

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА, СЕРЕБРА И СОПУТСТВУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОТОКАХ РАССЕЯНИЯ ЗОЛОТО-СЕРЕБРЯНЫХ ЗОН ДУКАТСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (*Северо-Восток России*)

Р.Г. Кравцова, Ю.И. Тарасова, А.С. Макшаков, Л.А. Павлова

Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия

Изучены особенности распределения и формы нахождения (ФН) главных (Au, Ag) и основных сопутствующих элементов-индикаторов оруденения (Hg, Sb, As, Pb, Zn, Cu) в образцах, отобранных из рыхлых отложений литохимических потоков рассеяния (ЛПР) золото-серебряных (Au-Ag) зон Дукатского месторождения. С помощью рудных микроскопов ПОЛАМ-312, ПОЛАР-3 и рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализа на приборах Superprobe-733 и JXA-8200 (JEOL Ltd, Tokyo, Japan) выявлены основные минеральные и неминеральные формы нахождения элементов-индикаторов Au-Ag оруденения.

Установлено, что особенности распределения и ФН рудных элементов в рыхлых (аллювиальных) отложениях водотоков, дренирующих Au-Ag зоны, теснейшим образом связаны с особенностями состава руд. Так же как в рудах, главными элементами-индикаторами оруденения являются Au и Ag, основными сопутствующими — Hg, Sb, As, Cu, Pb, Zn. В аллювиальных отложениях золото представлено электрумом, тонкодисперсными частицами (дисперсными, ультрадисперсными, коллоидно-дисперсными) и так называемым «связанным», в основном с сульфидами, невидимым Au (сорбционной составляющей и производными от нее). Серебро, кроме гипергенных образований, микровключений и ультраразмерных частиц, представлено самородной формой и частично сохранившимися сульфидами и сульфосолями. Остальные элементы (Hg, Sb, As, Pb, Zn, Cu) — это сложные по составу вторичные минералы и сохранившиеся в разной степени корродированные обломки зерен пирита, халькопирита, галенита, сфалерита, среди которых преобладают оксиды и гидроксиды, в основном Fe. В меньшей степени проявлены различные соли и водорастворимые сульфаты Fe, Cu, Pb, Zn.

При изучении условий формирования ЛПР в зонах криолитогенеза, где процессы физического выветривания считаются главными, нельзя не учитывать роль химических факторов, в первую очередь хемосорбции. Доказательством тому служит обогащенность золотом, серебром и в целом рудными элементами рыхлого материала «тонких» классов. Высокий процент в рудах и ореольных зонах подвижных, легко выщелачиваемых обычными кислотами форм элементов, в сочетании с широким развитием в этих классах глинистых минералов и гидроксидов, оказывает на процессы хемосорбции существенное влияние. Так, в русловых отложениях головной части потока доля тонкодисперсного и «связанного» Au, элемента, как традиционно считается, меньше всего подверженного процессам химического выветривания, достигает 50—60 %. На долю самородного Au (электрума) приходится 40—50 %. По мере транспортировки материала происходит его разубоживание. В шлейфе ЛПР на фоне снижения концентраций увеличивается доля тонкодисперсного и так называемого «связанного» Au (до 95 %). Очевидно, что эти две формы Au в потоках по сравнению с рудами преобладают.

В практическом отношении ФН элементов-индикаторов Au-Ag оруденения во вторичных средах, так же как и в первичных, служат эффективным критерием оценки перспектив геохимических аномалий, выявленных по ЛПР. Они являются надежным показателем их рудно-формационной принадлежности и имеют важное практическое значение. Предполагается, что в ряде случаев с их помощью можно оценить уровень эрозионного среза дренируемых зон и участков, т.е. прогнозировать оруденение на глубину. Этот критерий может успешно применяться на всех стадиях геохимического изучения рудоносных площадей, начиная с прогнозной оценки перспектив выявленных по ЛПР аномалий на слабоизученных территориях, до детальных работ на конкретных, уже известных рудных объектах.

Золото, серебро, сопутствующие элементы, формы нахождения, потоки рассеяния, особенности формирования.

DISTRIBUTION AND MODES OF OCCURRENCE OF Au, Ag, AND ASSOCIATED ELEMENTS IN THE SEDIMENT STREAMS OF Au–Ag ZONES AT THE DUKAT DEPOSIT (*northeastern Russia*)

R.G. Kravtsova, Yu.I. Tarasova, A.S. Makshakov, and L.A. Pavlova

We studied the distribution and modes of occurrence of the main (Au and Ag) and major associated elements indicating mineralization (Hg, Sb, As, Pb, Zn, and Cu) in samples of loose sediments from lithochemical sediment streams of Au–Ag zones at the Dukat deposit. The major mineral and nonmineral modes of occurrence of elements indicating Au–Ag mineralization have been detected with POLAM-312 and POLAR-3 ore

microscopes and by X-ray electron probe microanalysis with Superprobe 733 and JXA 8200 (JEOL, Tokyo, Japan) microprobes.

The distribution and modes of occurrence of ore elements in the loose (alluvial) sediments of streams draining the Au–Ag zones are closely related to the ore composition. As in the ores, the main elements indicating mineralization are Au and Ag, while the major associated elements are Hg, Sb, As, Cu, Pb, and Zn. Gold in alluvial sediments occurs as electrum, fine (dispersed, ultradispersed, and colloid–dispersed) particles, and the so-called “bound” (predominantly with sulfides) invisible Au (sorption component and its derivatives). Silver occurs not only as hypergene forms, microinclusions, and ultrasized particles but also in native form and as partly preserved sulfides and sulfosalts. The other elements (Hg, Sb, As, Pb, Zn, and Cu) are observed as secondary minerals of complex composition and differently preserved corroded fragments of pyrite, chalcopyrite, galena, and sphalerite grains, dominated by oxides and hydroxides (mainly those of iron). Salts and water-soluble sulfates of Fe, Cu, Pb, and Zn are less widespread.

In study of the conditions of sediment stream formation in cryolithogenesis zones, where physical weathering is regarded as the major process, chemical factors (first of all, chemisorption) should also be taken into account. This is proven by the enrichment of “fine” loose material in Au, Ag, and ore elements in general. The high percentage of mobile forms of elements, which are easily leached out by ordinary acids, in ores and aureoles, together with the widespread occurrence of clay minerals and hydroxides, has a significant influence on chemisorption. For example, the portion of fine and “bound” Au, the element considered to be the least prone to chemical weathering, reaches 50–60% in the riverbed sediments of the stream head. Native Au (electrum) makes up 40–50%. The material is diluted during its transport. As Au content decreases, the portion of fine and “bound” Au in the sediment stream increases to 95%. Evidently, these two Au forms are predominant in streams as compared with ores.

The modes of occurrence of elements indicating Au–Ag mineralization in secondary environments, as in primary ones, serve as an effective criterion for assessment of the potential of geochemical anomalies detected in sediment streams. They are a reliable indicator of ore associations, which is of practical significance. We think that modes of occurrence can sometimes be used to estimate the erosion level of drained zones and sites (i.e., to predict mineralization to depth). This criterion can be successfully applied at all stages of geochemical study of ore-bearing areas, from the prediction of the potential of anomalies detected in sediment streams in poorly studied areas to the detailed exploration of known ore objects.

Gold, silver, associated elements, modes of occurrence, sediment streams, formation conditions

ВВЕДЕНИЕ

При проведении разномасштабных литохимических съемок по потокам рассеяния на территории Северо-Востока России, уникальной по концентрации эпitherмальной Au–Ag минерализации, установлено, что ряд геохимических аномалий в зонах непромышленной рудной минерализации по контрастности и элементному составу мало отличимы от аномалий, связанных с промышленными Au–Ag рудами. Кроме того, выявленные по литохимическим потокам рассеяния (ЛПР) экзогенные аномальные геохимические поля (АГХП) по сравнению с эндогенными полями имеют относительно бедный компонентный состав и низкую контрастность, зачастую мы видим нарушение качественных, а иногда и количественных соотношений элементов [Кравцова и др., 1996; Кравцова, 2007, 2010]. Все это в значительной степени затрудняет интерпретацию выявленных аномалий и их оценку традиционными методами. Очевидно, что необходимы дополнительные критерии.

Опыт работы на Северо-Востоке России, изучение вещественного состава руд и связанных с ними эндогенных АГХП эпitherмальных Au–Ag месторождений показал, что к таким дополнительным критериям относятся формы нахождения (ФН) элементов-индикаторов оруденения [Кравцова, Соломонова, 1984; Кравцова, Андрулайтис, 1989, 1991; Таусон, Кравцова, 2002; Таусон и др., 2008, 2010, 2014; Кравцова, 2010]. Первые результаты по изучению ФН главных для этого типа минерализации элементов — Au и Ag в аллювиальных отложениях ЛПР были опубликованы в работах [Кравцова и др., 2010а,б]. Полученные данные подтвердили перспективность выбранного направления и необходимость продолжения исследований. Основная их цель — выявление особенностей формирования ЛПР в условиях зоны криолитогеоза, разработка на этой основе эффективных критериев оценки аномалий.

Особенно актуально это для хорошо изученных территорий, где уже был проведен значительный объем поисковых и оценочных работ. К таким территориям на Северо-Востоке России относится Омсукчанский рудный район (центральная часть Охотско-Чукотского вулканогенного пояса), где находится крупнейшее по запасам серебра Дукаатское Au–Ag месторождение, на площади которого проводились исследования (рис. 1).

В статье, наряду с дополнением и обобщением данных по ФН Au и Ag, впервые рассмотрены закономерности распределения и ФН остальных сопутствующих элементов-индикаторов Au–Ag оруденения, таких как Hg, Sb, As, Pb, Zn, Cu.

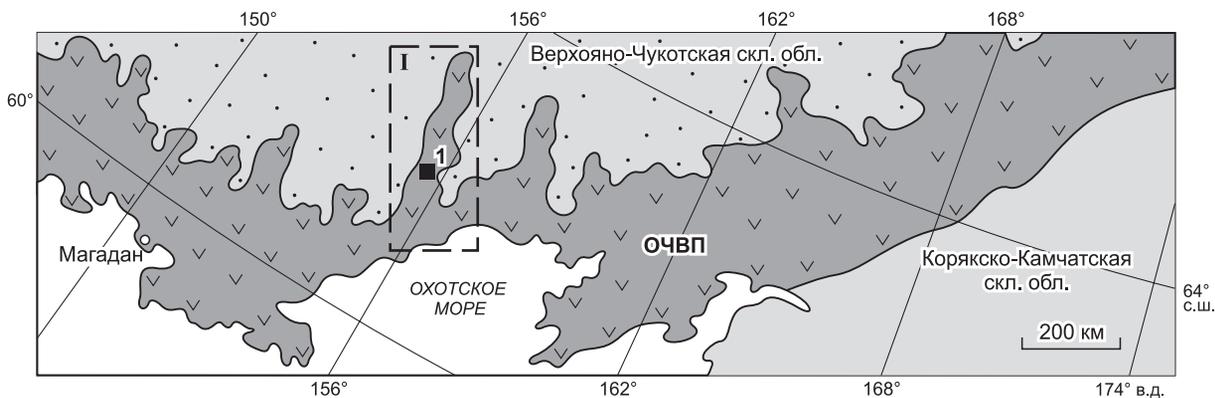


Рис. 1. Охотско-Чукотский вулканогенный пояс (ОЧВП).

Омсукчанский рудный район (I). Золото-серебряное месторождение Дукаат (1).

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ

Детальные работы по изучению особенностей распределения и ФН элементов-индикаторов оруденения в рыхлых отложениях ЛППР проводились на участке Чайка (северо-восточная часть площади Дукаатского Au-Ag месторождения), где наиболее хорошо сохранились «первичные» Au-Ag руды. Это позволило выбрать участок Чайка в качестве эталонного объекта.

Дукаатское Au-Ag месторождение является одним из крупнейших в мире. В нем сосредоточено около 14000 т Ag и до 40 т Au [Константинов и др., 2003]. Геологическое строение месторождения, его минералогия и геохимия изучались многими исследователями [Наталенко и др., 1980; Сахарова, Брызгалов, 1981; Сидоров и др., 1989; Шило и др., 1992; Кравцова, Захаров, 1996; Константинов и др., 1998, 2003; Двуреченская, 2001; Кравцова и др., 2003; Филимонова и др., 2006; Кравцова, 2007, 2010; и др.].

В геологическом разрезе Дукаатского месторождения преобладают породы кислого состава (рис. 2). Рудовмещающими являются раннемеловые вулканиты аскольдинской свиты — риолиты, риодациты и их игнимбриты (центральная и северо-восточная части площади). На флангах месторождения появляются позднемеловые риолиты и риодациты, раннепозднемеловые андезиты покровных и субвулканических фаций, раннемеловые вулканогенно-осадочные породы (конгломераты, алевролиты, гравелиты),

позднетриасовые отложения (алевролиты, известняки, туфопесчаники). В юго-восточной части площади отмечен выход раннемелового крупного субвулканического тела невадитов. Оруденение контролируется Диагональным, Восточным, Марганцевым и Амплитудным разломами.

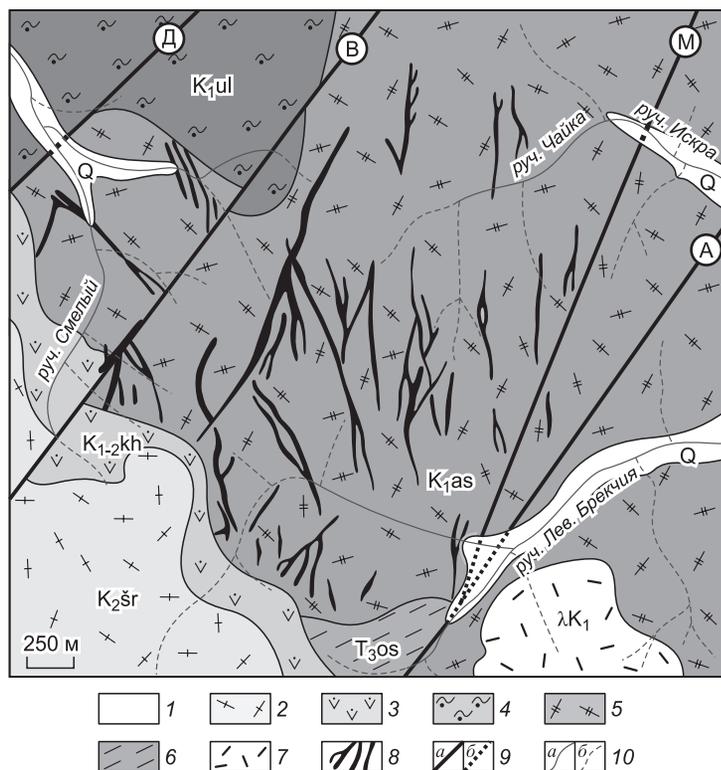


Рис. 2. Схема геологического строения Дукаатского Au-Ag месторождения.

Составлена по материалам [Константинов и др., 1998]: 1 — рыхлые четвертичные отложения (Q); 2 — риолиты и риодациты, шороховская свита (K_2sr); 3 — андезиты и андезитобазальты, каховская свита ($K_{1-2}kh$); 4 — конгломераты, гравелиты и алевролиты, улисская свита (K_{1ul}); 5 — мелкопорфировые риолиты, флюиодальные риодациты, игнимбриты риолитов и риодацитов, аскольдинская свита (K_{1as}); 6 — алевролиты, туфопесчаники и известняки, останцовая свита (T_{3os}); 7 — субвулканическое тело невадитов (λK_1); 8 — рудные тела; 9 — основные рудоконтролирующие разломы (a — достоверные, б — предполагаемые): Д — Диагональный, В — Восточный, М — Марганцевый, А — Амплитудный; 10 — водотоки: a — постоянные, б — временные.

Для преобладающей части рудоносных зон месторождения характерен полиформационный и полистадийный характер развития рудной минерализации. По преобладающему минеральному и компонентному составу, по относительно закономерной смене в пространстве (от нижнерудных горизонтов к верхнерудным), выделены три основные продуктивные рудные стадии: ранняя серебро-полиметаллическая (Ag-Pb) — кварц-серицитовые жилы, затем золото-серебряная (Au-Ag) — кварц-полевошпатовые жилы и поздняя, преимущественно серебряная (Ag) — кварц-родонитовые жилы. В составе Ag-Pb жил часто присутствует полевой шпат, хлорит и железистые карбонаты, Au-Ag — родонит, хлорит и серицит, Ag — родохрозит, пиролюзит. На подрудных интервалах часто проявлена непромышленная полисульфидная олово-серебряная (Sn-Ag) минерализация, представленная прожилками кварц-эпидот-хлоритового состава.

Золото-серебряные руды встречаются реже и установлены лишь на отдельных участках. Наиболее интересен в этом отношении участок Чайка. Выявленные здесь руды относятся к типичной эпитермальной Au-Ag формации руд вулканогенного типа [Кравцова, 2010]. Жильный минеральный состав вулканогенных Au-Ag руд достаточно прост: кварц (до 95 %), адуляр (до 25 %), гидрослюда и серицит (до 5 %), реже хлорит и сидерит (до 1—2 %). К числу важнейших серебросодержащих минералов относятся акантит, самородное Ag, кюстелит, пираргирит, в меньшей степени штернбергит, прустит, полибазит, стефанит. Самородное Au представлено тонкодисперсными (0.01 мм и меньше) и мелкими (0.01—0.1 мм) частицами. Если в полиформационных Au-Ag рудах преобладают кюстелит (100—300 %) и электрум пониженной пробы (300—450 %), то для вулканогенных руд участка Чайка типичен обычный электрум (450—600 %), редко отмечается низкопробное самородное Au (600—680 %).

По данным рационального анализа собственно Au-Ag руд, на долю тонкодисперсного Au в общем балансе приходится до 60 %, на долю электрума — до 40 %. Незначительное количество Au (1—5 %) связано с сульфидами (микровключения, микропримеси). Микропримесные и наноразмерные формы Au в эпитермальных Au-Ag рудах были установлены в пирите [Таусон, Кравцова, 2002; Таусон и др., 2008]. В литературе такое Au традиционно принято называть «невидимым». Из других рудных минералов наиболее распространенными являются галенит и сфалерит. Реже встречаются пирит, пирротин, халькопирит, магнетит. К редким минералам относятся марказит, арсенопирит, франкеит, магноякобит, блеклая руда, станнин, антимонит, фаматинит, вюртцит, халькостибит, борнит, киноварь.

В зонах гипергенеза (зонах окисления) месторождения из первичных минералов серебра в виде реликтов постоянно отмечаются самородное Ag, электрум, разрушенные зерна акантита, пираргирита, штернбергита. Часто встречаются частично сохранившиеся зерна и обломки галенита, сфалерита, пирита, пирротина, халькопирита, магнетита. Преобладающим развитием пользуются гипергенные минералы, такие как оксиды и гидроксиды Fe и Mn, ярозит, англезит, церуссит, смитсонит, халькозин, ковеллин, реже встречаются самородные S и Cu, водорастворимые сульфаты Cu, Fe и Zn — малахит, азурит, борнит, скородит и др. [Сидоров и др., 1989; Двуреченская, 2001]. Из нерудных минералов широко распространены выветрелые и разрушенные кварц и полевые шпаты (до 60 %), серицит (до 40 %), гидрослюда и каолинит (до 10 %), карбонаты, эпидот и хлорит (до 5 %).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для детального изучения поведения рудных элементов, в первую очередь Au и Ag, и их ФН в рыхлых отложениях ЛПР Дукатского месторождения было выполнено геохимическое опробование водотоков I и II порядков, дренирующих водораздел с промышленными зонами и жилами, представленными вулканогенными Au-Ag рудами (участок Чайка). Опробование проводилось согласно общепринятой при геохимических съемках 1:50000 м-ба по ЛПР методике. Шаг отбора проб аллювия составлял 200—250 м при среднем расстоянии между руслами — 0.5—0.7 км, плотность опробования — 6—10 проб на 1 км² площади (рис. 3). Вес рядовой геохимической пробы — 200—300 г [Инструкция..., 1983].

Все рядовые геохимические пробы (поисковая фракция –1 мм) прошли спектральный приближенно-количественный анализ (СПКА) на широкий круг элементов [Эмиссионный..., 1976], аналитик В.А. Кишечникова.

Определение Au проводилось атомно-абсорбционным методом (АА) с предварительной экстракцией сульфидами нефти [Торгов, Хлебникова, 1977]. Замеры проводились на атомно-абсорбционном спектрометре фирмы Perkin-Elmer М-303 с пределом обнаружения 0.01 г/т, аналитик О.И. Бессарабова. Анализ содержания Hg также осуществлялся атомно-абсорбционным методом с применением кислотного разложения [Новиков и др., 1971]. Предел обнаружения — 0.005 г/т, аналитики Л.Д. Андрулайтис, О.С. Рязанцева. Для количественного определения содержания Ag и Sb использовалась методика прямого атомно-абсорбционного определения (ПАА), исключая стадию химической обработки проб [Воробьева и др., 1987]. Пределы обнаружения: Ag — 0.005 г/т, Sb — 0.01 г/т, аналитик С.Е. Воробьева.

Для анализа Au и Ag применялся также сцинтилляционный анализ (СА). Метод предназначен для экспрессного приближенно-количественного определения Au и Ag в рудах, породах и рыхлых отложениях в диапазоне содержаний от 0.01 до 5—10 г/т и размером частиц больше 1—2 мкм. Наряду с кон-

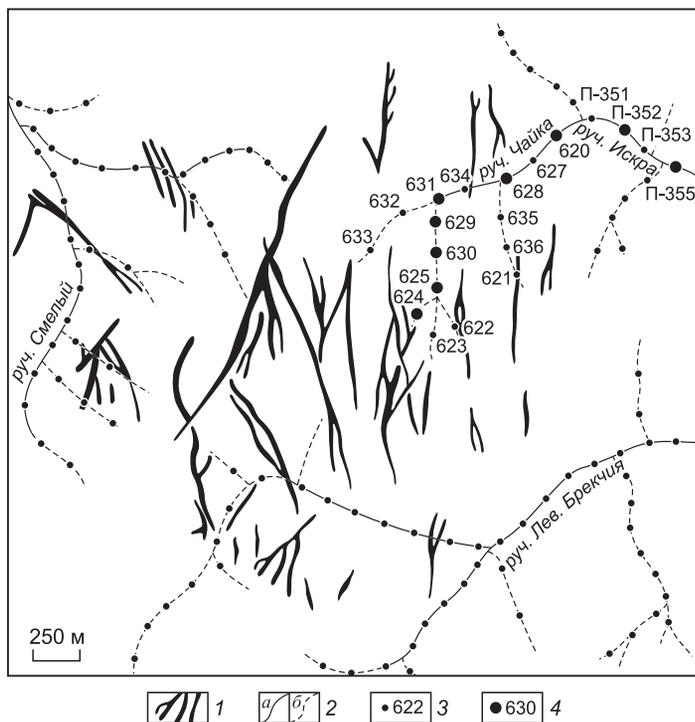


Рис. 3. Схема геохимического опробования водотоков I—II порядков (съёмка 1:50000 м-ба по ЛПР на площади Дукатского Au-Ag месторождения):

1 — рудные тела; 2 — водотоки: а — постоянные, б — временные; 3, 4 — точки отбора проб: 3 — рядовых геохимических, 4 — объёмных минералого-геохимических (протолочек).

центрациями, методика позволяет приближенно оценивать гранулометрический состав частиц самородного Au и Ag [Прокопчук, 1994], аналитик С.И. Прокопчук.

Для изучения вещественного состава аллювия по ручьям Чайка и Искра в девяти точках потока были отобраны объёмные минералого-геохимические пробы (протопочки) весом до 6 кг (см. рис. 3). Все протопочки были рассеяны на следующие фракции (мм): +2, -2...+1, -1.0...+0.25 и -0.25.

Изучение элементного состава по этим фракциям осуществлялось: методом количественного атомно-эмиссионного анализа (КХА) по способу вдувания-просьпки [Васильева, Шабанова, 2005], аналитик И.Е. Васильева; методами спектрального количественного анализа (СКА) [Эмиссионный..., 1976], аналитик А.И. Кузнецова; Au и Hg, так же как и в рядовых геохимических пробах, определялась АА; Ag и Sb — ПАА методами и теми же аналитиками. Отличие — замеры Au проводились на атомно-абсорбционном спектрометре фирмы Perkin-Elmer-405 с пределом обнаружения Au 0.002 г/т. Все анализы были выполнены в аналитических лабораториях ИГХ СО РАН, г. Иркутск.

Для проведения минералогических исследований из этих же фракций были изготовлены монтированные аншлифы. Изучение минеральных форм было начато с помощью рудных микроскопов ПОЛАМ-312 и ПОЛАР-3. В процессе работы стало очевидно, что изучение ФН рудных элементов в аллювиальных отложениях ЛПР традиционными минераграфическими методами малоэффективно. Успешное решение подобного типа задач напрямую связано с определением состава вещества в микронных включениях и только локальными методами, в частности, методом рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализа — РСМА. Поэтому дальнейшая работа проводилась с помощью микроанализаторов Superprobe-733 и JXA-8200 (JEOL Ltd, Tokyo, Japan) по имеющимся [Павлова, Парадина, 1990] и специально разработанным методикам [Павлова, Кравцова, 2006].

Материалом для исследования служили образцы, изготовленные из разных фракций аллювия, обогащенные с помощью бромформа рудным материалом. Изготавливали образцы для анализа в виде брикетных аншлифов — шайб. Поверхности зерен исследовали в режиме растрового электронного микроскопа в обратнорассеянных и вторичных электронах на предмет выявления включений, содержащих рудные элементы. С помощью энергодисперсионного спектрометра EX-84055MU идентифицировали состав найденных включений. Изменение содержания элементов по поверхности изучали по картам распределения рентгеновского излучения элементов, получаемым с помощью волновых спектрометров. Определение химического состава найденных включений проводили, управляя съёмкой и пересчитывая регистрируемые относительные интенсивности в концентрации с помощью программного обеспечения микроанализатора JXA-8200.

РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗОЛОТА, СЕРЕБРА И СОПУТСТВУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ-ИНДИКАТОРОВ ОРУДЕНЕНИЯ

При изучении геохимического состава руд и эндогенных АГХП было установлено, что основными элементами-индикаторами оруденения, общими для всех Au-Ag зон Дукатского месторождения, являются Au, Ag, Hg, Sb, As, Pb, Zn, Cu. Главные из них — Au и Ag, основные сопутствующие — Hg, Sb, As, Pb, Zn, Cu. Выявлен зональный характер распределения этих элементов в пространстве. По геохимическому составу руд и связанных с ними эндогенных АГХП, по степени убывания контрастности

образующих эти поля и руды элементов, по распределению максимумов градиентов концентраций этих же элементов относительно друг друга установлен общий для изученных зон ряд вертикальной зональности (по падению): Hg → Sb, As → Ag, Au → Cu, Pb, Zn [Кравцова, 2010].

В распределении рудных элементов в аллювиальных отложениях ЛПР Au-Ag зон Дукатского месторождения было установлено, что, так же как в рудах и эндогенных ореолах, аномальные концентрации в потоках рассеяния образуют в основном те же самые элементы — Au, Ag, Hg, Sb, As, Pb, Zn и Cu. Содержание и характер распределения основных элементов-индикаторов оруденения в рядовых геохимических пробах, отобранных из рыхлых отложений водотоков I—II порядков (ручьев Чайка и Искра), дренирующих водораздел с промышленными Au-Ag зонами и жилами, приводятся в табл. 1.

Наиболее высокие концентрации главных (Au, Ag) и ряда сопутствующих (Sb, Pb, Zn, Cu) элементов-индикаторов оруденения были установлены в аллювиальных отложениях головной части основного потока (см. рис. 3, табл. 1). Та же тенденция, хотя и менее отчетливая, характерна для такого подвижного элемента, как Hg. Максимальные концентрации этого элемента (0.165 г/т) были установлены в головной части основного потока. В то же время достаточно высокие содержания Hg (до 0.110 г/т) появляются и в шлейфе. Таким образом, по сравнению с Au, Ag, Sb, Pb, Zn и Cu, ЛПР Hg имеют более широкое площадное распространение. Еще более значительный площадной характер развития установлен для As. Этот элемент является одним из важнейших типоморфных элементов-индикаторов Au-Ag оруденения. На площади Дукатского месторождения As образует протяженные контрастные ЛПР. На отдельных участках содержания этого элемента в аллювии доходят до 1000 г/т. На участке Чайка высококонтрастных аномалий As по ЛПР не выявлено (см. рис. 3, табл. 1).

Как показали проведенные исследования, наибольшее количество рудных минералов было обнаружено в аллювиальных отложениях фракции –0.25 мм, наименьшее — в крупной фракции +2 мм.

Таблица 1. Содержание рудных элементов (г/т) в рядовых геохимических пробах, отобранных из рыхлых отложений водотоков I—II порядков, руч. Чайка — руч. Искра. Дукатское Au-Ag месторождение, участок Чайка

№ пробы	Au	Ag	Hg	Sb	As	Cu	Pb	Zn
Головная часть основного потока								
*624	0.14	8	0.125	<30 (6.6)	40	200	1000	1000
*625	0.02	10	0.112	<30 (25.0)	<10	600	2000	1000
*630	0.06	15	0.098	<30 (12.3)	30	200	4000	300
*629	0.08	20	0.165	30 (20.7)	40	400	5000	800
633	0.04	10	0.150	30 (16.1)	30	1000	5000	400
632	<0.01	1.5	0.067	30 (17.3)	100	150	100	150
*631	0.08	10	0.080	<30 (11.9)	30	150	2000	300
623	<0.01	10	0.067	<30 (6.8)	10	500	1500	800
622	0.01	10	0.055	<30 (3.4)	<10	500	40	800
Головная часть бокового потока								
621	0.03	10	0.110	<30 (10.3)	10	300	500	300
636	0.01	8 (8.7)	0.110	<30 (7.0)	30	60	500	400
635	0.03	10 (16)	0.085	<30 (9.4)	30	200	500	300
Шлейфовая часть потока								
634	0.07	8	0.090	<30 (10.9)	30	200	1000	300
*628	0.04	10	0.110	<30 (10.0)	30	300	1500	300
627	0.01	10	0.100	<30 (10.0)	40	500	2000	500
*620	<0.01	10	0.090	<30 (14.3)	20	400	500	300
п-351	0.03	2 (5.6)	0.067	<30 (6.1)	100	100	1000	500
*п-352	0.01	5 (8.3)	0.090	<30 (12.4)	200	150	2000	500
п-353	0.05	10 (9.6)	0.105	<30 (8.6)	60	200	2000	500
*п-355	0.04	6 (8.8)	0.075	<30 (7.9)	40	150	1000	400

Примечание. Определение Au и Hg проводилось АА методом, остальных элементов — СПКА. В скобках приведены содержания Ag и Sb по данным прямого атомно-абсорбционного определения. Номера точек отбора проб расположены по направлению формирования потока, от головной части к шлейфу.

* Точки, в которых, наряду с рядовой геохимической пробой, проводился отбор объемных минералого-геохимических проб (протолок): 620, 624, 625, 628, 629, 630, 631, п-352, п-355.

Таблица 2. Содержание рудных элементов (г/г) в минералого-геохимических пробах (протолочках), отобранных из рыхлых отложений водотоков I—II порядков, руч. Чайка — руч. Искра. Дукатское Au-Ag месторождение, участок Чайка

Фракции, мм	624	625	630	629	631	628	620	п-352	п-355
Au									
+2	0.811(5)	0.031(5)	0.014(2)	0.042(2)	0.071(1)	0.029(1)	0.019(1)	0.011(1)	0.012(1)
-2...+1	0.381(3)	0.092(3)	0.044(2)	0.060(2)	0.045(1)	0.014(1)	0.051(1)	0.029(1)	0.017(1)
-1.0...+0.25	2.652(3)	0.180(4)	0.037(2)	0.073(2)	0.059(1)	0.042(1)	0.021(1)	0.033(1)	0.054(1)
-0.25	4.232(5)	0.293(5)	0.186(2)	0.179(2)	0.440(1)	0.065(1)	0.065(1)	0.041(1)	0.035(1)
Ag									
+2	> 20(1)	11.82(4)	5.07(1)	17.30(1)	10.48(1)	6.65(1)	3.94(1)	4.92(1)	5.38(1)
-2...+1	> 20(1)	12.23(2)	10.67(1)	15.34(1)	9.97(1)	9.76(1)	10.08(1)	8.63(1)	5.64(1)
-1.0...+0.25	> 20(1)	13.00(3)	11.32(1)	14.22(1)	13.48(1)	10.82(1)	12.40(1)	11.97(1)	11.14(1)
-0.25	> 20(1)	18.33(5)	16.77(1)	14.21(1)	19.46(1)	12.95(1)	15.02(1)	14.56(1)	8.65(1)
Hg									
+2	< 0.005(4)	< 0.005(4)	< 0.005(1)	< 0.005(1)	< 0.005(1)	< 0.005(1)	< 0.005(1)	< 0.005(1)	< 0.005(1)
-2...+1	< 0.005(2)	< 0.005(2)	< 0.005(1)	< 0.005(1)	< 0.005(1)	< 0.005(1)	< 0.005(1)	< 0.005(1)	< 0.005(1)
-1.0...+0.25	0.006(3)	0.009(3)	0.015(1)	0.016(1)	0.019(1)	0.010(1)	0.019(1)	0.022(1)	0.019(1)
-0.25	0.015(4)	0.025(4)	0.027(1)	0.055(1)	0.050(1)	0.028(1)	0.027(1)	0.040(1)	0.040(1)
Sb									
+2	31.71(4)	4.31(4)	3.62(1)	7.68(1)	4.00(1)	4.12(1)	5.27(1)	3.26(1)	3.76(1)
-2...+1	47.11(2)	9.53(2)	5.26(2)	11.26(2)	7.37(2)	5.77(2)	4.90(2)	4.37(2)	3.75(2)
-1.0...+0.25	57.71(3)	11.96(3)	7.22(1)	18.29(1)	9.73(1)	8.09(1)	7.45(1)	5.42(1)	6.85(1)
-0.25	63.67(3)	14.44(4)	13.10(2)	22.01(2)	14.39(2)	11.46(2)	14.91(2)	10.23(2)	7.88(2)
As									
+2	63(1)	33(1)	14(1)	10(1)	16(1)	8(1)	10(1)	12(1)	17(1)
-2...+1	73(1)	36(1)	19(1)	49(1)	20(1)	20(1)	17(1)	22(1)	33(1)
-1.0...+0.25	66(1)	45(1)	33(1)	56(1)	31(1)	19(1)	30(1)	29(1)	53(1)
-0.25	74(1)	42(1)	46(1)	110(1)	64(1)	35(1)	39(1)	50(1)	100(1)
Cu									
+2	164(5)	75(5)	76(2)	140(2)	120(2)	84(2)	53(2)	60(2)	33(2)
-2...+1	230(3)	94(3)	71(2)	165(2)	165(2)	80(2)	125(2)	87(2)	55(2)
-1.0...+0.25	260(4)	135(4)	82(2)	140(2)	250(2)	108(2)	150(2)	135(2)	86(2)
-0.25	426(5)	180(5)	150(2)	335(2)	330(2)	185(2)	260(2)	215(2)	119(2)
Pb									
+2	1285(4)	695(4)	300(2)	330(1)	370(1)	360(1)	190(1)	220(1)	170(1)
-2...+1	1450(2)	1250(2)	450(2)	1400(1)	930(1)	280(1)	610(1)	300(1)	260(1)
-1.0...+0.25	1367(3)	1033(3)	790(2)	1600(1)	950(1)	500(1)	760(1)	820(1)	790(1)
-0.25	1725(4)	1325(4)	940(2)	1700(1)	1400(1)	990(1)	1300(1)	1300(1)	950(1)
Zn									
+2	300(5)	1524(5)	275(2)	405(2)	415(2)	455(2)	360(2)	475(2)	495(2)
-2...+1	343(3)	1733(3)	470(2)	985(2)	590(2)	470(2)	660(2)	480(4)	545(2)
-1.0...+0.25	393(4)	2600(4)	790(2)	1680(2)	895(2)	655(2)	845(2)	790(2)	905(2)
-0.25	538(5)	3020(5)	1810(2)	2800(3)	1300(2)	1000(2)	1395(2)	1245(2)	1590(2)

Примечание. Au и Hg определялись методом АА, Ag и Sb — ПАА, As — КХА, Pb — СКА, Cu и Zn — СКА/КХА. В скобках приводится количество выполненных замеров. Номера точек отбора проб расположены (слева направо) по направлению формирования потока, от головной части к шлейфу.

В целом та же самая закономерность была установлена и по отношению к содержанию всех ранее перечисленных рудных элементов в этих пробах (табл. 2).

Особенности распределения перечисленных выше элементов тесно связаны со многими факторами, важнейшими из которых являются минеральные и неминеральные ФН элементов в рудах и эндогенных ореолах, которые будут рассмотрены ниже.

ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА, СЕРЕБРА И СОПУТСТВУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ-ИНДИКАТОРОВ ОРУДЕНЕНИЯ

С помощью рудного микроскопа были изучены устойчивые в зонах гипергенеза минералы. Широким распространением здесь пользуются оксиды и гидроксиды Fe, а также их переходные разновидности, разнообразие по степени окисления и форме выделения. Преобладают неоднородные обломки гидроксидов Fe нескольких разновидностей — зональные, массивные, пористые. Большая часть оксидов и гидроксидов Fe находится в сростках с нерудной кварц-полевошпатовой составляющей аллювия. Появление их в значительном количестве обусловлено в основном выветриванием вмещающих пород и стоком рыхлого материала по склонам водотоков и зачастую с Au-Ag рудами не связано. В первую очередь это относится к марганцу, отсутствующему в рудах, но широко проявленному в процессах площадной эпидотизации вмещающих пород, где эпидот представлен марганцевой разновидностью — пьмонитом. Реже из вторичных минералов встречаются ярозит, англезит, церуссит, халькозин, ковеллин, гидроксиды и оксиды Mn.

Различаются участки с относительно сохранившимися, близкими к первичным, минералами, такими как сульфиды и сульфосоли Ag, самородное Ag, электрум. Из слабозрушенных минералов с помощью рудного микроскопа хорошо диагностируются в разной степени окисленный магнетит, реже галенит. Самостоятельные зерна галенита встречаются либо в оторочке церуссита-англезита, либо в реликтовой форме. Обломки других сульфидов редки. Это пирит, халькопирит и сфалерит с эмульсионной вкрапленностью халькопирита. Мелкие зерна (0.01—0.005 мм), имеющие высокий показатель преломления, отнесены нами предположительно к серебросодержащим образованиям.

Отчетливо выделяются две разновидности серебросодержащих образований. Первая — хорошо сохранившиеся минералы (акантит?). Они наиболее поздние в ряду кристаллизации, так как включают в себя зерна сульфидов — пирита, халькопирита и сфалерита. Вторая — относится к группе минералов зоны гипергенеза и выделяется при разложении сульфидов — галенита, сфалерита, халькопирита. Образования имеют форму оторочек вокруг зерен сульфидов и состоят из каплевидной смеси, предположительно микровыделений самородного Ag. Часть мелких зерен, имеющих наиболее высокий показатель преломления, можно отнести к интерметаллическим соединениям Ag (кюстелит? электрум пониженной пробности?).

Золото и серебро

Золото. При изучении распределения Au в аллювиальных отложениях водотоков под микроскопом был обнаружен ряд мелких ярких зерен, предположительно золотин, размером до 0.01—0.05 мм (10—50 мкм) и меньше. Для дальнейшей их диагностики был использован электронно-зондовый микроанализ. Установлено, что найденные образования представлены электрумом. Изображение одной из найденных золотин (55 мкм) дано на рис. 4, ее химический состав приведен в табл. 3. Зерно достаточно однородно (точки 3—15 на рис. 4, *a* и табл. 3) и имеет низкую пробность (330—480 ‰). Выделяется небольшой участок (см. рис. 4, *a* и табл. 3, т. 1, 2) с повышенными концентрациями Au (пробность 600—660 ‰).

Кроме собственно минеральной формы в этих отложениях установлено микропримесное невидимое Au. Высокие концентрации невидимого Au были обнаружены в гидроксидах Fe, разрушенных зер-

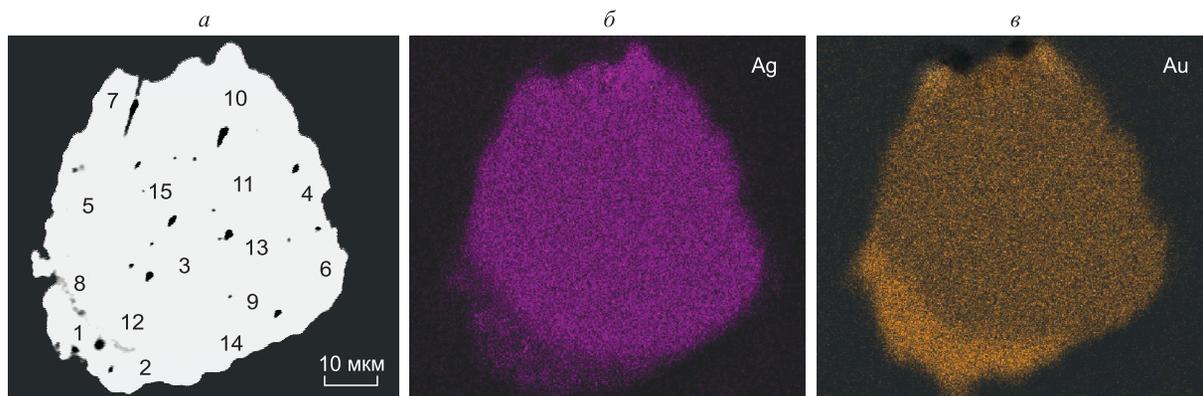


Рис. 4. Мелкое золото (электрум) в рыхлых отложениях водотоков, дренирующих золото-серебряные зоны Дукатского месторождения.

Изображение дано: *a* — в обратнорассеянных электронах; *b*, *v* — в рентгеновских лучах. На части *a*: 1—15 — точки определения содержания элементов, указанных в табл. 3.

Таблица 3. Элементный состав (мас. %) мелкого золота (электрума) в рыхлых отложениях водотоков, дренирующих золото-серебряные зоны Дукатского месторождения

<i>n</i>	Au	Ag	Fe	Pb	S	As	Сумма	Формулы минерала
1	60.53	17.94	—	—	0.12	—	78.59	(Au _{0.64} , Ag _{0.35} , S _{0.01}) _{1.00}
2	65.80	14.80	—	—	—	—	80.60	(Au _{0.71} , Ag _{0.29}) _{1.00}
3	34.04	62.69	—	—	0.16	—	96.89	(Ag _{0.76} , Au _{0.23} , S _{0.01}) _{1.00}
4	33.25	63.35	0.28	0.63	0.20	—	97.71	(Ag _{0.76} , Au _{0.22} , Fe _{0.01} , S _{0.01}) _{1.00}
5	36.96	66.17	—	0.38	0.12	—	103.63	(Ag _{0.76} , Au _{0.23} , S _{0.01}) _{1.00}
6	33.29	60.41	—	1.86	—	—	95.56	(Ag _{0.76} , Au _{0.23} , Pb _{0.01}) _{1.00}
7	41.06	52.60	1.20	—	0.17	—	95.03	(Ag _{0.67} , Au _{0.29} , Fe _{0.03} , S _{0.01}) _{1.00}
8	48.17	52.80	—	—	0.10	—	101.07	(Ag _{0.66} , Au _{0.33} , S _{0.01}) _{1.00}
9	38.86	52.00	—	—	0.27	—	91.13	(Ag _{0.70} , Au _{0.29} , S _{0.01}) _{1.00}
10	40.63	54.14	—	—	0.11	—	94.88	(Ag _{0.70} , Au _{0.29} , S _{0.01}) _{1.00}
11	39.08	54.95	—	—	0.24	—	94.27	(Ag _{0.71} , Au _{0.28} , S _{0.01}) _{1.00}
12	41.34	53.77	—	0.17	0.13	—	95.41	(Ag _{0.70} , Au _{0.29} , S _{0.01}) _{1.00}
13	40.69	53.84	—	—	0.14	—	94.67	(Ag _{0.70} , Au _{0.29} , S _{0.01}) _{1.00}
14	40.20	56.96	—	—	0.10	—	97.26	(Ag _{0.72} , Au _{0.28}) _{1.00}
15	40.21	53.96	0.15	—	—	0.25	94.57	(Ag _{0.70} , Au _{0.29} , As _{0.01}) _{1.00}

Примечание. Элементы Hg, Sb, Cu, Zn, Ni, Co, W, Mo, Sn, Bi, Ge, Se, Te, Mn — не обнаружены. Расположение точек определения состава см. на фото рис. 4, *a*. Здесь и в табл. 4, 5, 8—14: *n* — точки замеров; прочерк — ниже предела обнаружения; исследования проводились с помощью электронно-зондовых рентгеноспектральных микроанализаторов JСХА-733, JXA-8200 (JEOL Ltd, Япония); измерения интенсивностей выполнены с помощью волновых и энергодисперсионного спектрометров; расчеты концентраций проведены с помощью программного обеспечения прибора; формулы рассчитывались только для относительно сохранившихся гипогенных минералов.

нах пирита, халькопирита, штернбергита и акантита (табл. 4). Характер распределения локальный. В качестве примера приведем окисленное зерно акантита (рис. 5, табл. 5).

Следует отметить низкую устойчивость минералов Ag под действием электронного зонда [Павлова, Парадина, 1990]. В связи с этим для крайне локальной области концентрирования Au (см. рис. 5, *b*, т. 7, 8) не удалось получить изображение в рентгеновских лучах. На изображении в обратнорассеянных электронах эта область также не выделяется из-за практически совпадающих средних атомных номеров матрицы с Au и матрицы окружающих эту область участков. Тем не менее полученные данные указы-

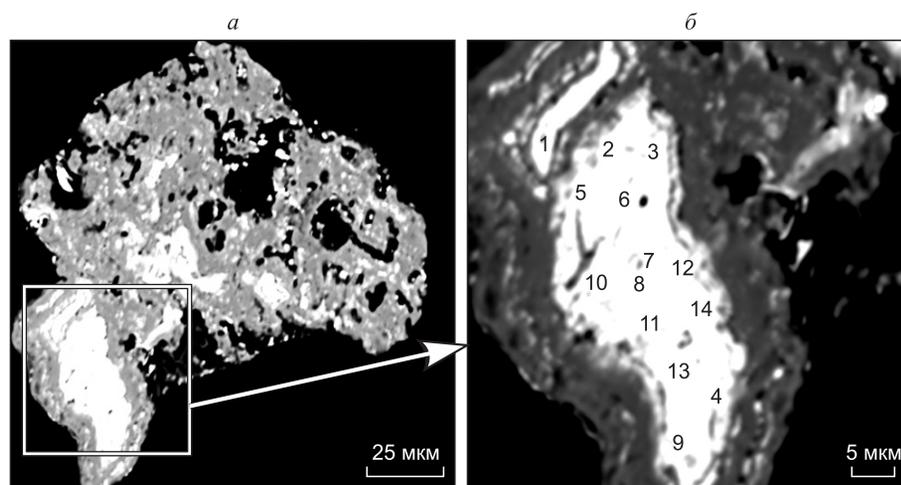


Рис. 5. Корродированное зерно акантита + оксиды Fe (*a*), сформировавшееся в результате эпигенетических процессов, в рыхлых отложениях водотоков, дренирующих золото-серебряные зоны Дукатского месторождения, и увеличенный фрагмент относительно сохранившейся части кристалла акантита (*b*).

Изображение дано в обратнорассеянных электронах. На части *b*: 1—14 — точки определения содержаний элементов, указанных в табл. 5.

Таблица 4. Элементный состав (мас. %) Au-содержащих гипергенных минералов в рыхлых отложениях водотоков, дренирующих золото-серебряные зоны Дукатского месторождения

n	S	Fe	Cu	Pb	Zn	As	Ag	Sb	Au	Mn	Si	Al	Ca	Na	K	Mg	Cl	Сумма
Гидроксиды Fe																		
1	0.15	49.05	0.27	1.49	1.15	—	0.13	—	0.24	—	15.22	0.35	0.49	0.08	0.08	10.47	0.24	79.41
2	—	64.80	0.25	3.16	0.74	—	—	—	0.52	0.12	2.17	—	—	—	—	—	—	71.76
3	0.30	60.88	—	0.27	2.14	—	—	—	0.28	—	0.81	0.82	—	—	—	—	—	65.50
4	0.14	61.11	0.42	1.47	1.24	0.18	0.15	1.38	0.24	—	1.81	1.10	—	—	—	—	—	69.24
5	0.16	60.79	0.28	1.54	0.69	0.19	—	1.17	0.23	—	1.81	1.02	—	—	—	—	—	67.88
6	—	36.25	0.22	1.72	0.17	0.51	—	0.27	0.22	—	11.26	4.70	0.16	—	1.95	—	—	57.43
7	—	31.11	0.16	2.57	0.11	0.55	0.28	0.22	0.91	0.14	19.43	7.58	—	—	3.03	—	—	66.09
Пирит, в разной степени окисленный и корродированный																		
8	24.48	42.72	—	—	—	—	—	—	0.41	—	—	4.96	—	—	2.49	0.21	0.16	75.43
9	5.51	20.36	0.64	17.25	0.51	—	—	0.21	0.37	—	0.72	—	—	—	—	—	—	45.57
10	5.00	16.76	6.12	21.44	0.08	—	—	—	0.30	—	0.27	—	—	—	—	—	—	49.97
11	5.11	17.51	0.15	42.07	2.93	3.17	0.16	—	0.25	—	1.32	—	—	—	—	—	—	72.67
Халькопирит																		
12	34.99	30.34	32.79	0.40	0.16	—	1.37	—	0.21	—	0.13	—	—	—	—	—	—	100.39
Штернбергит, сохранившееся зерно																		
13	9.64	55.38	0.75	0.51	—	—	28.98	—	0.70	—	0.86	2.79	—	—	—	—	—	99.61
Штернбергит, интенсивно корродированное зерно																		
14	4.26	20.04	0.27	—	0.47	—	36.61	—	0.36	—	4.12	1.63	—	—	—	—	—	67.76
Акантит, сохранившиеся зерна																		
15	12.86	0.63	0.11	1.51	0.12	—	79.83	—	0.39	—	—	7.60	—	—	—	—	—	103.05
16	14.04	0.26	—	—	—	—	80.27	—	0.34	—	—	4.41	—	—	0.55	—	—	99.87
17	12.02	8.89	—	—	—	0.25	65.38	0.97	0.55	—	—	7.79	—	—	2.79	0.09	—	98.73
18	7.95	1.07	0.61	0.39	0.07	—	52.03	—	0.26	—	28.54	4.64	—	0.16	6.63	—	—	102.35
Акантит, корродированные зерна																		
19	11.02	1.31	0.32	1.93	—	—	75.84	—	0.34	—	0.22	1.44	0.12	0.07	0.51	—	0.27	93.39
20	8.98	0.26	0.79	—	—	—	70.82	—	0.32	—	—	4.64	—	0.16	6.63	—	—	92.60
21	8.26	5.54	0.12	0.45	—	—	67.63	—	0.34	—	—	1.04	—	—	0.88	—	0.12	84.38
22	8.36	4.73	0.11	—	—	—	62.20	—	0.58	—	8.92	1.08	—	—	1.03	—	—	87.01

Примечание. Элементы Hg, Ni, Co, W, Mo, Sn, Bi, Ge, Se, Te — не обнаружены.

вают на существование как минимум коллоидно-дисперсной и так называемой «связанной» с сульфидами (сорбционной? структурной?) невидимой формы Au.

Подтверждением существования «связанной» формы Au служат ранее проведенные исследования. При изучении ФН Au на эпitherмальных Au-Ag месторождениях Северо-Востока России было установлено, что Au в рудах тесно ассоциирует с пиритом, халькопиритом, акантитом, штернбергитом и сульфосолями Ag (пруститом, пираргиритом). Но основным концентратом в рудах и носителем Au в ореольных зонах (околорудных метасоматитах) Au-Ag месторождений является пирит. Установлено, что в пиритах из рудных жил преобладает поверхностно-связанное Au — сорбционная форма и производные от нее (90—99 %), а количество структурной примеси этого металла составляет от 1 до 10 % [Таусон, Кравцова, 2002].

Дальнейшие исследования показали, что причиной поглощения сверхвысоких концентраций Au поверхностью минералов (пирита) является образование неавтономных фаз (НФ), для которых коэффициент фракционирования Au достигает 4000. Пирротиноподобная НФ на синтетических и природных пиритах имеет базовый состав $Fe^{2+}[S, S_2, S_n]^{2-}$ и толщину слоя около 500 нм. Содержания в ней Au составляют от 0.15 до 0.5 мас. % [Таусон и др., 2008, 2011]. При изменении физико-химических условий НФ нарушается локальное (вынужденное) равновесие с подложкой, и избыточная примесь Au выходит из ее структуры с образованием других химических форм или нано- и микрочастиц Au⁰. Следовательно, природа высоких концентраций Au в пирите, возможно, и в других сульфидах, в основном поверхностная и лишь в небольшой степени связана с вхождением Au в структуру минерала.

Таблица 5. Элементный состав (мас. %) относительно сохранившейся части кристалла акантита в рыхлых отложениях водотоков, дренирующих золото-серебряные зоны Дукатского месторождения

n	Ag	S	Fe	Cu	Pb	Mo	Au	O	Сумма	Формулы минерала
1	80.43	14.07	0.29	5.19	—	—	—	—	99.98	(Ag _{1.76} , Cu _{0.19} , Fe _{0.01}) _{1.96} S _{1.04}
2	71.29	12.13	10.87	2.73	0.49	1.02	—	1.32	99.85	(Ag _{1.44} , Cu _{0.09} , Mo _{0.02} , Pb _{0.01}) _{1.56} S _{0.83} + Fe _{0.43} + O _{0.18}
3	80.18	11.90	1.66	2.29	—	1.62	—	2.12	99.77	(Ag _{1.68} , Cu _{0.08} , Mo _{0.04}) _{1.80} S _{0.84} + Fe _{0.07} + O _{0.30}
4	72.32	10.60	3.14	1.63	8.13	—	—	4.02	99.84	(Ag _{1.46} , Pb _{0.09} , Cu _{0.06}) _{1.61} S _{0.72} + Fe _{0.12} + O _{0.55}
5	75.38	12.17	7.56	0.66	—	—	—	4.22	99.99	(Ag _{1.41} , Cu _{0.02}) _{1.43} S _{0.77} + Fe _{0.27} + O _{0.53}
6	74.07	11.65	4.43	2.08	0.41	—	—	6.81	99.45	(Ag _{1.30} , Cu _{0.06}) _{1.36} S _{0.69} + Fe _{0.15} + O _{0.80}
7	71.52	11.03	5.20	1.91	—	1.12	0.73	8.41	99.92	(Ag _{1.19} , Cu _{0.05} , Mo _{0.02} , Au _{0.01}) _{1.27} S _{0.62} + Fe _{0.17} + O _{0.94}
8	76.73	12.18	4.12	3.87	—	0.42	0.55	1.93	99.80	(Ag _{1.58} , Cu _{0.13} , Mo _{0.01} , Au _{0.01}) _{1.73} S _{0.84} + Fe _{0.16} + O _{0.27}
9	74.57	12.11	4.28	0.44	—	—	—	7.23	98.63	(Ag _{1.29} , Cu _{0.01}) _{1.30} S _{0.71} + Fe _{0.14} + O _{0.84}
10	62.60	9.86	11.60	0.35	—	—	—	13.84	98.25	(Ag _{0.89} , Cu _{0.01}) _{0.90} S _{0.47} + Fe _{0.32} + O _{1.32}
11	78.45	12.29	4.28	0.89	—	—	—	3.52	99.43	(Ag _{1.54} , Cu _{0.03}) _{1.57} S _{0.81} + Fe _{0.16} + O _{0.46}
12	76.07	11.73	3.95	2.12	—	—	—	4.27	98.14	(Ag _{1.47} , Cu _{0.07}) _{1.54} S _{0.76} + Fe _{0.15} + O _{0.56}
13	76.64	11.54	4.20	1.50	—	—	—	6.07	99.95	(Ag _{1.38} , Cu _{0.05}) _{1.43} S _{0.70} + Fe _{0.15} + O _{0.73}
14	74.70	12.07	4.82	0.31	—	—	—	7.64	99.54	(Ag _{1.27} , Cu _{0.01}) _{1.28} S _{0.69} + Fe _{0.16} + O _{0.87}

Примечание. Элементы Hg, Sb, As, Zn, Ni, Co, W, Sn, Bi, Ge, Se, Te, Mn — не обнаружены. Расположение точек определения состава см. на рис. 5, б.

Естественно, что высокий процент в рудах и ореолах «связанного» с сульфидами, легко выщелачиваемого обычными кислотами Au, т.е. Au, находящегося в подвижной форме, оказывает существенное влияние на формирование ЛПП даже в условиях Субарктики.

С целью приближенной оценки размеров частиц самородного золота проведено сопоставление его концентраций в валовых пробах и в разных гранулометрических фракциях двумя аналитическими методами — АА и СА. Особенность метода СА в том, что с его помощью определяется Au, размеры частиц которого превышают 1—5 мкм, т.е. мелкое и более крупное самородное Au [Прокопчук, 1994]. В то время как с помощью атомно-абсорбционного метода мы получаем информацию по содержанию всех форм Au (суммарное Au), от тонкодисперсного до мелкого и крупнее. Разница между результатами соответствует доли Au, находящегося в тонкодисперсной форме: дисперсной (1—5 мкм), ультрадисперсной (0.1—1 мкм), коллоидно-дисперсной (< 0.1 мкм), либо в «связанной», в основном с сульфидами, легкоподвижной форме [Кравцова, Соломонова, 1984; Кравцова, Андрулайтис, 1989, 1991; Таусон, Кравцова, 2002; Таусон и др., 2008; Кравцова, 2010].

Установлено, что в рыхлых русловых отложениях головной части потока, находящихся в 50—60 м от источника рудного вещества — рудной жилы (пр. 624) или минерализованной зоны (пр. 629, 631), на долю видимого Au приходится от 68 до 100 %. По мере транспортировки материала по водотоку наблюдается разубоживание потока. В шлейфе потока на фоне снижения концентраций Au, несмо-

Таблица 6. Сопоставление содержаний Au (г/т) по результатам АА и СА и расчет количественных соотношений разных по размерам частиц Au в средних пробах, отквартрованных от протоколочек. Дукатское Au-Ag месторождение, участок Чайка, руч. Чайка

№ пробы	Au ₁ (АА)	Au ₂ (СА)	Au ₁ -Au ₂	N _в , %	N _т , %
	СП				
624	5.801	5.70	0.10	98.3	1.7
625	0.560	0.02	0.54	3.6	96.4
630	0.230	0.01	0.22	4.4	95.6
629	0.110	0.13	0	100	0
631	0.044	0.03	0.01	68.2	31.8
628	0.130	0.01	0.12	7.7	92.3
620	0.036	0.01	0.03	27.8	72.2

Примечание. СП — протолочка, средняя проба. Здесь и в табл. 10: Au₁ — суммарное содержание, Au₂ — содержание с размером частиц > 1—5 мкм («видимое» Au), Au₁-Au₂ — содержание тонкодисперсного Au с размером частиц < 1—5 мкм («невидимое» Au); N_в — доля мелкого «видимого» Au, N_т — доля тонкодисперсного «невидимого» Au.

Таблица 7. Сопоставление содержаний Au (г/т) по результатам АА и СА и расчет количественных соотношений разных по размерам частиц Au по фракциям (протоочки).
Дукатское Au-Ag месторождение, уч. Чайка, ручьи Чайка и Искра

Класс проб (фракции, мм)	n	Среднее содержание Au (г/т) в классе		Au ₁ -Au ₂	N _B , %	N _P , %
		Au ₁ (AA)	Au ₂ (CA)			
+2	15/9	0.275	0.25	0.03	90.9	9.1
-2...+1	11/9	0.112	0.27	0	100	0
-1.0...+0.25	13/9	1.588	0.42	1.17	26.5	73.5
-0.25	15/9	1.483	0.77	0.71	51.9	48.1

Примечание. n — количество замеров / число проб в выборке.

Таблица 8. Элементный состав (мас. %) корродированного зерна акантита в рыхлых отложениях водотоков, дренирующих золото-серебряные зоны Дукатского месторождения

n	Ag	Fe	Se	S	Сумма	Формулы минералов
Акантит						
1	84.87	0.53	—	14.05	99.45	(Ag _{1.91} , Fe _{0.02}) _{1.93} S _{1.06}
2	85.95	0.42	0.29	14.05	100.71	(Ag _{1.92} , Fe _{0.02}) _{1.94} (S _{1.05} , Se _{0.01}) _{1.06}
3	88.39	0.35	—	12.70	101.44	(Ag _{2.01} , Fe _{0.02}) _{2.03} S _{0.97}
4	83.29	0.31	0.49	12.45	96.54	(Ag _{1.97} , Fe _{0.01}) _{1.98} (S _{0.99} , Se _{0.02}) _{1.01}
5	84.79	0.42	1.64	13.46	100.31	(Ag _{1.91} , Fe _{0.02}) _{1.93} (S _{1.02} , Se _{0.05}) _{1.07}
Слабо корродированная часть зерна акантита						
6	78.85	6.59	0.51	12.64	98.59	(Ag _{1.76} , Fe _{0.28}) _{2.04} (S _{0.95} , Se _{0.02}) _{0.97}
7	72.79	10.25	—	12.54	95.58	(Ag _{1.62} , Fe _{0.44}) _{2.06} S _{0.94}
8	72.27	11.13	—	13.12	96.52	(Ag _{1.57} , Fe _{0.47}) _{2.04} S _{0.96}
9	70.47	11.74	—	13.99	96.20	(Ag _{1.51} , Fe _{0.48}) _{1.99} S _{1.01}
10	68.86	12.11	—	13.62	94.59	(Ag _{1.50} , Fe _{0.51}) _{2.01} S _{1.00}
Корродированная часть зерна акантита + гидроксиды Fe						
11	74.51	7.81	—	—	82.32	Смесь фаз
12	73.28	4.35	—	1.10	78.73	»
13	65.35	11.70	—	0.98	78.03	»
14	67.16	11.24	—	1.07	79.47	»
15	68.61	10.81	—	1.07	80.49	»

Примечание. Элементы Au, Hg, Sb, As, Cu, Pb, Zn, Ni, Co, W, Mo, Sn, Bi, Ge, Te, Mn — не обнаружены. Расположение точек определения состава см. на рис. 6, а.

тря на крайне неравномерное распределение, прослеживается отчетливая тенденция увеличения доли тонкодисперсного Au (до 96 %), в том числе и его коллоидно-дисперсной составляющей (табл. 6).

То же самое можно сказать и о так называемой «связанной» форме. Очевидно, что эти две формы невидимого (микропримесного) Au, легко выщелачиваемые обычными кислотами, в ЛППР по сравнению с рудами преобладают. В целом отчетливо видна тенденция обогащения подвижной формой Au материала более тонких классов (табл. 7).

Серебро. С помощью электронно-зондового микроанализа было установлено, что среди минералов Ag преобладают акантит, штернбергит, самородное Ag. Интерметаллические соединения Ag с Au (кюстелит) в рыхлых отложениях ЛППР встречаются значительно реже. Зерна сульфидов Ag в разной степени корродированы. Большая часть этих зерен имеет гипергенный облик (рис. 6, 7 и табл. 8, 9). Самородное Ag представлено тонкодисперсными частицами (< 10 мкм).

Широким распространением пользуются микровключения акантита в магнетите (рис. 8, а, табл. 10). Собственно серебряные минералы включают в себя зерна пирита (см. рис. 8, б, в; табл. 10), сфалерита и халькопирита (см. рис. 8, г, д; табл. 10). Из сульфосолей Ag больше распространен пираргирит (см. рис. 8, е, табл. 10). В гипергенных условиях также идет выделение серебра при разложении серебряносодержащих полиметаллов и халькопирита. Об этом свидетельствует форма выделения микровключений минералов в виде каплевидной оторочки вокруг зерен сульфидов — оторочка вокруг зерна

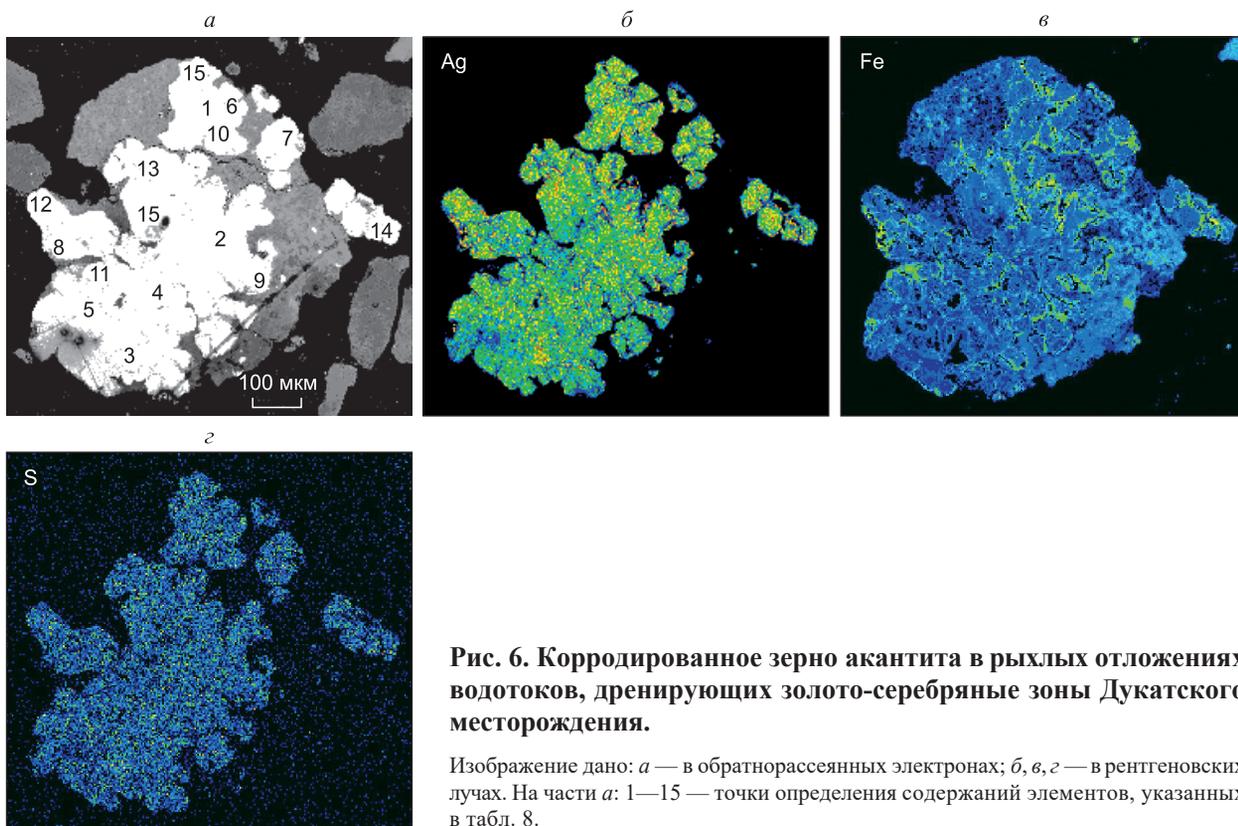


Рис. 6. Корродированное зерно акантита в рыхлых отложениях водотоков, дренирующих золото-серебряные зоны Дукатского месторождения.

Изображение дано: *a* — в обратнорассеянных электронах; *б, в, з* — в рентгеновских лучах. На части *a*: 1—15 — точки определения содержаний элементов, указанных в табл. 8.

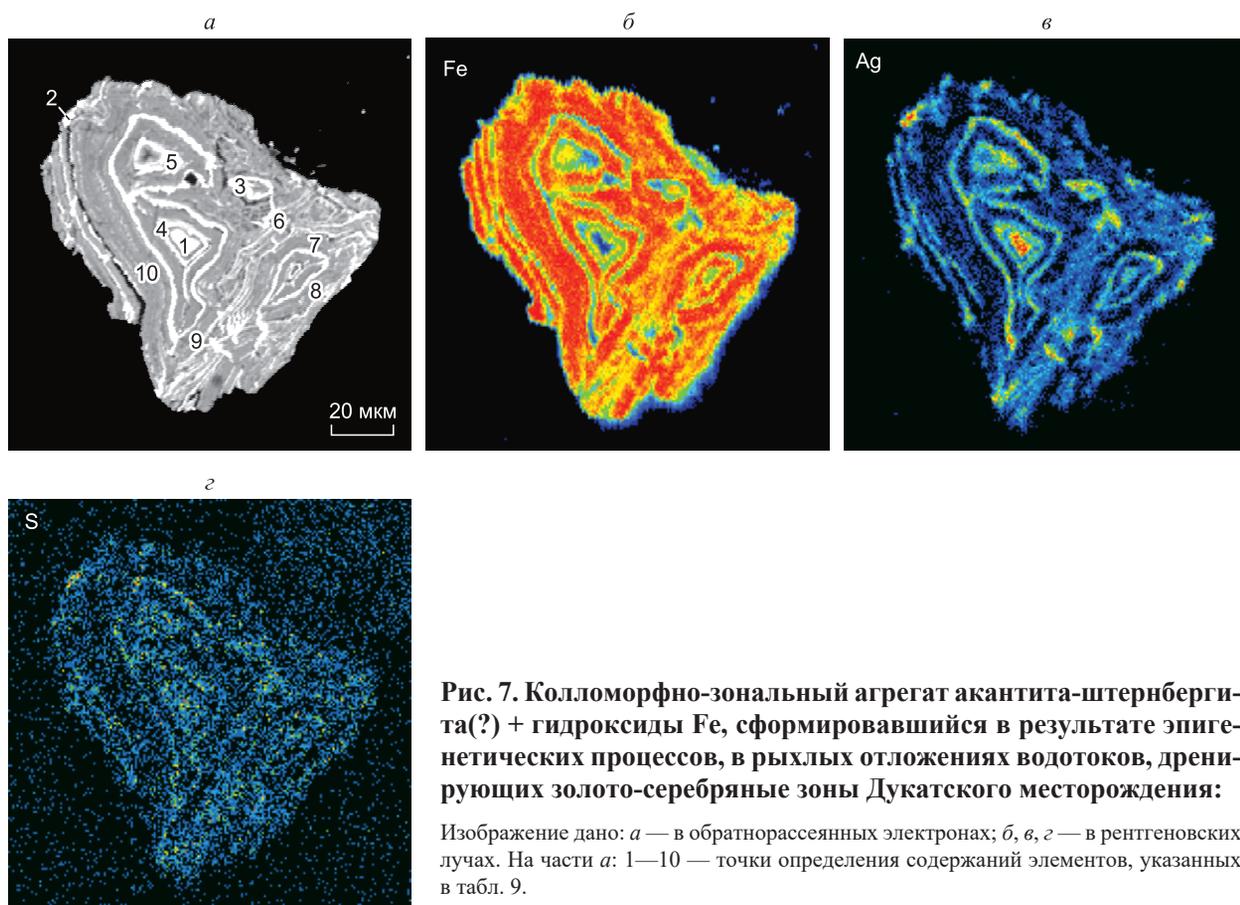


Рис. 7. Колломорфно-зональный агрегат акантита-штерибергита(?) + гидроксиды Fe, сформировавшийся в результате эпигенетических процессов, в рыхлых отложениях водотоков, дренирующих золото-серебряные зоны Дукатского месторождения:

Изображение дано: *a* — в обратнорассеянных электронах; *б, в, з* — в рентгеновских лучах. На части *a*: 1—10 — точки определения содержаний элементов, указанных в табл. 9.

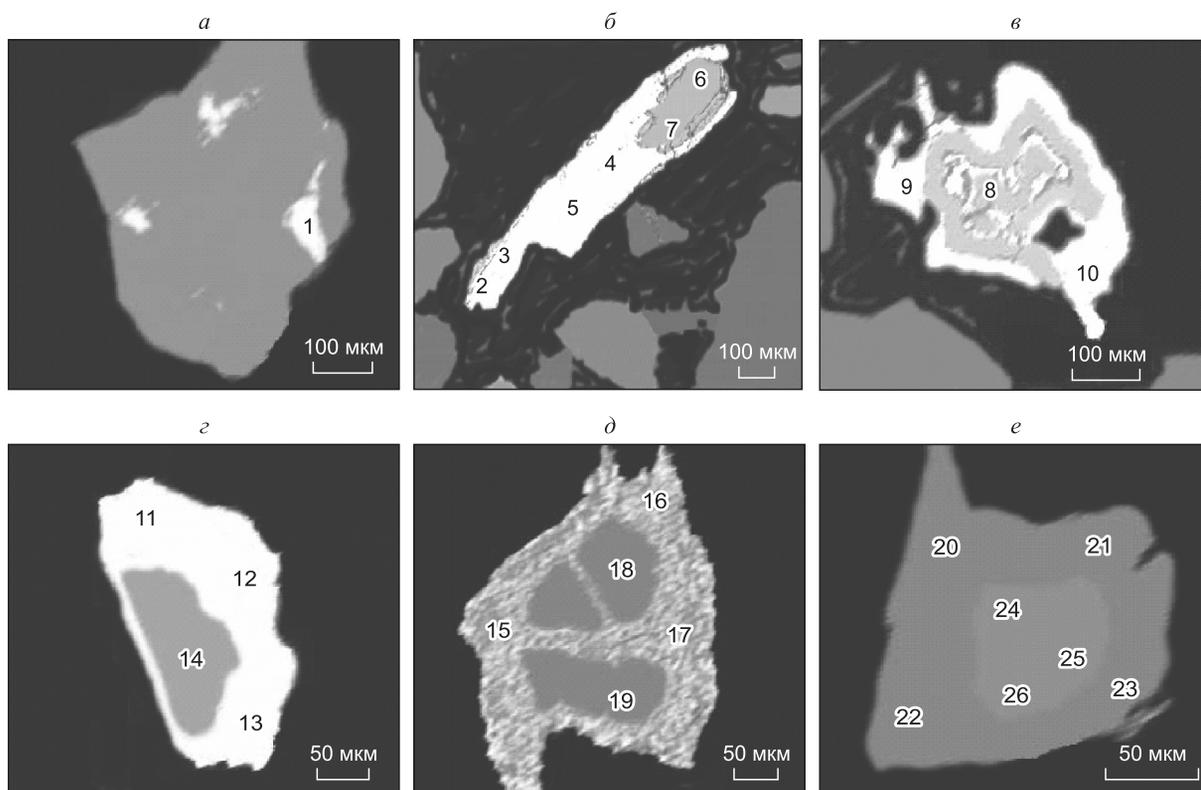


Рис. 8. Рудные минералы в рыхлых отложениях водотоков, дренирующих золото-серебряные зоны Дукатского месторождения:

a — включения акантита (белое) в зерне магнетита (серое), *б* — акантит (белое) с включением пирита (серое), *в* — сростание акантита (белое) с пиритом (серое), *г* — включение сфалерита (серое) в акантите (белое), *д* — халькопирит (серое) в оторочке каплевидных зерен штернбергита и самородного серебра, *е* — сростание пираргирита (светло-серое в центре) и акантита (серое). Изображение дано в обратнорассеянных электронах. На рис. 8: 1—26 — точки определения содержаний элементов, указанных в табл. 10.

халькопирита состоит в основном из смеси мелких каплевидных зерен самородного Ag и штернбергита (см. рис. 8, *д*, табл. 10). Реликтовые выделения акантита-штернбергита установлены в гидроксидах Fe (рис. 9, табл. 11).

Основные сопутствующие элементы-индикаторы оруденения

Ртуть является одним из наиболее важных сопутствующих элементов-индикаторов Au-Ag оруденения. В ранее опубликованных работах [Кравцова, Андрулайтис, 1989; Кравцова, Захаров, 1996; Кравцова, 2010] было показано, что на Au-Ag месторождениях Северо-Востока России Hg является одним из основных элементов, характеризующих надрудные и верхнерудные горизонты. Установлены основные ФН этого элемента — сорбционная и примесная. Главные минералы-концентраторы — сфалерит, галенит, сульфосоли Ag, аргентит, самородное Ag и электрум. Из собственных минералов отмечена киноварь. Гипергенные формы Hg, оксихлориды, окислы и сульфаты характерны только для приповерхностных зон с максимумом приуроченности к пострудным разрывным нарушениям, зонам дробления и окисления. Все вышесказанное, в значительной степени, можно отнести к ФН Hg в ЛПР изученной площади.

Установлено, что наиболее высокие концентрации Hg (1—10 г/т) в рудах и вмещающих породах (первичных ореолах) Au-Ag зон Дукатского месторождения приурочены также к приповерхностным зонам (верхнерудным горизонтам). В то же время сульфидная форма Hg — киноварь, отмеченная на других Au-Ag месторождениях Северо-Востока России, нами ни в рудах, ни в ореолах Au-Ag зон Дукатского месторождения не установлена.

По данным атомно-абсорбционного анализа, наряду с частично сохранившимися первичными минералами, содержащими Hg (до 1 %), широким распространением в аллювиальных отложениях водото-

Таблица 9. Элементный состав (мас. %) колломорфно-зонального агрегата акантита-штернбергита(?) + гидроксиды Fe в рыхлых отложениях водотоков, дренирующих золото-серебряные зоны Дукатского месторождения

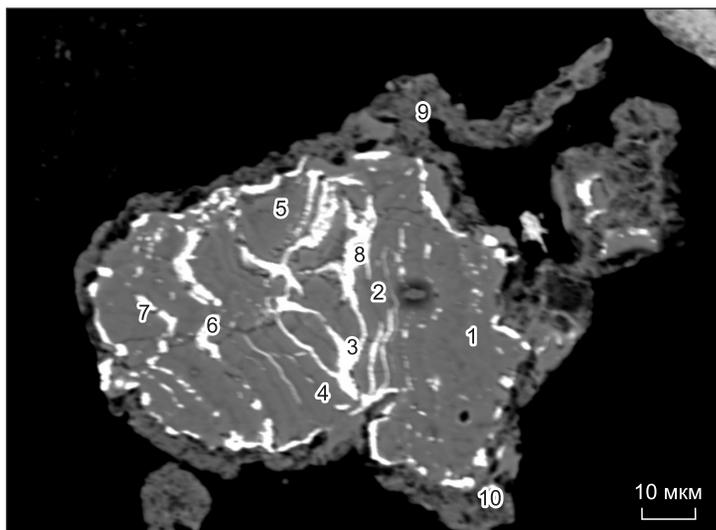
<i>n</i>	Ag	As	Fe	Pb	Cu	S	Сумма	Формулы минералов
Акантит								
1	81.08	—	3.59	—	0.55	13.49	98.71	(Ag _{1.81} Fe _{0.15} Cu _{0.02}) _{1.98} S _{1.01}
2	79.25	—	5.38	—	0.37	13.87	98.87	(Ag _{1.74} Fe _{0.23} Cu _{0.01}) _{1.98} S _{1.02}
Акантит-штернбергит(?) + гидроксиды Fe								
3	42.25	—	26.47	0.39	1.14	9.79	80.04	Смесь фаз
4	53.79	—	20.68	0.52	1.40	9.43	85.82	»
5	46.74	—	19.41	0.92	1.45	9.39	77.91	»
6	46.97	—	25.09	—	0.99	8.06	81.11	»
Гидроксиды Fe + акантит-штернбергит(?)								
7	4.97	0.27	54.44	2.23	0.38	0.82	63.11	Смесь фаз
8	5.58	—	54.73	1.82	0.36	1.25	63.74	»
9	3.92	—	55.50	2.24	0.35	0.66	62.67	»
10	7.81	—	53.43	2.02	0.31	1.48	65.05	»

Примечание. Элементы Au, Hg, Sb, Zn, Ni, Co, W, Mo, Sn, Bi, Ge, Se, Te, Mn — не обнаружены. Расположение точек определения состава см. на рис. 7, а.

ков, дренирующих Au-Ag зоны, пользуются вторичные минералы. Это оксиды и гидроксиды Fe, содержащие до 0.5 % Hg (в основном сорбционной) и вторичные образования Ag, Pb, Zn, содержащие до 0.2 % Hg. По данным РСМА (качественные определения), ряд зерен этих гипергенных минералов имеет отчетливо зональное строение, где содержание Hg хорошо коррелируется с содержанием этих элементов.

Кроме того, в аллювии были найдены реликты интенсивно разрушенных медных и Cu-содержащих минералов, в которых присутствует Hg. Примесная форма Hg чаще всего ассоциирует с корродированными зернами сульфидов серебра — акантитом и штернбергитом, реже с кюстелитом и самородным серебром. По трещинкам и кавернам сильно разрушенных зерен обычно интенсивно развиты вторичные минералы, чаще всего такие, как оксиды и гидроксиды Fe, различные сульфатные соединения Zn, Pb и Cu. Аналогичные по составу, но более крупные зерна кюстелита и самородного Ag с примесью Hg до 0.9 % были установлены в Au-Ag рудах Дукатского месторождения. Относительно высокие содержания примесной Hg обнаружены в зернах галенита и халькопирита (до 0.6 %) из тех же руд (по данным РСМА).

Сурьма и мышьяк — это еще одни из важнейших типоморфных элементов-индикаторов Au-Ag оруденения, характеризующих надрудные и верхнерудные горизонты месторождений. На площади Дукатского месторождения эти элементы образуют протяженные контрастные ЛПР с содержаниями Sb до 100 и As до 1000 г/т и более [Кравцова, 2010]. При этом собственно минеральные их формы в аллювии встречаются крайне редко (см. рис. 8 и табл. 10, рис. 10). Сурьма и мышьяк в ос-



редуют протяженные контрастные ЛПР с содержаниями Sb до 100 и As до 1000 г/т и более [Кравцова, 2010]. При этом собственно минеральные их формы в аллювии встречаются крайне редко (см. рис. 8 и табл. 10, рис. 10). Сурьма и мышьяк в ос-

Рис. 9. Агрегат, состоящий из гидроксидов Fe и реликтовых выделений акантита-штернбергита в рыхлых отложениях водотоков, дренирующих золото-серебряные зоны Дукатского месторождения.

Изображение дано в обратнорассеянных электронах. На рис. 9: 1—10 — точки определения содержания элементов, указанных в табл. 11.

Таблица 10. Элементный состав (мас. %) рудных минералов в рыхлых отложениях водотоков, дренирующих золото-серебряные зоны Дукатского месторождения

<i>n</i>	Ag	Fe	Cu	Zn	S	Sb	As	Сумма	Формулы минералов
Акантит									
1	76.82	0.68	—	—	22.78	—	—	100.28	(Ag _{1.99} , Fe _{0.03}) _{2.02} S _{0.98} + S _{1.00} (?)
Акантит + S самородная? (смесь фаз)									
2	62.56	—	—	—	37.37	—	—	99.93	Ag _{2.00} S _{1.01} + S _{3.00}
3	61.84	—	—	—	37.78	—	—	99.62	Ag _{1.96} S _{1.04} + S _{3.00}
Акантит									
4	85.14	—	—	—	12.37	—	—	97.51	Ag _{2.01} S _{0.98}
5	85.56	—	—	—	10.74	—	—	96.30	Ag _{2.11} S _{0.89}
Пирит									
6	—	46.33	0.19	—	53.37	—	0.15	100.04	Fe _{1.00} S _{2.00}
7	—	46.51	—	—	53.12	—	0.22	99.85	Fe _{1.00} S _{2.00}
Пирит									
8	—	45.71	0.57	—	53.10	—	—	99.38	(Fe _{0.99} , Cu _{0.01}) _{1.00} S _{2.00}
Акантит									
9	77.02	—	—	—	22.01	—	—	99.03	Ag _{2.04} S _{0.96} + S _{1.00} (?)
10	76.90	—	—	—	21.85	—	—	98.75	Ag _{2.04} S _{0.95} + S _{1.00} (?)
Акантит									
11	77.06	0.35	—	—	22.75	—	—	100.16	(Ag _{1.99} , Fe _{0.02}) _{2.01} S _{0.98} + S _{1.00} (?)
12	77.77	0.47	—	—	21.78	—	—	100.02	(Ag _{2.05} , Fe _{0.02}) _{2.07} S _{0.93} + S _{1.00} (?)
13	77.18	0.24	—	—	21.62	—	—	99.04	(Ag _{2.05} , Fe _{0.01}) _{2.06} S _{0.93} + S _{1.00} (?)
Сфалерит									
14	—	2.41	—	65.46	32.12	—	—	99.99	(Zn _{0.98} , Fe _{0.04}) _{1.02} S _{0.98}
Штернбербит + Ag самородное? (смесь фаз)									
15	49.72	24.66	0.37	—	24.38	—	—	99.13	(Ag _{0.93} , Cu _{0.02}) _{0.95} Fe _{1.85} S _{3.19} + Ag _{1.00}
16	49.25	24.08	1.46	—	24.84	—	—	99.63	(Ag _{0.89} , Cu _{0.10}) _{0.99} Fe _{1.79} S _{3.22} + Ag _{1.00}
17	52.00	19.55	0.79	—	25.85	—	—	98.19	(Ag _{1.04} , Cu _{0.05}) _{1.09} Fe _{1.48} S _{3.42} + Ag _{1.00}
Халькопирит									
18	—	29.57	34.69	—	34.84	—	—	99.10	Cu _{1.01} Fe _{0.98} S _{2.01}
19	—	29.76	34.59	—	34.91	—	—	99.26	Cu _{1.01} Fe _{0.99} S _{2.01}
Акантит									
20	74.06	0.25	—	—	22.75	3.20	—	100.26	(Ag _{1.92} , Fe _{0.01}) _{1.93} (S _{0.99} , Sb _{0.07}) _{1.06} + S _{1.00} (?)
21	72.43	0.31	—	—	21.97	5.01	—	99.72	(Ag _{1.91} , Fe _{0.02}) _{1.93} (S _{0.95} , Sb _{0.12}) _{1.07} + S _{1.00} (?)
22	77.02	—	—	—	22.01	—	—	99.03	Ag _{2.04} S _{0.96} + S _{1.00} (?)
23	76.90	—	—	—	21.85	—	—	98.75	Ag _{2.04} S _{0.95} + S _{1.00} (?)
Пираргирит									
24	63.76	—	—	—	16.93	17.89	—	98.58	Ag _{3.27} Sb _{0.81} S _{2.92}
25	61.33	—	—	—	16.48	20.96	—	98.77	Ag _{3.18} Sb _{0.96} S _{2.87}
26	63.67	—	—	—	17.49	18.45	—	99.61	Ag _{3.21} Sb _{0.82} S _{2.97}

Примечание. Элементы Au, Hg, Pb, Ni, Co, W, Mo, Sn, Bi, Ge, Se, Te, Mn — не обнаружены. Расположение точек определения состава (*n*) см. на рис. 8.

новном в виде примеси установлены в пирите, халькопирите, сульфидах Ag. Широким распространением пользуются сорбционные формы этих элементов на оксидах и гидроксидах Fe (см. табл. 4, 12, рис. 11).

При изучении окисленного кварц-полевошпатового агрегата было обнаружено зерно, состоящее из Fe, As и O, отвечающее по составу питтититу — Fe_x(AsO₄)_y(SO₄)_z·*n*H₂O (рис. 12, табл. 13). Необходи-

Таблица 11. Элементный состав (мас. %) агрегата гидроксидов Fe и реликтовых выделений акантита-штернбергита в рыхлых отложениях водотоков, дренирующих золото-серебряные зоны Дукатского месторождения

<i>n</i>	Ag	Si	Fe	S	Al	O	Сумма
1	—	1.80	52.99	—	—	40.12	94.91
2	2.79	1.71	50.55	—	—	40.67	95.72
3	5.30	1.52	47.79	1.38	—	42.23	98.22
4	1.60	1.68	49.31	—	—	42.68	95.27
5	0.97	1.73	49.65	—	—	42.47	94.82
6	64.29	—	13.95	8.50	—	10.81	97.55
7	—	1.77	49.33	—	—	45.52	96.62
8	19.73	1.03	39.13	3.29	—	34.98	98.16
9	—	5.70	40.24	—	3.88	47.18	97.00
10	—	6.83	45.99	—	5.06	41.21	99.09

Примечание. Элементы Au, Hg, Sb, Se, Te, Cu, Pb, Zn, W, Mo, Sn, Bi, Ti, Cr, K, Na, Ca, Mg — не обнаружены. Расположение точек определения состава см. на рис. 9.

Таблица 12. Элементный состав (мас. %) вторичных образований Fe и As в рыхлых отложениях водотоков, дренирующих золото-серебряные зоны Дукатского месторождения

<i>n</i>	Fe	O	As	Si	K	Cl	Сумма
1	31.58	32.96	34.30	0.55	0.29	0.32	100.00
2	30.96	34.67	32.65	1.01	0.49	0.22	100.00
3	32.71	31.23	34.96	0.44	0.33	0.33	100.00
4	28.27	36.73	30.06	3.30	1.32	0.32	100.00
5	32.03	32.71	33.82	0.75	0.38	0.31	100.00
6	31.36	33.39	34.25	0.51	0.27	0.22	100.00
7	36.45	24.89	36.70	1.08	0.29	0.59	100.00
8	26.60	37.44	28.55	5.08	1.62	0.71	100.00
9	33.24	31.08	33.84	0.87	0.28	0.69	100.00
10	39.53	26.61	31.02	0.91	0.08	1.85	100.00

Примечание. Элементы Au, Ag, Hg, Sb, Cu, Pb, Zn, Ni, Co, W, Mo, Sn, Bi, Ge, Se, Te, Mn — не обнаружены. Расположение точек определения состава см. на рис. 11, а.

Таблица 13. Элементный состав (мас. %) питтицита в рыхлых отложениях водотоков, дренирующих золото-серебряные зоны Дукатского месторождения

<i>n</i>	Fe	Sb	As	O	Сумма
1	19.58	—	32.59	35.19	87.36
2	21.93	—	35.74	32.84	90.51
3	21.12	—	33.59	34.45	89.16
4	19.83	—	32.05	36.05	87.93
5	20.14	—	32.30	34.20	86.64
6	20.25	0.13	33.88	32.89	87.15
7	34.82	—	46.45	19.11	100.38

Примечание. Элементы Au, Ag, Hg, Cu, Pb, Zn, Ni, Co, W, Mo, Sn, Bi, Ge, Se, Te, Mn — не обнаружены. Расположение точек определения состава см. на рис. 12, а.

мо отметить, что питтицит является продуктом разрушения арсенопирита, образуя в гипергенных условиях труднорастворимые формы [Дана, 1937]. Для типичных вулканогенных Au-Ag руд этот минерал не характерен. Но на Дукатском месторождении арсенопирит имеет достаточно широкое распространение в основном во вмещающих породах, в зонах развития площадной сульфидной минерализации. Появление

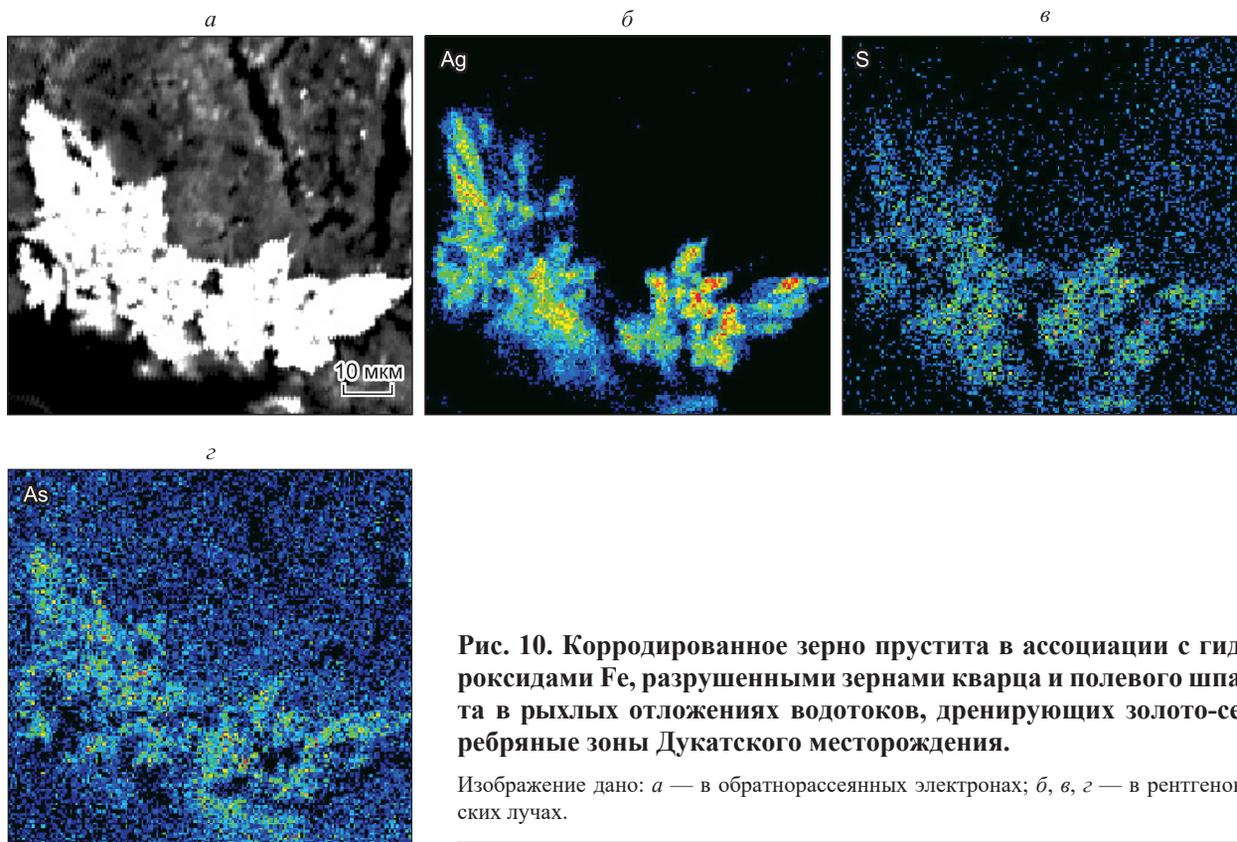


Рис. 10. Корродированное зерно прустита в ассоциации с гидроксидами Fe, разрушенными зернами кварца и полевого шпата в рыхлых отложениях водотоков, дренирующих золото-серебряные зоны Дукатского месторождения.

Изображение дано: *a* — в обратнорассеянных электронах; *б, в, г* — в рентгеновских лучах.

ние его в потоках рассеяния Au-Ag зон говорит о влиянии вмещающих пород на их формирование и объясняет широкое проявления аномальных геохимических полей As на всей площади месторождения. Этим же можно объяснить и то, что значительная часть аномалий As, выявленная на территории Дукатского рудного узла, не только с золото-серебряными, но и вообще с промышленно значимой рудной минерализацией не связана.

Интересны на наш взгляд образования, состоящие из As, Fe и O, образующие ракушкоподобные формы (рис. 13), где содержания As в отдельных точках достигают 70—80 %. Подобные, только неразрушенные «ракушки» самородного As уже были описаны в рудах вулканогенных Au-Ag месторождений [Кравцова, 2010]. Таким образом, появление ракушкоподобных образований в рыхлых отложениях ЛПР является прямым критерием, указывающим на Au-Ag оруденение.

В аллювиальных отложениях ЛПР кроме частично сохранившихся галенита сфалерита и халькопирита, которые в первичных рудах характеризуют нижнерудные горизонты месторождения, в аллювии нами были установлены реликты интенсивно разрушенных Pb, Zn и Cu-содержащих минералов. В виде примеси эти элементы отмечаются в гидроксидах Fe, в разной степени окисленных и корродированных зернах пирита, штернбергита, акантита (см. табл. 4).

Таблица 14. Элементный состав (мас. %) интерметаллического соединения Cu-Zn в рыхлых отложениях водотоков, дренирующих золото-серебряные зоны Дукатского месторождения

<i>n</i>	Cu	Zn	Fe	Na	Сумма	Формулы минерала
1	54.81	33.17	0.53	3.49	92.00	(Cu _{0.56} , Zn _{0.33}) _{0.89} (Na _{0.10} , Fe _{0.01}) _{0.11}
2	60.51	28.48	0.59	2.97	92.55	(Cu _{0.62} , Zn _{0.29}) _{0.91} (Na _{0.08} , Fe _{0.01}) _{0.09}
3	58.33	31.37	0.60	2.96	93.26	(Cu _{0.60} , Zn _{0.31}) _{0.91} (Na _{0.08} , Fe _{0.01}) _{0.09}
4	60.13	30.23	0.92	3.34	94.62	(Cu _{0.60} , Zn _{0.30}) _{0.90} (Na _{0.09} , Fe _{0.01}) _{0.10}
5	58.00	31.24	0.57	3.71	93.52	(Cu _{0.58} , Zn _{0.31}) _{0.89} (Na _{0.10} , Fe _{0.01}) _{0.11}
6	52.82	33.88	0.94	3.77	91.41	(Cu _{0.54} , Zn _{0.34}) _{0.88} (Na _{0.11} , Fe _{0.01}) _{0.12}

Примечание. Элементы Au, Ag, Hg, Sb, As, Pb, Ni, Co, W, Mo, Sn, Bi, Ge, Se, Te, Mn — не обнаружены. Расположение точек определения состава см. на рис. 15, *a*.

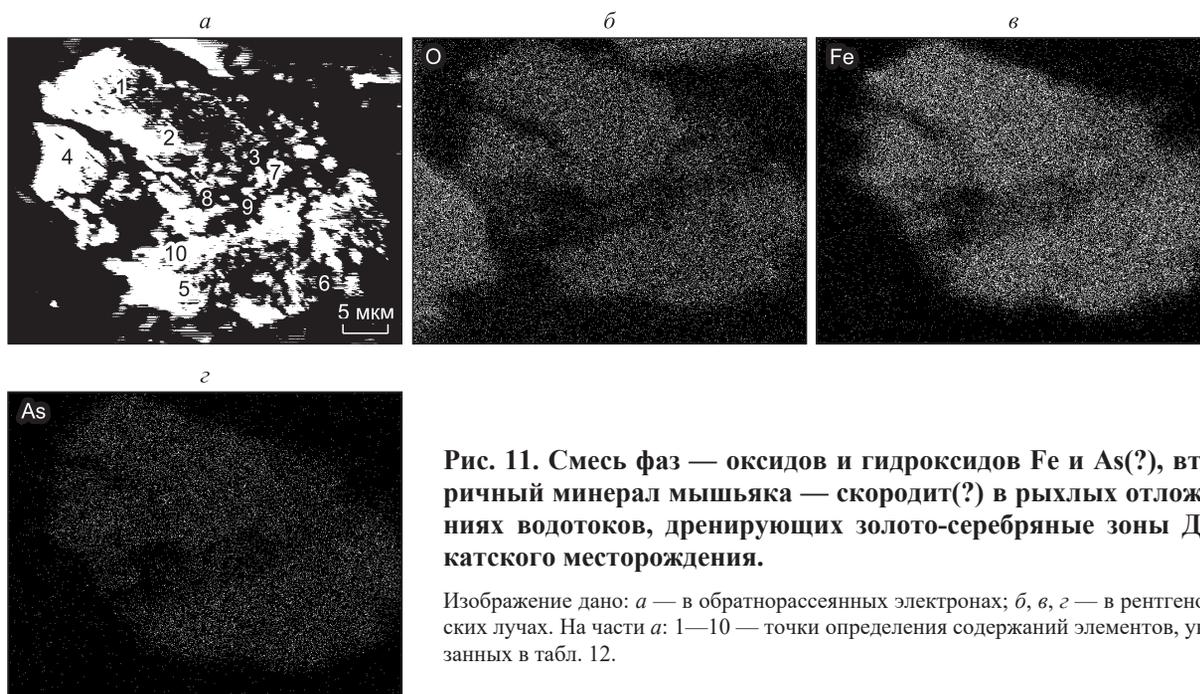


Рис. 11. Смесь фаз — оксидов и гидроксидов Fe и As(?), вторичный минерал мышьяка — скородит(?) в рыхлых отложениях водотоков, дренирующих золото-серебряные зоны Дукатского месторождения.

Изображение дано: *a* — в обратнорассеянных электронах; *б, в, г* — в рентгеновских лучах. На части *a*: 1—10 — точки определения содержаний элементов, указанных в табл. 12.

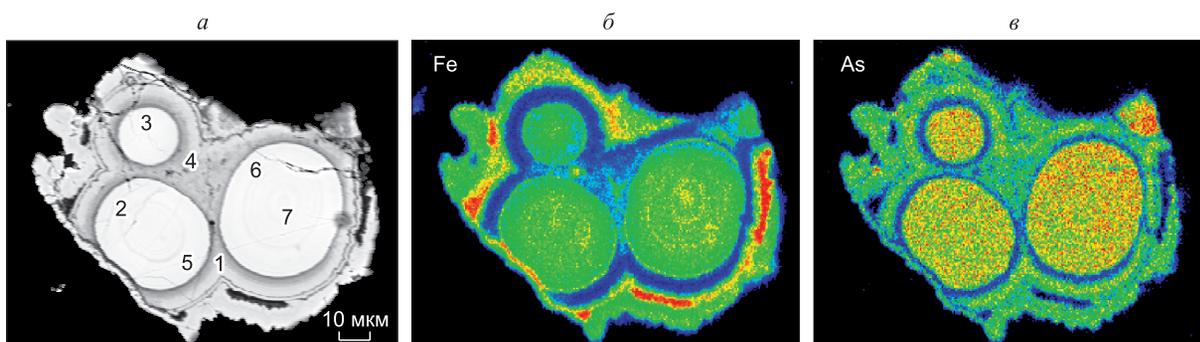


Рис. 12. Агрегат почкообразных выделений птитцита, покрытый коркой гидроксидов Fe в рыхлых отложениях водотоков, дренирующих золото-серебряные зоны Дукатского месторождения.

Изображение дано: *a* — в обратнорассеянных электронах; *б, в* — в рентгеновских лучах. На части *a*: 1—7 — точки определения содержаний элементов, указанных в табл. 13.

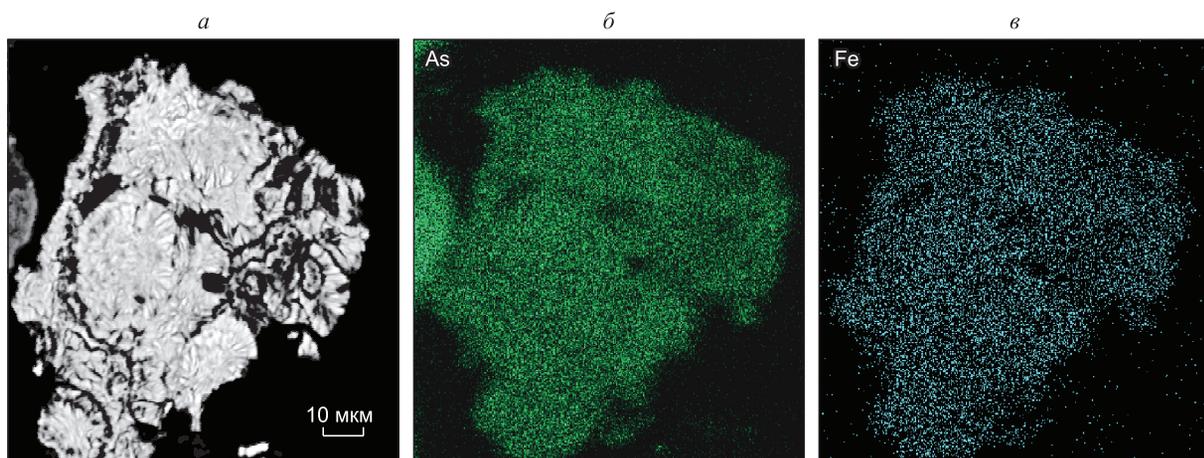


Рис. 13. Зерно состава Fe, As, O.

Изображение дано: *a* — в обратнорассеянных электронах; *б, в* — в рентгеновских лучах.

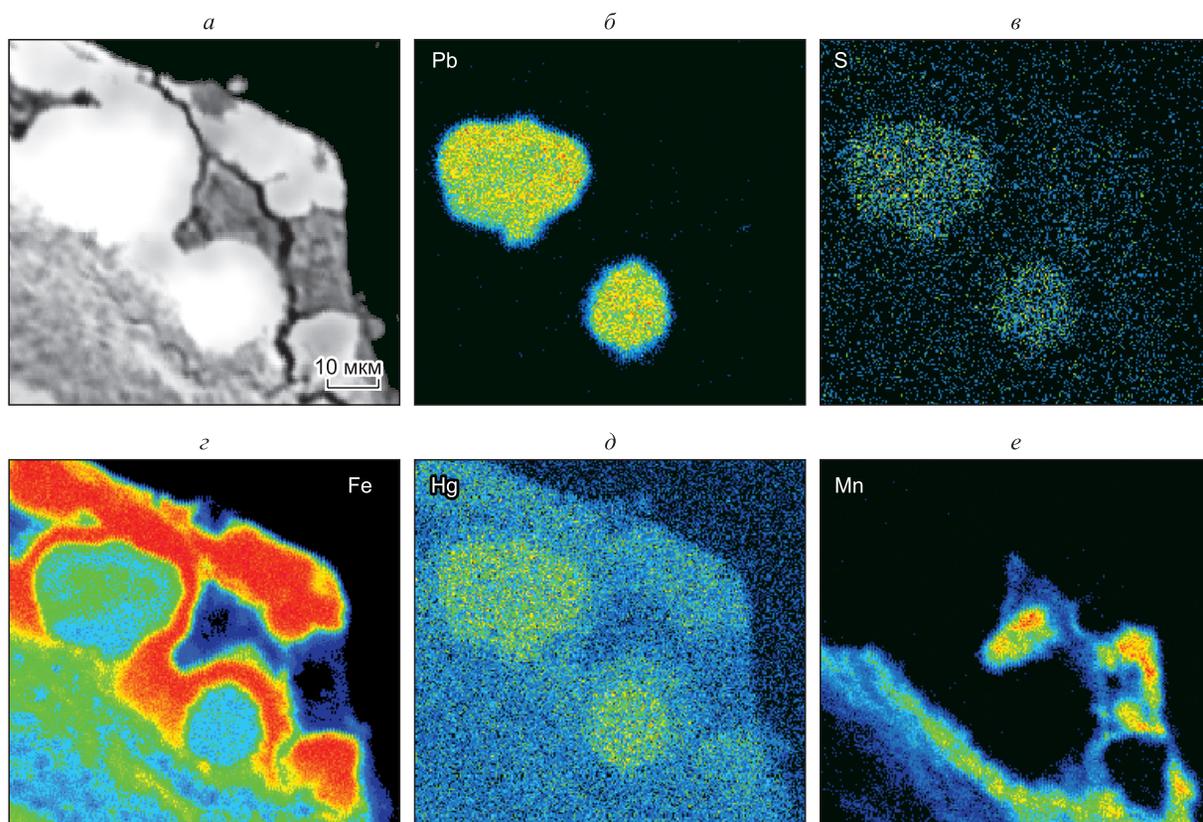


Рис. 14. Галенит в оторочке гидроксидов Fe и Mn.

Изображение дано: *a* — в обратнорассеянных электронах; *б, в, г, д, е* — в рентгеновских лучах.

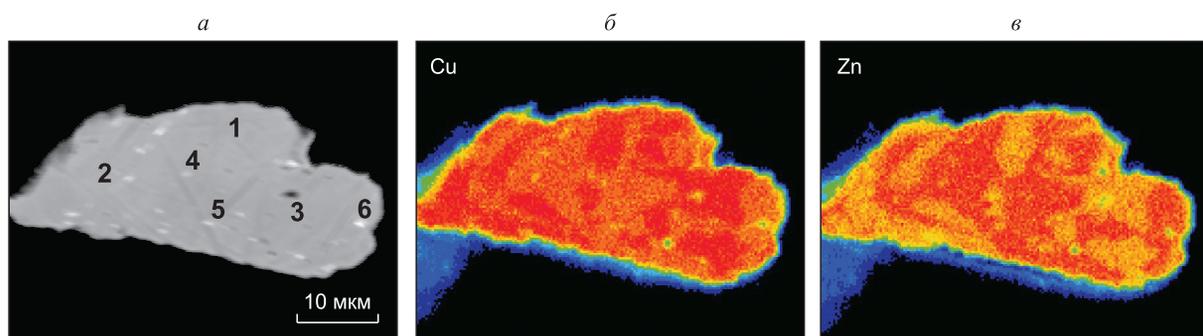


Рис. 15. Интерметаллическое соединение Cu-Zn (серое) с ультрадисперсными выделениями соединений Cu-Fe (белое) в рыхлых отложениях водотоков, дренирующих золото-серебряные зоны Дукатского месторождения.

Изображение дано: *a* — в обратнорассеянных электронах; *б, в* — в рентгеновских лучах. На части *a*: 1—6 — точки определения содержания элементов, указанных в табл. 14.

Свинец в ЛПР проявляется в основном в виде англезитовой «рубашки» по кристаллам галенита. Нередко такие каймы имеют зональное строение, что объясняется длительностью их формирования и, следовательно, изменением условий. Отмечается ассоциация англезита с акантитом, что является типичным для серебряных и золото-серебряных месторождений Северо-Востока России в целом. Это объясняется тем, что для англезита характерна тесная связь с минералами серебра. Кроме того, часто встречаются гидроксиды Fe и Mn, которые образуют совместные каймы вокруг галенита, иногда формируя тонкие концентрически-зональные и петельчатые структуры (рис. 14). В виде примеси в галените отмечена Hg.

Собственно галенит встречается довольно часто в виде обломков простой формы. Самостоятельные зерна появляются значительно реже либо в оторочке церуссита-англезита, либо в реликтовой форме. Встречаются иголки галенита, развивающиеся по корродированному в значительной степени магнетиту, в отдельных случаях такие выделения развиты довольно интенсивно и практически полностью замещают собой все зерно магнетита.

Цинк на фоне низких содержаний в потоках рассеяния представлен чаще всего примесной формой, в основном в гидроксидах Fe и пирите (см. табл. 4). Крайне редко встречаются собственно минеральные формы. Это в разной степени окисленные и корродированные единичные кристаллы сфалерита или интерметаллические соединения с медью (рис. 15, табл. 14). Подобные соединения были найдены и в первичных рудах [Филимонова, Трубкин, 2006]. Как большинство сульфидов, в рыхлых отложениях ЛППР в виде самостоятельных кристаллов и агрегатов сфалерита практически не встречается. Наиболее часто сфалерит находится в оторочке Ag-содержащих минералов (см. рис. 8, з, табл. 10).

Медь в потоках рассеяния Дукатского месторождения наиболее часто встречается в виде вторичных минералов, либо реликтов халькопирита в оторочке тех же вторичных минералов. Достаточно часто зерна халькопирита находятся в оторочке минералов серебра (см. рис. 8, д, табл. 10). Кроме того, в гипергенных условиях идет выделение Ag при разложении халькопирита. На это наталкивает форма выделения Ag-содержащих минералов в виде каплевидной оторочки вокруг зерен. Например, оторочка вокруг зерна халькопирита состоит из смеси мелких каплевидных выделений самородного Ag и штернбергита.

Самородная Cu в ЛППР изученных Au-Ag зон установлена всего в нескольких случаях. Она представлена отдельными яркими желтыми кристаллами игольчатой формы, слабо корродированными по периферии и по трещинам. Размеры этих выделений не превышают десятых долей миллиметра. То, что самородная Cu встречается редко и в основном характерна для зоны окисления месторождения, подтверждается материалами С.С. Двуреченской [2001]. Самородная Cu представляет собой продукт окисления Cu-содержащих минералов, таких как фаматинит, минерала, характерного для окисленных зон верхнерудных горизонтов месторождения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучены особенности распределения и ФН элементов-индикаторов оруденения (Au, Ag, Hg, Sb, As, Pb, Zn, Cu) в образцах, отобранных из рыхлых отложений ЛППР Au-Ag зон Дукатского месторождения (участок Чайка). Установлено, что особенности распределения и ФН рудных элементов в аллювиальных отложениях водотоков, дренирующих Au-Ag зоны, теснейшим образом связаны с особенностями состава руд. Так же как в рудах, главными элементами-индикаторами оруденения являются Au и Ag, основными сопутствующими — Hg, Sb, As, Pb, Zn, Cu.

Золото в аллювиальных отложениях представлено электрумом, тонкодисперсными частицами (дисперсными, ультрадисперсными, коллоидно-дисперсными) и так называемым «связанным», в основном с сульфидами, невидимым Au (сорбционной составляющей и производными от нее). Зерна электрума мелкие неоднородные, имеют пониженную пробность (330—480 ‰). В виде примеси Au установлено в разрушенных зернах аргентита и штернбергита. Значительная часть Au в аллювии и в рудах, тесно связана с сульфидами. Основным концентратором в рудах и носителем Au в ореольных зонах Au-Ag месторождений, является пирит, в котором «связанное» невидимое Au — сорбционная форма и производные от нее — составляют 90 % и более. Примесная форма Au отмечена в гидроксидах Fe. Естественно, что высокий процент в рудах и ореолах «связанного» с сульфидами и гидроксидами Fe, легко выщелачиваемого обычными кислотами Au, т.е. Au, находящегося в подвижной форме, оказывает существенное влияние на формирование ЛППР даже в условиях зоны криолитогенеза.

Серебро, кроме гипергенных образований, микровключений и ультраразмерных частиц, представлено самородной формой и частично сохранившимися сульфидами, реже сульфосолями. Среди минералов Ag преобладают акантит, штернбергит, самородное Ag. Сульфиды Ag в разной степени корродированны, значительная их часть имеет гипергенный облик. Самородное Ag представлено тонкодисперсными частицами. Из сульфосолей Ag отмечены пираргирит и прустит — минералы, характерные только для надрудных и верхнерудных горизонтов Au-Ag месторождений, что с достаточной степенью вероятности, может говорить в пользу положительного прогноза оруденения на глубину.

Остальные элементы (Hg, Sb, As, Pb, Zn, Cu), кроме сохранившихся в разной степени корродированных обломков зерен сульфосолей Ag, пирита, халькопирита, редко галенита и сфалерита, в большом количестве образуют сложные по составу вторичные минералы, среди которых преобладают оксиды и гидроксиды, в основном Fe. Из сульфидов Cu в потоках рассеяния отмечен такой минерал, как фаматинит, который, так же как сульфосоли Ag, характерен для верхнерудных горизонтов месторождения. В меньшей степени проявлены различные соли и водорастворимые сульфаты Fe, Cu, Pb, Zn.

Показано, что при изучении условий формирования ЛППР в зонах криолитогенеза, где процессы физического выветривания считаются главными, нельзя не учитывать роль химических факторов, в первую очередь сорбции и хемосорбции. Доказательством тому служит обогащенность Au, Ag и в це-

лом рудными элементами рыхлого материала «тонких» классов. Высокий процент в рудах и ореольных зонах подвижных, легко выщелачиваемых обычными кислотами ФН элементов, в сочетании с широким развитием в этих классах глинистых минералов и гидроксидов, оказывает на процессы хемосорбции существенное влияние. Так, в русловых отложениях головной части потока доля тонкодисперсного и «связанного» Au, элемента, как традиционно считается меньше всего подверженного процессам химического выветривания, достигает 50—60 %, а в шлейфе на фоне снижения концентраций она увеличивается до 95 %.

Еще в большей степени все вышесказанное относится к поведению и ФН в ЛПР таких элементов, как Hg, Sb и As. Особенности распределения и ФН этих элементов в ЛПР (редко встречающиеся собственно минеральные формы или, как для Hg, их полное отсутствие, большое количество вторичных образований, существенное преобладание сорбционной составляющей) можно объяснить еще большей неустойчивостью соединений Hg, Sb и As. Эти соединения, переходя в гипергенных условиях в легкоподвижные водорастворимые формы, в результате процессов хемосорбции дают в ЛПР новые образования. Даже такие элементы, как Pb, Zn и Cu, хотя и в меньшей степени, но все же подвержены этим процессам (появление в гипергенных условиях вторичных минералов, различных солей и водорастворимых соединений).

Таким образом, вопреки традиционной точке зрения, что основную роль при формировании ЛПР в условиях зон криолитогеоза играет физическое выветривание, установлено, что не менее существенная роль принадлежит процессам химического выветривания (растворение, окисление, сорбция, хемосорбция).

В практическом отношении особенности распределения и ФН рудных элементов-индикаторов Au-Ag оруденения во вторичных средах, так же как и в первичных, служат эффективным критерием оценки геохимических аномалий, выявленных по ЛПР. Они являются надежным показателем их рудноформационной принадлежности, что имеет важное практическое значение. Предполагается, что в ряде случаев с помощью ФН элементов, можно оценивать уровень эрозионного среза дренируемых зон и участков, т.е. прогнозировать оруденение на глубину.

Выявленные закономерности и установленные критерии могут успешно применяться на всех стадиях геохимического изучения рудоносных площадей в условиях зон криолитогеоза, начиная с прогнозной оценки перспектив, выявленных по ЛПР аномалий (экзогенных геохимических полей) на слабоизученных территориях, до детальных работ на конкретных, уже известных рудных объектах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 14-05-00361) и СО РАН (интеграционный проект № 48).

ЛИТЕРАТУРА

Васильева И.Е., Шабанова Е.В. Прямое атомно-эмиссионное определение серебра и золота в геологических образцах // Заводская лаборатория, 2005, т. 71, № 10, с. 10—16.

Воробьева С.Е., Меньшиков В.И., Цыханский В.Д., Пахомова Н.Н. Прямое атомно-абсорбционное определение Au, Ag, Sb, Te, Bi с применением электротермического атомизатора // VIII обл. науч.-техн. конф. по спектроскопии: Тез. докл. Тамбов, 1987, с. 55—56.

Дана Э.С. Описательная минералогия (справочник). М., ОНТИ, СССР, 1937, 423 с.

Двуреченская С.С. Гипергенные минералы серебряных месторождений. М., ЦНИГРИ, 2001, 258 с.

Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. М., Недра, 1983, 191 с.

Константинов М.М., Наталенко В.Е., Калинин А.И., Стружков С.Ф. Золото-серебряное месторождение Дукат. М., Недра, 1998, 203 с.

Константинов М.М., Костин А.В., Сидоров А.А. Геология месторождений серебра. Якутск, 2003, 282 с.

Кравцова Р.Г. Вторичные ореолы и потоки рассеяния золото-серебряных рудообразующих систем Северного Приохотья // Проблемы геохимии эндогенных процессов и окружающей среды: Материалы Всерос. науч. конф. (г. Иркутск, 24—30 сент., 2007 г.): в 3 т. Т. 3. Иркутск, ИГХ СО РАН, 2007, с. 45—49.

Кравцова Р.Г. Геохимия и условия формирования золото-серебряных рудообразующих систем Северного Приохотья. Новосибирск, Изд-во «Гео», 2010, 292 с.

Кравцова Р.Г., Соломонова Л.А. Золото в пиритах руд и метасоматитов золото-серебряных месторождений вулканогенных полей Северного Приохотья // Геохимия, 1984, № 12, с. 1867—1872.

Кравцова Р.Г., Андрулайтис Л.Д. Формы нахождения золота, серебра, ртути и особенности их распределения в рудах и эндогенных ореолах золото-серебряных месторождений // ДАН СССР, 1989, т. 307, № 2, с. 438—441.

Кравцова Р.Г., Андрулайтис Л.Д. Изучение форм нахождения элементов в рудах и ореолах с целью повышения эффективности геохимических поисков // Геохимические поиски рудных месторождений в таежных районах. Новосибирск, Наука, 1991, с. 129—138.

Кравцова Р.Г., Захаров М.Н. Геохимические поля концентрирования Дукатской золото-серебряноносной рудно-магматической системы (северо-восток России) // Геология и геофизика, 1996, т. 37 (5), с. 28—38.

Кравцова Р.Г., Захаров М.Н., Иванов О.П. Комплексные геохимические исследования Пестринского серебряносного рудного поля (Северо-Восток России) // Геология рудных месторождений, 1996, т. 38, № 5, с. 424—436.

Кравцова Р.Г., Боровиков А.А., Борисенко А.С., Прокофьев В.Ю. Условия формирования золото-серебряных месторождений Северного Приохотья, Россия // Геология рудных месторождений, 2003, т. 45, № 5, с. 452—473.

Кравцова Р.Г., Павлова Л.А., Рогозина Ю.И., Макшаков А.С. Первые данные по формам нахождения золота в литохимических потоках рассеяния Дукатского золото-серебряного месторождения (Северо-Восток России) // Докл. РАН, 2010а, т. 434, № 1, с. 96—106.

Кравцова Р.Г., Павлова Л.А., Рогозина Ю.И. Формы нахождения серебра в рыхлых отложениях потоков рассеяния Дукатского золото-серебряного месторождения (Северо-Восток России) // Геохимия, 2010б, № 7, с. 779—784.

Наталенко В.Е., Калинин А.И., Раевская И.С., Толстихин Ю.В., Халхалов Ю.А., Бельков Е.В. Геологическое строение Дукатского месторождения // Материалы по геологии и полезным ископаемым Северо-Востока СССР. Вып. 25. Магадан, Магадан. кн. изд-во, 1980, с. 61—73.

Новиков В.М., Россинская Э.С., Гольдапель С.Я. Высокочувствительный атомно-абсорбционный метод определения ртути в горных породах и минералах // Ежегодник-1970 СибГЕОХИ. Иркутск, 1971, с. 412—416.

Павлова Л.А., Парадина Л.Ф. Рентгеноспектральный микроанализ и его применение в минералогии. Якутск, ЯНЦ СО АН СССР, 1990, 186 с.

Павлова Л.А., Кравцова Р.Г. Определение форм нахождения серебра в литохимических потоках рассеяния методом РСМА (Дукатское золото-серебряное месторождение) // Методы и объекты химического анализа, 2006, т. 1, № 2, с. 132—141.

Прокопчук С.И. Сцинтилляционный спектральный анализ в геологии. Иркутск, Институт геохимии СО РАН, 1994, 64 с.

Сахарова М.С., Брызгалов И.А. Минералы серебра кварц-адуляр-родонитовых вулканогенных гидротермальных жил // Геология рудных месторождений, 1981, т. 23, № 6, с. 36—48.

Сидоров А.А., Константинов М.М., Еремин Р.А., Савва Н.Е., Сафронов Д.Н., Найбордин В.И., Гончаров В.И. Серебро (геология, минералогия, генезис, закономерности размещения месторождений). М., Наука, 1989, 240 с.

Таусон В.Л., Кравцова Р.Г. Оценка структурной составляющей примеси золота в пиритах эпitherмальных золото-серебряных месторождений (Северо-Восток России) // Записки РМО, 2002, ч. 131, вып. 4, с. 1—11.

Таусон В.Л., Бабкин Д.Н., Липко С.В., Кравцова Р.Г., Гребенщикова В.И., Лустенберг Э.Е. Неавтономная нанофаза на поверхности гидротермального пирита и ее геохимическое значение // ДАН, 2008, т. 423, № 6, с. 801—806.

Таусон В.Л., Пастушкова Т.М., Бабкин Д.Н., Краснощекова Т.С., Лустенберг Э.Е. Зависимости концентрации микроэлемента от размера кристалла в пробе // Геология и геофизика, 2010, т. 51 (7), с. 981—992.

Таусон В.Л., Бабкин Д.Н., Пастушкова Т.М., Краснощекова Т.С., Лустенберг Э.Е., Белозерова О.Ю. Двойственные коэффициенты распределения микроэлементов в системе «минерал—гидротермальный раствор». I. Аккумуляция золота пиритом // Геохимия, 2011, № 6, с. 595—604.

Таусон В.Л., Кравцова Р.Г., Смагунов Н.В., Спиридонов А.М., Гребенщикова В.И., Будяк А.Е. Структурное и поверхностно-связанное золото в пиритах месторождений разных генетических типов // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (2), с. 350—369.

Торгов В.Г., Хлебникова А.А. Атомно-абсорбционное определение золота в пламени и беспламенном графитовом анализаторе с предварительным выделением экстракцией сульфидами нефти // Журн. аналит. химии, 1977, т. 32, вып. 5, с. 960—964.

Филимонова Л.Г., Трубкин Н.В., Чугаев А.В. Особенности рассеянной минерализации Дукатского рудного района (Северо-Восток России) // Записки РМО, 2006, ч. СХХХV, № 5, с. 12—34.

Шило Н.А., Сахарова М.С., Кривицкая Н.Н., Ряховская С.К., Брызгалов И.А. Минералогия и генетические особенности золото-серебряного оруднения северо-западной части Тихоокеанского обрамления / под ред. А.А. Сидорова / М., Наука, 1992, 257 с.

Эмиссионный спектральный анализ в геохимии / Ред. Я.Д. Райхбаум. Новосибирск, Наука, 1976, 280 с.