РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 549.086:553.411.071(571.53)

ИССЛЕДОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА РОССЫПНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ХЛЕБОПЁК (БОДАЙБИНСКИЙ РАЙОН ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ)

© А.А. Дубков[1], А.В. Жабин[2], Ю.А.Кузнецов[3], В.Н. Грибанов[3], В.Н. Калиниченко[4], А.А. Гулин[5]

1 – ФГБУ Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт (ВНИГНИ); 2 – Воронежский государственный университет; 3 – ООО РГ«Иркутскгеофизика»; 4 – Институт биохимической физики РАН (ИБХФ РАН); 5 – ФГБУ науки Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук (ФИЦ ХФ РАН)

DOI:10.24412/1997-8316-2023-109-20-29

Аннотация: методами оптической, электронной микроскопии и рентгенофазовой дифрактометрии исследованы образцы коренных пород, наиболее характерных для россыпного месторождения Хлебопёк. Установлено наличие в кристаллических сланцах многочисленных выделений микро- и тонкодисперсных соединений золота и серебра. Определен их минеральный состав. Выявлены неизвестные ранее минеральные формы золота. На основании полученных данных сделаны выводы о первичности новых минеральных соединений по отношению к самородному золоту. Таким образом, подвергается сомнению связь процесса образования россыпного золота на месторождении Хлебопёк с его переотложением из коренных пород, подвергшихся гипергенному преобразованию.

Ключевые слова: Хлебопёк, Бодайбинский район, Иркутская область, электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ, минеральные формы золота, серебра.

E–mail: zhabin01@gmail.com

STUDIES OF THE MINERAL COMPOSITION OF THE KHLEBOPEK ALLUVIAL DEPOSIT(BODAIBINSKY DISTRICT OF THE IRKUTSK REGION)

© A. Dubkov[1], A.Zhabin[2], Yu. Kuznetsov[3], V. Gribanov[3], V. Kalinichenko[4], A. Gulin[5]

1 – All-Russian Research Geological Oil Institute (VNIGNI); 2 – Voronezh State University; 3 – RG Irkutskgeofizika; 4 – Institute of Biochemical Physics of the Russian Academy of Sciences (IBCP RAS); 5 – N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics Russian Academy of Sciences (FRC CPRAS)

Abstract: Samples of the bedrock most characteristic of the Khlebopek alluvial deposit were studied using optical, electron microscopy and X-ray diffractometry. The presence of numerous secretions of micro- and fine-dispersed gold and silver compounds in crystalline shales has been established. Their mineral composition has been determined. Previously unknown mineral forms of gold have been identified. Based on the data obtained, conclusions are drawn about the primacy of new mineral compounds in relation to native gold. Thus, the connection of the process of formation of placer gold at the Khlebopek deposit and its redeposition from bedrock subjected to hypergenic transformation is questioned.

Keywords: Khlebopek; Bodaibinsky district, Irkutsk region, electron microscopy, X-ray diffraction analysis, mineral forms of gold, silver.

ВВЕДЕНИЕ

Образование россыпей основано на представлениях о ведущей роли рудного материала, сформировавшегося в эндогенных условиях. При последующей его дезинтеграции в процессах гипергенеза, механической транспортировке и аккумуляции в отложениях различных фациальных обстановок [3, 4, 14] происходит природное обогащение находящейся в нём металлической составляющей.

С работы Петровской Н.В. [8], в которой показано, что частицы тонкодисперсного самородного золота (менее 10 микрон) распространены значительно более широко, чем гравитационное золото, и появилось обоснованное представление о превалировании в природе «невидимых» форм золота над его «видимым» аналогом. Это касается не только рудных месторождений, но и россыпных. Сторонники гипотезы об образовании самородков из тонкодисперсного золота придерживаются мнения о его вхождении в атомарном виде в кристаллическую структуру других минералов. Оппоненты утверждают, что эти частицы, видимые лишь в электронные микроскопы, в основной своей массе являются субмикроскопическими выделениями самородного золота. Химическая теория образования золота, в том числе и в россыпях, была впервые сформулирована в 1927 году В.И. Вернадским: «золото – элемент всюдный (термин автора), присутствующий во всякой почве, во всякой горной породе, находящийся в вечно подвижных равновесиях в водных растворах». И эта теория, что справедливо, находит массу последователей по всему миру.

Сотников В.И., который относится к категории наиболее осторожных исследователей, синтезирует эти представления следующим образом: «самородное золото, переходя из коренных источников в россыпи, в той или иной степени испытывает преобразования в составе и строении его выделений» [11].

Здесь хотелось бы обратить внимание на следующее: все гипотезы образования россыпей предполагают нахождение в них полезных компонентов в металлическом виде. В то же время только для золота известно более сорока минеральных форм, и более двадцати восьми для платиноидов. Однако последние считаются более редкими, чем «самородные» минеральные формы, и как источник образования россыпей обычно не рассматриваются, хотя они достаточно легко преобразуются из сложных по химическому составу соединений в собственно золото или платиноиды.

То, что тонко- и ультрадисперсные минеральные формы драгоценных металлов встречаются в рудных месторождениях значительно чаще, чем «самородные» формы, показано не только нами [1, 9, 10], но и другими авторами [6]. Мы давно придерживаемся мнения, что первичными минеральными формами, заключёнными в породах как рудных, так и россыпных золоторудных месторождений, являются именно минеральные соединения драгоценных элементов. А «самородные», нуль-валентные формы возникают именно из них при стечении благоприятных геологических условий.

Выбранное для исследований россыпное месторождение Хлебопёк (Иркутская область, Бодайбинский район) локализовано в рифейско-вендских отложениях Бодайбинского синклинория. Это месторождение географически находится относительно недалеко (около 40 км к югу) от рудного гиганта Сухой Лог (рис. 1), геологическое строение, минерагения, золотоносность и даже платиноносность которого описана во многих работах [3, 5, 7, 12]. Кроме многочисленных россыпей, открытых и эксплуатируемых за более чем столетний период времени, практически на всех известных водотоках района, в непосредственной близости от Хлебопёка, имеется ряд иных золоторудных месторождений и проявлений. В их число входят: Голец Высочайший, Вернинское, Невское и ряд перспективных

рудопроявлений. Все известные рудные месторождения района относятся к золотосульфидной формации, от малосульфидного до кварц-сульфидного типов. Поэтому предполагаемыми для россыпей Хлебопёка и всего района источниками россыпного золота логично было бы считать штокверковые кварцевые прожилки с золоторудным оруденением. Основная масса золота на этих месторождениях относится к мелкому и дисперсному гранулометрическим классам. Находки крупного золота (до 1 см или более) считаются уникальными.

Ручей Хлебопёк – это небольшой по протяжённости (15 км) левый приток реки Вача. Его притоки, где сейчас происходит добыча, представляют собой небольшие ручьи длиной не более 1,5-2,0 км. В районе повсеместно развита многолетняя мерзлота до глубин 120-200 м. При изучении состава пород на водоразделах, на склонах и в аллювии водотоков на Хлебопёке становится видно, что кварцево-жильный материал хотя и присутствует практически повсеместно, но явно играет резко подчинённую роль по отношению к основной массе пород кристаллических сланцев.

При промывке кристаллических сланцев на промприборах обращает на себя внимание пирит, большая часть которого находится на различных стадиях окисления. Но несмотря на кажущееся значительное присутствие, содержание в породах его не более 1% от массы. Минералогические исследования типоморфных особенностей пиритов, проведённые Ю.И. Тарасовой [12] на месторождении Голец Высочайший, а также В.Л. Таусоном [13], подтверждают частое наличие золота в виде изоморфных примесей в структуре пирита и его нановыделений в микропорах. Установленное на этих объектах содержание золота в пиритах достигает десятков грамм на тонну. Похожее значение содержания золота в пиритах зафиксировано и на месторождении Сухой Лог [13].

Минеральный состав рудных месторождений Бодайбинского района детально исследован для их рудных зон и вмещающих оруденение пород. Он представлен кварцем, полевыми шпатами, слюдами, карбонатами, хлоритом, цирконом. Основной формой рудных минералов является пирит.

Другим рудным компонентом, фиксируемым при промывке на промприборах и при доводке шлиховой тяжелой фракции, является золото, часто превосходящее по своей размерности частицы пиритовых выделений (рис. 2). В большинстве случаев самородки и крупное золото покрыты плотной коркой гидроксидов железа.

Рис. 1. Схема расположения района работ

Рис. 2. Месторождение Хлебопёк. Мелкие самородки

ИССЛЕДОВАНИЯ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ И ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ПРОБ

Ранее во многих образцах из эфельных отвалов оптическими методами в аншлифах нами было установлено наличие и определены содержания золота и серебра. Дополнительно проанализированы около семи десятков образцов, содержащих золото и серебро, как методами оптической микроскопии, так и с помощью рентгенофазовой дифракции и электронной микроскопии.

Мелкое золото, размерностью до 30-50 микрон, изучалось с помощью оптических микроскопов «OlympusBx53P». Морфоло-

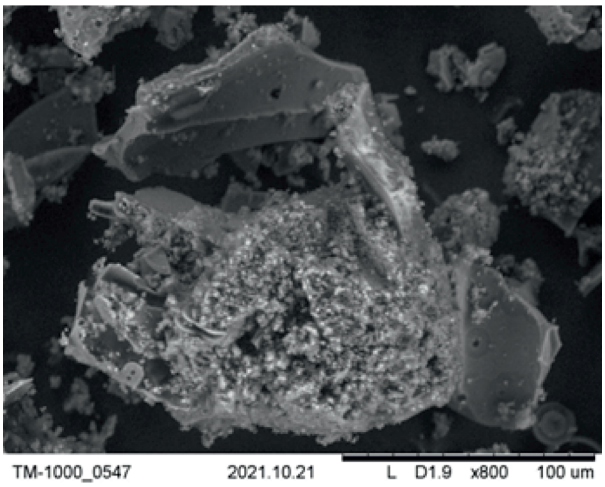

Рис. 3. Электронный микроскоп «HitachiTM – 1000». Рудные частицы (белые точки и полоски) на поверхности крупного обломка халькопирита

Таблица 1.
Элементный состав поверхности обломка на рис. 3 в %

Na	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Se	Fe	Cu	Te	Ru	Rh	Pd	Ag	Sn	As	Os	Ir	Au	Bi
4,6	5,3	12,4	21,2	1,0	2,6	1,6	1,3	13,1	14,3	0,6	0,0	1,2	1,1	1,1	2,1	0,3	2,6	1,7	6,0	5,9

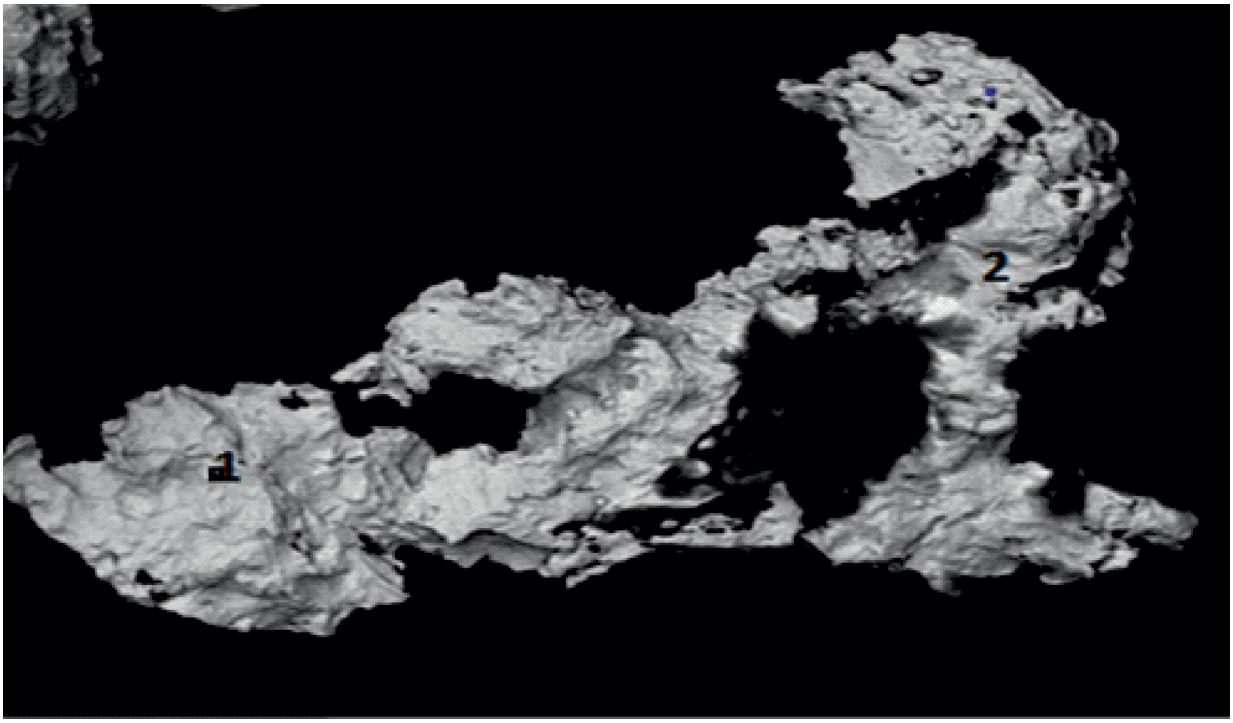

Рис. 4. Электронный микроскоп «JSM-6380LV JEOL»
Теллурид золота (калаверит).
Точка 1: Au– 45.05, Te–55.95%, точка 2: Au – 46.17, Te– 53.83%. Размер зерна 0.2 мм.

гия тонкодисперсного золота, элементный состав вмещающих его пород и рудных минералов рассматривались нами с помощью электронных микроскопов «HitachiTM – 1000», «JSM-6380LV JEOL» и «Prisma E». Для рудных частиц, это касается не только золота и серебра, характерны микронные и субмикронные размеры. Поскольку они встречаются на порядок чаще своих более крупных аналогов, их можно найти в любом образце из эфельных отвалов кристаллических сланцев (рис. 3, табл. 1).

Судя по элементному составу тонкодисперсных частичек (рис. 3), количество минеральных фаз, в том числе «рудных минералов», может быть очень велико. В исследованных нами на электронном микроскопе «JSM-6380LV JEOL» образцах (рис. 4) достаточно уверенно были определены теллурид золота (калаверит) и ртутистое золото. Калаверит в виде единичного зерна причудливой формы был найден в протолочках тяжёлой фракции кристаллических сланцев из эфельных отвалов (рис. 4).

Интересным представляется тот факт, что золото в кристаллических сланцах на исследованной нами площади находится не только в сульфидах, но и в микротрещинах породы, и в самом кварце (рис. 5). Это не очень характерно для золото-сульфидных рудных месторождений района, где золото в основном связано с пиритом.

Для рудных зёрен, размеры которых составляют первые микроны и менее, провести измерения на электронном микроскопе затруднительно, так как площадь электрон-

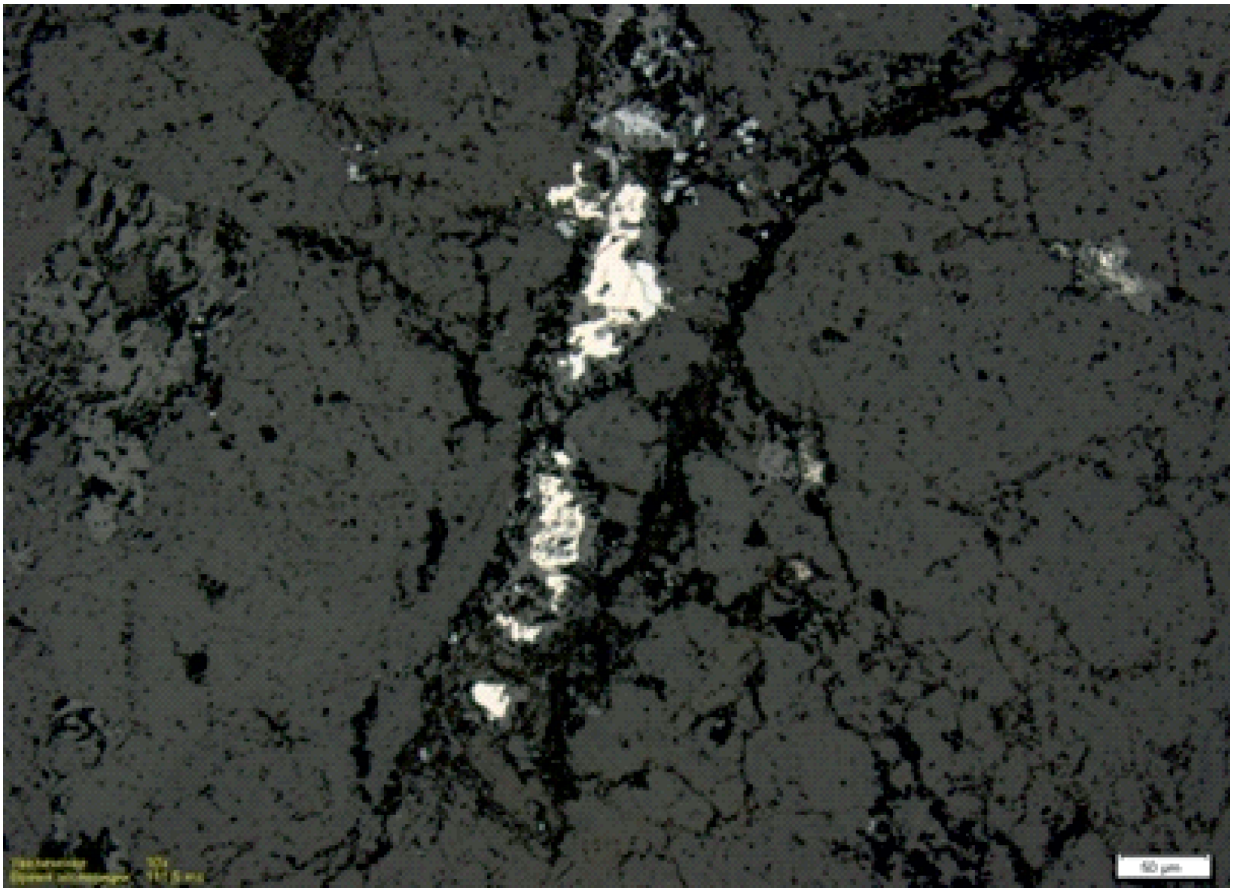

Рис. 5. Выделения ртутистого золота в микротрещинах и микропустотах кристаллического сланца
Электронный микроскоп «JSM-6380LV JEOL»
Примеси: Ag, Bi. Содержания ртути в золоте колеблются от 5,68 до 8,21 %,
при постоянном содержании Au – 87-89%.

ного пучка больше исследуемых объектов. При этом наряду с исследуемым зерном будет измеряться и прилегающая к нему площадь. Понятно, что получаемый результат не сможет соответствовать истинному составу исследуемого объекта. Достаточно уверенно исследование можно провести только для частиц драгоценных элементов размером более 10 микрон.

Поэтому для определения не только элементного, но и минерального состава «рудных» тонкодисперсных образований были проведены исследования на рентгеноструктурном дифрактометре «ARL X'tra» (Швейцария).

Для качественного фазового анализа использовалась международная кристаллографическая база данных «ICDD PDF-2» (release 2022). Анализ проводили с использованием приставки «Oxford Crystallographica». Рефлексы, полученные при анализе образцов, сравниваются с отражениями 457-ми тысяч кристаллических фаз из международной кристаллографической базы. Количественный рентгеноструктурный анализ по методу Ритвельда проводился с использованием программного обеспечения «Siroquant Sietronics Pty Ltd».

Авторы долгое время используют данный анализ для определения минерального состава пород и руд золоторудных месторождений, нефтегазовых объектов и импактитов [2]. Методика определений детально указанав работе [1] .

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Данные о разнообразии минеральных форм, полученных методом рентгенофазовой дифрактометрии, приведены в таблице 2. Из всех минеральных форм золота, исследованных этим методом, ноль-валентные его формы были отмечены лишь в единичных пробах. Весовые, процентные содержания минеральных фаз приведены в среднем столбце таблицы. Погрешность измерения Σ(δ) в правом столбце.

Из данных, приведённых в таблице 2 и рисунках 3, 4, 5, следует, что основными минеральными формами золотосеребряной и золоторудной минерализации в исследованных образцах руды являются тонкодисперсные теллуридные, селенидные, ртутистые, оксидные и даже фторауратные соединения, легко и активно вступающие в обменные реакции. Самородные, «нольвалентные» их формы были установлены лишь в единичных случаях, причем только для минеральных форм, размеры которых превышали 20 микрон. В целом минеральный состав эфельных отвалов, определённый методом рентгенофазовой дифрактометрии, прекрасно согласовывается с данными авторов по минеральному составу руд Сухого Лога [9], лишь стибниты золота

Таблица 2.
Минеральный состав эфельных отвалов месторождения Хлебопёк

Кристаллическая фаза	Весовое содержание, %	Погрешность измерения, δ
Quartz	50,2	0,72
Muscovite	18,7	0,56
Albite, low	9,2	0,54
Chlorite	6,7	0,47
Biotite	4,8	0,33
Orthoclase	3,3	0,38
Siderite (rhomb)	1,5	0,13
Kaolin	1,2	0,34
Pyrite	0,8	0,21
Kalaverite ($AuTe_2$)	0,8	0,35
Au0.75 Hg0.25	0,5	0,08
AuCu Se_4	0,5	0,26
Silversulphide beta 186°	0,5	0,17
SilverSulphide, low	0,4	0,1
Silversulphate	0,4	0,07
Krennerite AgAu Te_2	0,3	0,05
Ag_3O_4	0,2	0,08

в Сухом Логу встречаются несколько чаще, чем на Хлебопёке. А на Хлебопёке авторами никогда не фиксировались сульфиды и дисульфиды никеля и кобальта.

Что же касается соединений серебра, которые постоянно отмечаются совместно с минеральными формами золота, то в составе тяжёлой фракции при промывке на промприборах отмечены не были. По данным оптической и электронной микроскопии, а также метода рентгенофазовой дифрактометрии, они представлены сульфидными, галогенидными, сульфатными и оксидными формами, а также в виде сложных сульфидных соединений с висмутом и оловом (рис. 6).

Считается, что источником россыпного золота являются прожилковые кварц-полевошпатовые и сульфидизированные зоны рудных объектов района, которые за многие десятилетия в районе Хлебопёка так и не были найдены, несмотря на детальные поисковые работы в районе. По нашему мнению, источниками золота, поступавшего в аллювий местных водотоков, являются его более сложные по составу минеральные формы. Сегодня точно установлена высокая миграционная активность Fe и S. Вынос железа и серы (в основном из сульфидов железа) тесно связан с движением межмерзлотных вод в породах склоновых и аллювиальных отложений, что фиксируется на различных уровнях и различными методами, при горных и буровых работах во всех частях разрезов притоков ручья Хлебопёк. Кроме того, эти воды часто выходят на поверхность, пропитывая песчано-гравийные отложения и придавая им пёстро-бурую окраску. С ними всегда связано появление

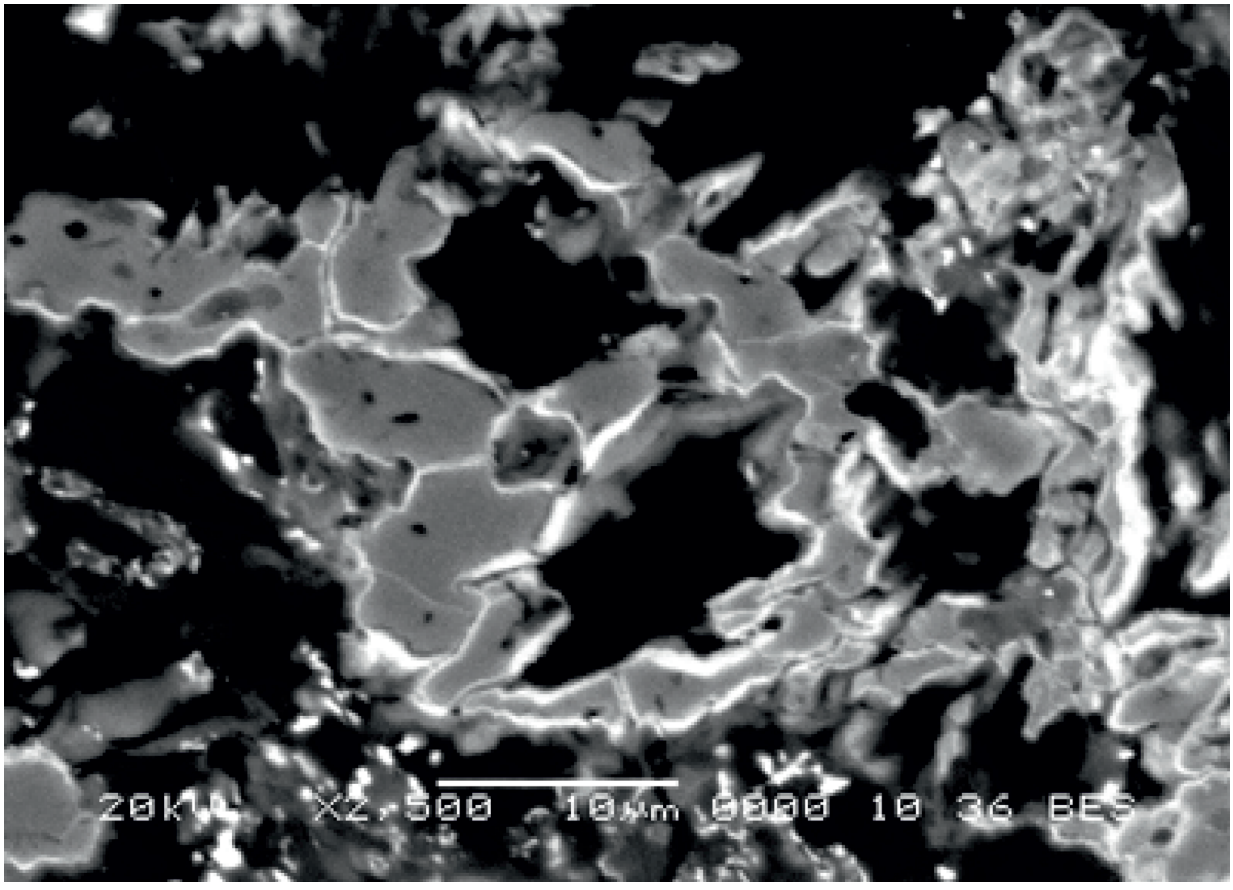

Рис. 6. Электронный микроскоп «JSM-6380LV JEOL»
Образование каёмок сульфидов серебра на границах катаклазированных зёрен пирита

повышенных количеств гравитационно извлекаемого золота.

Мы полагаем, что химическое преобразование сульфидов в окисные формы железа, скорее всего, и является своеобразным «спусковым механизмом», запускающим множество химических реакций как в коренных породах, так и в породах аллювия. От появления в системе сильных и слабых кислот и щелочей до миграции и «самосборки» минеральных форм золота, и, соответственно, экстракции соединений благородных металлов из вмещающих пород, а в итоге к осаждению устойчивых форм соединений благородных металлов в аллювиальных отложениях.

Этот переход в более устойчивые соединения проявлен отнюдь не в форме простого механического движения вниз по склону частиц золота в аллювий водотоков с последующей концентрацией их в промежуточном коллекторе (коре выветривания). В значительной степени он выражен в виде сложных физико-химических реакций, а также криогенных процессов, вызывающих не только разрушение вмещающих пород, но и изменение концентраций некоторых химических элементов, при участии таких активных элементов, как железо, сера и хлор. Совокупность данных процессов и приводит к преобразованию минеральных форм драгоценных металлов, их «самоочистке» и укрупнению от первично незначительных до гравитационно извлекаемых размеров в нижних частях склоновых фаций и аллювии.

Проведённые авторами исследования предполагают, что образование россыпей в районе не требует гипотетической связи с коренными месторождениями типа Сухого Лога. Поскольку слишком много должно было существовать и разрушаться им подобных в Бодайбинском районе для образования россыпей, откуда только крупного золота было добыто более 1500 тонн.

Что же касается «рубашки» гидроокислов железа, постоянно ассоциирующейся с золотом, по крайней мере с его крупными частицами, то такая связь, несомненно, прослеживается, от связи микро- и наноминеральных форм золота во вмещающих породах до крупных его форм в аллювиальных отложениях. Но для микро- и наночастиц сплошное их «бронирование» гидроокислами железа может оказаться и отрицательным фактором, мешающим их миграции и росту.

Авторы, как и большинство геологов, считают, что процессы химического и физического выветривания приводят к раскрытию ранее законсервированных микротрещин рудного этапа и образованию более проницаемой среды. Применяя изложенное выше к роли физического и химического выветривания на изучаемой территории, предполагаем, что верхние слои ранее малопроницаемых кристаллических сланцев, содержащих значительные количества минеральных форм драгоценных элементов, при выходе их на поверхность становятся все более проницаемой средой. Средой, находящейся в зоне развития криогенного гипергенеза, где вновь, как и на этапе рудообразования, начинают интенсивно циркулировать растворы, образующие и растворяющие минералы и соединения, в том числе диффузионные и коллоидные частицы драгоценных металлов. Которые постепенно, но отнюдь не за миллионы лет (так как современная речная сеть района сформировалась максимум в начале голоцена), переходят в более устойчивые «самородные» формы. Конечно, сказанное не исключает вовлечения в эти процессы и крупных частиц «самородных форм», существовавших в рудах. Но, по-видимому, их превалирующая роль в образовании россыпей сильно преувеличена.

Это приводит нас к мнению, что только с момента начала химического выветривания в верхних частях рудных месторождений и движения продуктов выветривания по склонам начинается формирование россыпи. В первые этапы происходит высвобо-

ждение микро- и наночастиц многообразных минеральных форм из породного матрикса. Далее следует их преобразование в металлическую форму, к «самосборке» в коре выветривания и концентрации в русловых фациях, в виде «самородного» золота. Таким образом, неводным потокам принадлежит доминирующая роль в образовании концентраций «самородных форм» в россыпи. На самом деле, они лишь вскрывают верхние участки рудных тел, которые уже претерпели радикальные изменения в зоне гипергенеза, способствуя концентрации металлического золота в аллювиальных отложениях.

ВЫВОДЫ

- В коренных породах участка исследований, представленных кристаллическими сланцами, установлены разнообразные минералы и химические соединения золота и серебра.
- Основными минералами золота, в исследованных образцах коренных пород, являются не самородные (ноль-валентные) его формы, а теллуридные, селенидные, ртутистые и фторауратные соединения, которые активно вступают в обменные реакции.
- Для образования россыпей на исследованном участке достаточно наличия тех минеральных соединений драгоценных элементов во вмещающих породах, которые существовали изначально, без дополнительного привноса рудного материала из удалённых источников.
- Окисление сульфидов в криогенных зонах служит началом реакций преобразования активных химических соединений в самородные (ноль-валентные) металлы.
- Вероятнее всего, сначала в корах выветривания, а затем в аллювии эти активные минеральные соединения драгоценных элементов переходят в более устойчивые формы, в том числе и в самородные (ноль-валентные) металлы.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Жабин А.В., Кузнецов Ю.А., Дубков А.А. К вопросу о применении рентгеноструктурного и энерго-дисперсионного анализов для обнаружения платиноидной и рениевой минерализации на золоторудных проявлениях (на примере золото-сульфидных месторождений Центрального Сихотэ-Алиня Приморского края) // Недра Поволжья и Прикаспия. – 2021. – Вып. 104. – С. 30-38.

2. Жабин А.В., Дубков А.А., Золотарёва Г.С., Кузнецов Ю.А. Импактиты в четвертичных отложениях Воронежской антеклизы // Недра Поволжья и Прикаспия. – 2020. – Вып. 102. – С. 39-52.

3. Иванов А.И., Агеев Ю.М. Закономерности формирования золоторудных месторождений золота Бодайбинского рудного района // Известия Сибирского отделения, секции наук о Земле. – Иркутск: 2005. – Вып. 2. – С. 37-49.

4. Избеков И.Д. Образование и эволюция россыпей. – Новосибирск: Наука, 1985. – 189 с.

5. Лавёров А.П., Дистлер В.В., Прокофьев В.Ю., Юдовская М.А. Новые данные об условиях рудообразования флюидов золотоплатинового месторождения Сухой Лог // Доклады РАН, 2000.– Т. 371. – №1 – С. 86-92.

6. Матвиенко В. Н., Калашников Ю. Д., Нарсеев В. А. Роль природных кластеров благородных металлов как источника рудного вещества при формировании месторождений // Вестник ВГУ. Серия Геология. – 2018. – №3. – С. 36-49.

7. Онищенко С.А. Сокерина Н.В. Особенности формирования золоторудного черносланцевого месторождения Голец Высочайший (Восточная Сибирь) // Записки Российского Минералогического Общества. – 2021. – Ч. CL. – №1. – С. 63-73.

8. Петровская Н.В. Самородное золото. – М.: Наука, 1973. – 332 с.

9. Сахно В.Г., Кузнецов Ю.А. Платиноиды золотосеребряных месторождений и рудопроявлений Охотско-Чукотского и Восточно-Сихотэ-Алинского вулканогенно-плутонических комплексов // Материалы X Всероссийской конференции «Геология минеральные ресурсы северо-востока России.– Якутск, 2020. – С. 285-290.

10. Сахно В.Г., Жабин А.В., Кузнецов Ю.А., Дубков А.А., О находках элементов платиновой группы, драгоценных и редких металлов в породах баженовской свиты (Западная Сибирь) и сравнение их с известными рудными объектами Северо-востока РФ // Недра Поволжья и Прикаспия. – 2020. – Вып. 101. – С. 79-89.

11. Сотников В.И. Золото в системе коренной источник – россыпь // Соровский образовательный журнал. –1998. С. 66-71.

12. Тарасова Ю.И., Будяк А.Е. и др. Типоморфизм, типохимизм и изотопно-геохимические характеристики железа месторождения Голец Высочайший (Восточная Сибирь) // Записки Российского Минералогического Общества. – 2021. – Ч. CL. – №1. – С. 63-75.

13. Таусон В.Л., Немеров В.К. и др. Парагенетические отношения пирита углерода и золота на месторождении Сухой Лог и типоморфизации поверхности пирита // ДАН. – 2009. – Т. 426. – №4. – С.529-532.

14. Шило Н.А. Учение о россыпях. Теория россыпеобразующих рудных формаций и россыпей. – М.: 1981. – 383 с.