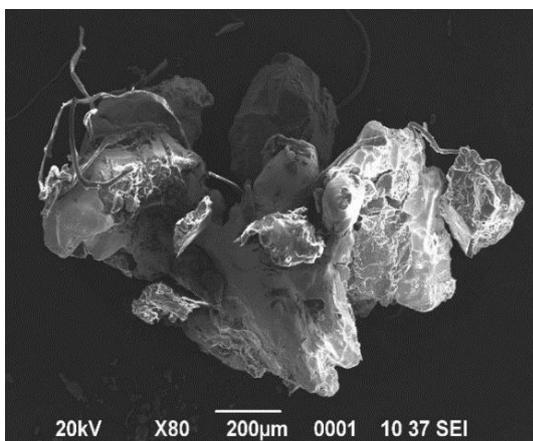


Рис. 3. Высокопробная золотина
твердых оксидных форм
Fig. 3. A high grade gold grain
of solid oxide forms

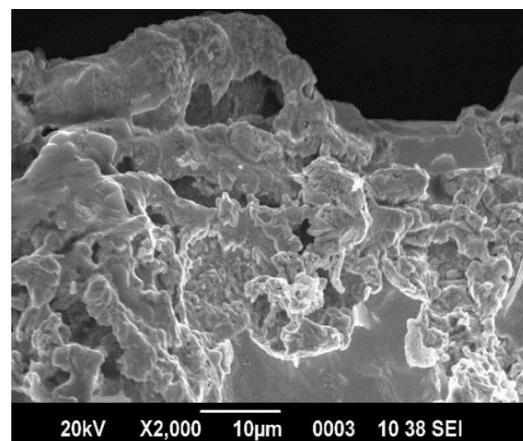


Рис. 4. Высокопробная золотина
рыхлых гидроксидных форм
Fig. 4. A high grade gold grain
of loose hydroxide forms

Обсуждение результатов

Известно, что золото является самым инертным химическим элементом и замыкает электрохимический ряд напряжений индивидуальных веществ со значением стандартного окислительно-восстановительного потенциала $E^\circ = +1,68$ В. Однако поверхностные атомы золота обладают повышенными энергиями, что дает им возможность взаимодействовать с другими элементами, образуя пленки оксидов и гидроксидов [6]. Толщина этих пленок может достигать значений порядка нескольких нанометров, и химический состав их является различным, тогда как толщина пленок пропорциональна массовой доле растворенного кислорода в окружающей жидкой или газообразной среде [7]. В общем виде предлагаемая структура строения поверхности высокопробного золота представлена на рис. 5 [7, 8].

В условиях гипергенеза поверхность самородного золота контактирует с кислородом и окисляется воздухом в присутствии молекул воды с образованием оксидных слоев, состоящих из Au_2O . Количество оксидов пропорционально активности кислорода и окислительно-восстановительному потенциалу вмещающей среды Eh . Наиболее неустойчивый метастабильный фиолетовый оксид Au_2O ($\Delta G^\circ = 13,11$ кДж/моль) образуется из $AuOH$ при дегидратации и диспропорционирует по схеме $3Au^{+1} \leftrightarrow 2Au^0 + Au^{+3}$ с образованием металлического золота Au^0 и Au_2O_3 [9].

Далее следует желто-бурый оксид Au_2O_3 , который образуется как при диспропорционировании Au^{+1} , так и при более глубокой дегидратации, возникающей на поверхности $Au(OH)_3$. Устойчивые малорастворимые оксиды Au_2O_3 предохраняют минералы самородного золота от дальнейшего окисления, пассивируют их поверхность, делая ее инертной для реакций, протекающих в земной коре, в результате чего природное золото не реагирует с большинством химических веществ, находящихся в зоне химической эрозии земной коры. Пленка Au_2O_3 обладает следующими термодинамическими параметрами: $\Delta G = 78,7$ кДж/моль, $\Delta S = 134,3$ Дж/моль·К [8–10]. Наибольшей устойчивостью из оксидов обладают закристаллизовавшиеся слои $Au_2O_3(кр.)$, имеющие стандартный потенциал образования Гиббса ($\Delta G^\circ Au_2O_3(кр.) = 163,4$ кДж/моль) и $E^\circ = +1,36$ В. Наличие слоя оксидов на самородном золоте подтверждается электрохимическими и химическими методами исследования веществ по проявляемым ими свойствам [7].

При взаимодействии с водой или увлажненным воздухом оксиды Au_2O_3 гидратируются, вследствие чего их внутренняя энергия понижается до значений $\Delta G^\circ = 78,7$ кДж/моль и образуются рыхлые амфотерные гидроксиды красно-желто-коричневого цвета, имеющие формулы $Au(OH)_3$ или $H_3[AuO_3]$. При этом стандартный окислительно-восстановительный потенциал также снижается до значений

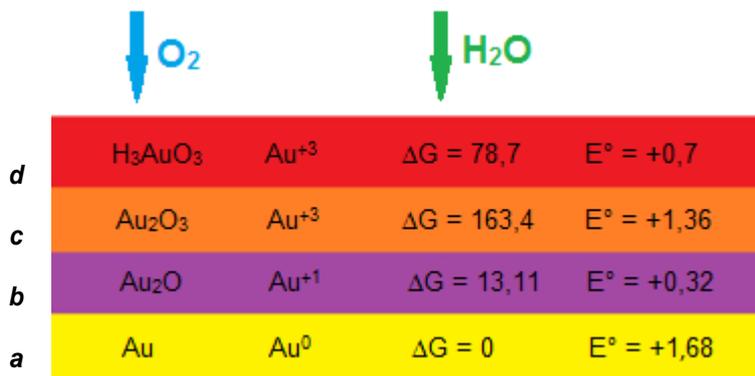


Рис. 5. Структура поверхностного слоя природных высокопробных золотин самородного золота по направлению к внешнему слою:

a – желтое металлическое золото со степенью окисления Au^0 ; b – фиолетовый оксид Au_2O окисленной формы Au^{+1} ; c – желто-коричневый оксид Au_2O_3 окисленной формы Au^{+3} ;

d – красно-желто-коричневый гидратированный оксид $Au(OH)_3$ или $H_3[AuO_3]$ окисленной формы Au^{+3}

Fig. 5. Structure of the surface layer of natural high grade gold grains of native gold towards the outer layer:

a – yellow metallic gold Au^0 ; b – violet oxide Au_2O of the oxidized form Au^{+1} ; c – yellow-brown oxide Au_2O_3 of the oxidized form Au^{+3} ; d – red-yellow-brown hydrated oxide $Au(OH)_3$ or $H_3[AuO_3]$ of the oxidized form Au^{+3}



$E^\circ = +0,7$ В и поверхность становится более химически активной, открывая возможные варианты для реакций – присоединения, замещения и растворения [8].

В зоне гипергенеза при значениях $E^\circ < +0,7$ В происходят реакции присоединения и образуются пленки высокопробного золота, которые авторы работ [11–13] наблюдали при осаждении золота из растворов, поэтому для зоны окисленных руд характерна проба выше средней по месторождению и даже выше средней его пробы для самих окисленных руд. Образование на золотинках пленки высокопробного золота данные авторы связывают с процессом электрохимической коррозии при наличии в водном потоке окислителей и комплексообразователей. Однако представление Ю.П. Ивенсена и В.И. Левина о росте золотинки не имеет практического значения вследствие воздействия малых концентраций золота в пресных поверхностных водах Приамурья порядка $2,5 \cdot 10^{-10}$ моль/дм³, которые частично образуются из отработанных гидротермальных растворов [14].

Также при значениях окислительно-восстановительных свойств среды $Eh < +0,7$ В возможны реакции укрупнения золота, когда взаимодействуют окисленные слои поверхности золотин, золото-кислородные связи заменяются металлическими и при этом выделяются атомарный кислород и тепловая энергия, поскольку внутренняя энергия связи «золото – золото» обращается в ноль. Процессы минералообразования осуществляются на окисленных формах зародышевых кристаллов минералов золота и протекают с заметными скоростями при повышенных концентрациях. Кинетика минералообразования описывается теорией бинарных столкновений, и скорость реакции пропорциональна вероятности столкновений атомов золота, отнесенных к общему количеству столкновений всех атомов химических элементов в системе [14, 15].

Реакции замещения протекают в широком интервале окислительно-восстановительного потенциала среды $Eh > +0,36$ В зоны гипергенеза для многочисленных ионов, геометрические и энергетические характеристики которых близки к ионам золота. В первую очередь это благородные металлы, среди которых

наиболее распространенным является серебро Ag^+ , а также ионы меди Cu^{2+} , цинка Zn^{2+} , стронция Sr^{2+} и ряд других элементов [16, 17].

При значениях достигаемого окислительно-восстановительного потенциала внешней среды $Eh > +0,7$ В начинается область реакций растворения гидратированных окисленных слоев золота, которые происходят как в подземных, так и в поверхностных водах. Так, дождевая вода имеет реальный окислительно-восстановительный потенциал $Eh + (0,6–0,8)$ В, скапливаясь на земной поверхности, в зависимости от подстилающих пород она приобретает слабокислый характер с $pH = 5–7$ или слабощелочной характер с $pH = 7–9$ [15, 18]. Растворяясь в ней, атмосферный кислород повышает окислительно-восстановительный потенциал для слабощелочной среды до $Eh + 1,24$ В, для слабокислой среды – до $Eh + 1,23$ В. Значение максимально возможного насыщения атмосферным кислородом таких вод составляет $+2,07$ В за счет концентрации растворенного кислорода 10 мг O_2 /дм³ и концентрации растворенного озона $0,8$ мг O_3 /дм³ [15, 19]. Растворенные формы золота образуют комплексные соединения с координационным числом 4 для концентрированных растворов и координационным числом 6 для разбавленных растворов. Комплексное состояние растворенных форм Au^{+3} и Au^{+1} стабилизируется в природных водотоках за счет понижения стандартных значений E° при образовании этих соединений и может длительно существовать в гидросфере при постоянных значениях физико-химических величин Eh и pH [20].

Заключение

Установившееся термодинамическое равновесие растворенных и минеральных форм золота для Приамурья имеет постоянные значения: самородные минеральные формы золота занимают 95,5 %, 4,5 % приходится на сумму окисленных форм 2,5 и 2 %-х растворенных мигрирующих форм золота в Приамурской геохимической провинции. Физико-химические параметры вмещающей природной среды благоприятны для процессов восстановления, минералообразования, где



скорости реакции восстановления превышают скорости реакции окисления: $C_{ок.} / C_{вос.} < 1$ [19, 21].

Резюмируя вышеизложенное, можно констатировать, что поверхностный слой природных золотин состоит из атомов и химических соединений золота, обладающих повышенными значениями внутренней энергии, которые полностью определяют как структуру, так и проявляемые химические свойства этих природных минералов. При этом существует определенная закономерность в чередовании структурных поверхностных слоев: инертный слой металлического золота покрывает промежуточная метастабильная группа атомов Au^{+1} , которая диспропорционирует на более окисленное Au^{+3} и металлическое Au^0 . Слой оксида Au_2O_3 может закристаллизовываться и образовывать прочную пленку, предохраняющую от взаимодействий с химическими элементами, а также выступать в виде затравки для роста минерала из растворенных ионов золота или для укрупнения золотин при взаимодействии оксидных слоев Au_2O_3 различных частиц. Гидратируясь в зоне гипергенеза, оксидный слой образует рыхлые фрагменты амфотерных гидроксидов $Au(OH)_3$ или $H_3[AuO_3]$, которые, растворяясь, служат источником миграционных форм комплексных соединений золота [19, 22].

Образовавшиеся структурные слои оксидов и гидроксидов могут быть легко удалены с поверхности золота механическими, электрохимическими и химическими методами [23, 24].

На основе результатов проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Установлена многослойная структура поверхности высокопробных минералов самородного золота Приамурья со следующими уровнями:

- пограничный слой с нулевой степенью окисления Au^0 в форме металлического золота желтого цвета;
- оксидный слой со степенью окисления Au^{+1} в форме Au_2O фиолетового цвета;
- оксидный слой со степенью окисления Au^{+3} в форме Au_2O_3 желто-коричневого цвета;
- гидратированный оксидный слой со степенью окисления Au^{+3} в форме $Au(OH)_3$ красно-желто-коричневого цвета.

2. Методом электронной микроскопии выделены внешние структуры поверхности – плотные оксидные слои формы Au_2O_3 и рыхлые гидратированные слои формы $Au(OH)_3$, тогда как внутренние слои металлического и одновалентного золота не просматриваются.

3. Методом термодинамики определены значения стандартных окислительно-восстановительных потенциалов E° , определяющих их физико-химические свойства:

- для металлического золота $E^\circ = +1,68$ В;
- для оксидного слоя со степенью окисления Au^{+1} в форме Au_2O $E^\circ = +0,32$ В;
- для оксидного слоя со степенью окисления Au^{+3} в форме Au_2O_3 $E^\circ = +1,36$ В;
- для гидратированного оксидного слоя со степенью окисления Au^{+3} в форме $Au(OH)_3$ $E^\circ = +0,7$ В.

4. Структура поверхности с понижающимися значениями уровней окислительно-восстановительного барьера объясняет генерирование и образование мигрирующих форм золота в увлажненных гипергенных условиях окружающей природной среды.

Список литературы

1. Blowes D.W., Ptacek C.J., Jambor J.L., Weisener C.G. The geochemistry of acid mine drainage // Environmental geochemistry / eds. H.D. Holland, K.K. Turekian. Vol. 9. Oxford: Elsevier-Pergamon, 2003. P. 149–204.

2. Sato M. Persistency-field Eh-pH diagrams for sulfides and their application to supergene oxidation and enrichment of sulfide ore bodies // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1992. Vol. 56. Iss. 8. P. 3133–3156.

3. Гаррелс Р.М., Крайст Ч.Л. Растворы, минералы, равновесия / пер. с англ. М.: Мир, 1968. 368 с.

4. DiCenzo S.B., Berry S.D., Hartford Jr E.H. Photoelectron spectroscopy of single-size Au clusters on a

substrate // Physical Review B. 1988. Vol. 38. Iss. 12. P. 8465–8468. <https://doi.org/10.1103/physrevb.38.8465>

5. Brown P.A., Gill S.A., Allen S.J. Metal removal from wastewater using peat // Water Research. 2000. Vol. 34. Iss. 16. P. 3907–3916. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00152-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00152-4)

6. Jambor J.L. Mineralogy of sulfide rich tailings and their oxidation products // Environmental geochemistry of sulfide mine-waters / eds. J.L. Jambor, D.W. Blowes. Vol. 22. Waterloo: Mineralogical Association of Canada, 1994. P. 59–102.



7. Радомский С.М., Радомская В.И. Механизм образования сростков минералов самородного золота // Вестник Томского государственного университета. 2015. № 392. С. 209–214. <https://doi.org/10.17223/15617793/392/35>
8. Паддефет Р. Химия золота / пер. с англ. М.: Мир, 1982. 264 с.
9. Hiemstra T., van Riemsdijk W.H. Surface structural ion adsorption modeling of competitive binding of oxyanions by metal (hydr)oxides // *Journal of Colloid and Interface Science*. 1999. Vol. 210. Iss. 1. P. 182–193. <https://doi.org/10.1006/jcis.1998.5904>
10. Barrow N.J., Bowden J.W. A comparison of models for describing the adsorption of anions A on a variable charge mineral surface // *Journal of Colloid Interface Science*. 1987. Vol. 119. Iss. 1. P. 236–250. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(87\)90263-3](https://doi.org/10.1016/0021-9797(87)90263-3)
11. Альбов М.Н., Быбочкин А.М. Рудничная геология. М.: Недра, 1973. 430 с.
12. Ивенсен Ю.П., Левин В.И. Генетические золоторуднения и золоторудные формации // Золоторудные формации и геохимия золота Верхояно-Чукотской складчатой области / отв. ред. Ю.П. Ивенсен. М.: Наука, 1975. С. 5–120.
13. Шнейдерхен Г. Рудные месторождения / пер. с нем. М.: Иностранная литература, 1958. 501 с.
14. Радомский С.М. Естественный миграционный потенциал благородных металлов Монголо-Охотского золотоносного пояса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 1. С. 29–38.
15. Радомский С.М., Радомская В.И. Равновесные параметры процесса окисления благородных металлов // Естественные и технические науки. 2010. № 4. С. 166–170.
16. Радомский С.М., Радомская В.И., Моисеенко Н.В., Моисеенко В.Г. Благородные металлы в ландшафтах Амуро-Зейской равнины Приамурья // Доклады Академии наук. 2008. Т. 422. № 5. С. 665–667.
17. Rietra R.P.J.J., Hiemstra T., van Riemsdijk W.H. The relationship between molecular structure and ion adsorption on variable charge minerals // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1999. Vol. 63. Iss. 19-20. P. 3009–3015. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00228-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00228-8)
18. Blowes D.W., Ptacek C.J., Jambor J.L., Weisener C.G., Paktunc D., Gould W.D., et al. The geochemistry of acid mine drainage // *Treatise on geochemistry* / eds. H.D. Holland, K.K. Turekian. Vol. 9. Oxford: Elsevier, 2003. P. 149–204.
19. Радомский С.М., Радомская В.И. Соотношение ионных и металлических форм благородных металлов на золотосеребряном месторождении Покровское (Верхнее Приамурье) // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № 1. С. 128–134.
20. Davis J.A., Leckie J.O. Surface ionization and complexation at the oxide/water interface II: Surface properties of amorphous iron oxyhydroxide and adsorption of metal ions // *Journal of Colloid and Interface Science*. 1978. Vol. 67. Iss. 1. P. 90–107. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(78\)90217-5](https://doi.org/10.1016/0021-9797(78)90217-5)
21. Dutrizac J.E., Jambor J.L. Jarosites and their application in hydrometallurgy // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2000. Vol. 40. Iss. 1. P. 405–452. <https://doi.org/10.2138/rmg.2000.40.8>
22. Hiemstra T., van Riemsdijk W.H. A surface structural approach to ion adsorption: the charge distribution (CD) model // *Journal of Colloid Interface Science*. 1996. Vol. 179. Iss. 2. P. 488–508. <https://doi.org/10.1006/jcis.1996.0242>
23. Scaini M.J., Bancroft G.M., Knipe S.W. Reactions of aqueous Au¹⁺ sulfide species with pyrite as a function of pH and temperature // *American Mineralogist*. 1998. Vol. 83. P. 316–322.
24. Widler A.M., Seward T.M. The adsorption of gold (I) hydrosulfide complexes by iron sulfide surface // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2002. Vol. 66. Iss. 3. P. 383–402.

References

1. Blowes DW, Ptacek CJ, Jambor JL, Weisener CG. The geochemistry of acid mine drainage. In: Holland HD, Turekian KK (eds.). *Environmental geochemistry*. Vol. 9. Oxford: Elsevier-Pergamon; 2003. p.149–204.
2. Sato M. Persistency-field Eh-pH diagrams for sulfides and their application to supergene oxidation and enrichment of sulfide ore bodies. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1992;56(8):3133–3156.
3. Garrels RM, Christ CL. Solutions, minerals and equilibria; 1965. 450 p. (Russ. ed.: *Rastvory, mineraly, ravnovesiya*. Moscow: Mir; 1968. 368 p.).
4. DiCenzo SB, Berry SD, Hartford Jr EH. Photoelectron spectroscopy of single-size Au clusters on a substrate. *Physical Review B*. 1988;38(12):8465–8468. <https://doi.org/10.1103/physrevb.38.8465>
5. Brown PA, Gill SA, Allen SJ. Metal removal from wastewater using peat. *Water Research*. 2000;34(16):3907–3916. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00152-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00152-4)
6. Jambor JL. Mineralogy of sulfide rich tailings and their oxidation products. In: Jambor JL, Blowes DW (eds.). *Environmental geochemistry of sulfide mine-waters*. Vol. 22. Waterloo: Mineralogical Association of Canada; 1994. p.59–102.
7. Radomskiy SM, Radomskaya VI. The mechanism of native gold mineral aggregate formation. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta = Tomsk State University Journal*. 2015;392:209–214. <https://doi.org/10.17223/15617793/392/35>
8. Puddephatt RJ. The chemistry of gold; 1987. 284 p. (Russ. ed.: *Paddefet R. Khimiya zolota*. Moscow: Mir; 1982. 264 p.).
9. Hiemstra T, van Riemsdijk W.H. Surface structural ion adsorption modeling of competitive binding of oxyanions by metal (hydr)oxides. *Journal of Colloid and Interface Science*. 1999;210(1):182–193. <https://doi.org/10.1006/jcis.1998.5904>
10. Barrow NJ, Bowden JW. A comparison of models for describing the adsorption of anions A on a variable charge mineral surface. *Journal of Colloid Interface Science*. 1987;119(1):236–250. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(87\)90263-3](https://doi.org/10.1016/0021-9797(87)90263-3)



9797(87)90263-3

11. Al'bov MN, Bybochkin AM. *Mining geology*. Moscow: Nedra; 1973. 430 p. (In Russ.)

12. Ivensen YuP, Levin VI. Genetic gold mineralization and gold ore formations. In: Ivensen YuP (ed.). *Zolotorudnye formatsii i geokhimiya zolota Verkhoyano-Chukotskoi skladchatoi oblasti = Gold ore formations and geochemistry of gold in the Verkhoyansk-Chukotka folded region*. Moscow: Nauka; 1975. p.5–120. (In Russ.)

13. Schneiderhohn H. Erzlagerstätten. Kurzvorträge zur einföhrung und zur wiederholung; 1944. 290 s. (Russ. ed.: Shneiderkhen G. *Rudnye mestorozhdeniya*. Moscow: Inostrannaya literatura; 1958. 501 p.)

14. Radomskiy SM. Natural migration potential of noble metals of Mongol-Okhotsk gold belt. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2017;328(1):29–38. (In Russ.)

15. Radomskii SM, Radomskaya VI. Equilibrium operation factors of noble metals in oxidation process. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Natural and technical sciences*. 2010;4:166–170. (In Russ.)

16. Radomskii SM, Radomskaya VI, Moiseenko NV, Moiseenko VG. Noble metals in landscapes of the Amur-Zeya plain in Priamurye. *Doklady Akademii nauk*. 2008;422(5):665–667. (In Russ.)

17. Rietra RPJJ, Hiemstra T, van Riemsdijk WH. The relationship between molecular structure and ion adsorption on variable charge minerals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1999;63(19-20):3009–3015. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00228-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00228-8)

18. Blowes DW, Ptacek CJ, Jambor JL, Weisener CG, Paktunc D, Gould WD, et al. The geochemistry of acid mine drainage. In: Holland HD, Turekian KK (eds.). *Treatise on geochemistry*. Vol. 9. Oxford: Elsevier; 2003. p.149–204.

19. Radomskii SM, Radomskaya VI. The ratio of ion and metal forms of noble metals at gold-silver layer Pokrovskoe (Upper Amur region). *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2013;1:128–134. (In Russ.)

20. Davis JA, Leckie JO. Surface ionization and complexation at the oxide/water interface II: Surface properties of amorphous iron oxyhydroxide and adsorption of metal ions. *Journal of Colloid and Interface Science*. 1978;67(1):90–107. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(78\)90217-5](https://doi.org/10.1016/0021-9797(78)90217-5)

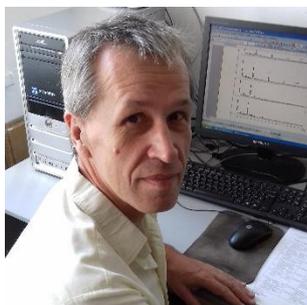
21. Dutrizac JE, Jambor JL. Jarosites and their application in hydrometallurgy. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2000;40(1):405–452. <https://doi.org/10.2138/rmg.2000.40.8>

22. Hiemstra T, van Riemsdijk WH. A surface structural approach to ion adsorption: the charge distribution (CD) model. *Journal of Colloid Interface Science*. 1996;179(2):488–508. <https://doi.org/10.1006/jcis.1996.0242>

23. Scaini MJ, Bancroft GM, Knipe SW. Reactions of aqueous Au¹⁺ sulfide species with pyrite as a function of pH and temperature. *American Mineralogist*. 1998;83:316–322.

24. Widler AM, Seward TM. The adsorption of gold (I) hydrosulfide complexes by iron sulfide surface. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2002;66(3):383–402.

Сведения об авторах / Information about the authors



Радомский Сергей Михайлович,

кандидат геолого-минералогических наук,
научный сотрудник Лаборатории рудогенеза,
Институт геологии и природопользования ДВО РАН,
675000, г. Благовещенск, Рёлочный пер., 1, Россия,
✉ e-mail: rsm@ascnet.ru

Sergey M. Radomskiy,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Researcher of the Ore Genesis Laboratory,
Institute of Geology and Nature Management,
Far Eastern Branch of the Russian Academy of Science,
1 Relochy Lane, Blagoveschensk 675000, Russia,
✉ e-mail: rsm@ascnet.ru



Радомская Валентина Ивановна,

кандидат химических наук,
ведущий научный сотрудник Лаборатории биогеохимии,
Институт геологии и природопользования ДВО РАН,
675000, г. Благовещенск, Рёлочный пер., 1, Россия,
e-mail: radomskaya@ascnet.ru

Valentina I. Radomskaya,

Cand. Sci. (Chemistry),
Leading Researcher of the Laboratory of Biogeochemistry,
Institute of Geology and Nature Management,
Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
1 Relochy Lane, Blagoveschensk 675000, Russia,
e-mail: radomskaya@ascnet.ru



Заявленный вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 08.12.2020; одобрена после рецензирования 13.01.2021; принята к публикации 17.02.2021.

The article was submitted 08.12.2020; approved after reviewing 13.01.2021; accepted for publication 17.02.2021.