

На правах рукописи



РЕДИН Юрий Олегович

**ЗОЛОТОРУДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ
ЛУГОКАНСКОГО РУДНОГО УЗЛА (ВОСТОЧНОЕ
ЗАБАЙКАЛЬЕ): МИНЕРАЛЬНЫЕ АССОЦИАЦИИ,
ВОЗРАСТ, ЭНДОГЕННАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ**

25.00.11 – «Геология, поиски и разведка твердых
полезных ископаемых, минерагения»

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

НОВОСИБИРСК 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии имени В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель:

Калинин Юрий Александрович, доктор геолого-минералогических наук, зав. лабораторией прогнозно-металлогенических исследований ФГБУН Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (г. Новосибирск)

Официальные оппоненты:

Горячев Николай Анатольевич, член-корреспондент РАН, профессор, доктор геолого-минералогических наук, директор ФГБУН Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН (г. Магадан)

Спирidonov Александр Михайлович – доктор геолого-минералогических наук, заместитель директора ФГБУН Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск)

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск)

Защита состоится 24 апреля 2015 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 003.067.03, созданного на базе ФГБУН Институт геологии и минералогии имени В.С. Соболева СО РАН, в конференц-зале.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3.
Факс: (383) 333-21-30, e-mail: turkina@igm.nsc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБУН Института геологии и минералогии имени В.С. Соболева СО РАН (адрес сайта <http://www.igm.nsc.ru>, раздел «Образование»)

Автореферат разослан 12 марта 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор геол.-мин. наук



О.М. Туркина

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. Лугоканский рудный узел расположен в юго-восточной части Забайкалья. Восточное Забайкалье является одним из старейших золоторудных районов Сибири и уже более 300 лет остается крупнейшим источником важнейших видов минерального сырья России. В его пределах известно большое количество золоторудных, золотосодержащих комплексных, сурьмяных, ртутных и других месторождений полезных ископаемых. До последнего времени важное значение в балансе запасов и добыче золота имели золото-сульфидно-кварцевые (Дарасунское, Ключевское, Итакинское, Средне-Голготайское и др.) и золото-серебряные (Балейское, Тасеевское) месторождения [Петухов и др., 2003]. Другие генетические типы золоторудных месторождений (золото-ртутный в карбонатных породах, золото-сульфидный в черных сланцах, золото-сульфидно-скарновый, золото-медно-молибден-порфиновый и др.) хотя и выделяются рядом авторов, но не получили пока должной оценки и недостаточно изучены в геологическом и геохимическом плане [Спиридонов и др., 2006]. Одним из таких примеров является Лугоканский рудный узел, в котором разными исследователями выделяются золото-медно-скарновый [Кормилицын, Иванова, 1968; Скурский, 1996], золото-медно-молибден-порфиновый [Сазонов, 1978; Сизых Вит.И., Сизых Вал. И., 2001; Бессонов, 2009; Новокрещенов и др., 2009ф] и карлинский типы оруденения [Борисенко и др., 2006; Карелин и др., 2011ф]. Рудный узел включает в себя несколько месторождений (Лугоканское, Серебряное, Солонеченское) и ряд более мелких рудопоявлений. Суммарные запасы полезных ископаемых для Лугоканского рудного узла оцениваются \approx Au-80 т., Ag-1.19 тыс. т., Cu-300 тыс. т., Sb-70 тыс. т [Годовой отчет..., 2008, 2013]. В результате проведенных работ ООО “Востокгеология” в пределах рудного узла в 2007 г. было открыто месторождение Серебряное. Лугоканское и Солонеченское месторождения известны давно и длительное время изучались многими исследователями. Вместе с тем, в настоящее время в опубликованной литературе отсутствуют данные по минералого-геохимическим особенностям руд, химическому составу самородного золота, сульфидных минералов, по их изотопному составу, возрасту оруденения, условиям образования. Не менее важными остаются вопросы связи золотого оруденения с конкретными магматическими комплексами. С учетом продолжающихся в Восточном Забайкалье поисково-разведочных работ все эти обстоятельства и определяют актуальность настоящего исследования.

Целью работы являлось выяснение минералого-геохимических особенностей руд, последовательности их формирования и

закономерностей локализации, установление возраста и пространственно-генетических связей золотого оруденения Лугоканского рудного узла с магматическими комплексами.

Для достижения поставленной цели решались следующие *задачи*:

1. На основе полевых исследований и анализа литературных и фондовых материалов охарактеризовать геологическое строение рудного узла.

2. Изучить минеральный состав руд, последовательность формирования минеральных ассоциаций и закономерности их пространственного размещения.

3. Установить типоморфные особенности состава рудных минералов и выявить тенденции их изменения по латерали и на глубину.

4. На основе Ag-Ag датирования определить возраст различных типов золотого оруденения и проанализировать его временные корреляции с известными магматическими комплексами.

5. Изучить изотопный состав серы основных сульфидных минералов для оценки источников рудного вещества.

6. На основе изучения флюидных включений оценить физико-химические параметры рудоотложения для разных типов минерализации.

Объектом исследования являлся Лугоканский рудный узел, представляющий уникальный пример совмещения разных типов оруденения на небольшой площади и включающий в себя три месторождения: Лугоканское, в 7 км южнее располагается Серебряное и ещё через 3,5 км к югу – Солонеченское месторождения.

Фактический материал и методы исследования. В основу работы положены материалы, собранные автором в 2010-2013 годах в ходе полевых работ в Восточном Забайкалье, а также любезно предоставленные А.С. Борисенко, Ю.А. Калинин, и геологами ООО “Востокгеология”. Были изучены образцы руд и пород, отобранных по разведочным канавам и буровым скважинам (более 500 образцов) с месторождений Лугоканского рудного узла, а также из других золоторудных, сурьмяных и комплексных месторождений Восточного Забайкалья. Автором было изготовлено и изучено более 400 аншлифов, около 40 прозрачно-полированных шлифов и 20 прозрачно-полированных пластин. Из протолочных (400 шт.) и шлиховых (20 шт.) проб выделено около 350 знаков самородного золота. В процессе работы было выполнено более 400 микрорентгеноспектральных анализов сульфидных минералов и самородного золота, более 500 определений химического состава минералов на сканирующем электронном микроскопе с энергодисперсионными приставками, изучено более 200 флюидных включений, более 20 определений содержания золота атомно-

абсорбционным, ICP-MS и LA-ICP-MS методами, 5 определений возраста Ag-Ag методом. Выполнено 85 анализов изотопного состава серы рудных минералов. Все перечисленные виды анализов выполнены в Аналитическом центре ИГМ СО РАН (г. Новосибирск).

Научная новизна. Впервые на основе современных методов детально изучен минеральный состав руд месторождений Лугоканского рудного узла. Выделены основные минеральные ассоциации, установлена последовательность их формирования и геохимические особенности. В ходе настоящих исследований впервые установлены золото-висмутовая (на Серебряном месторождении) и золото-серебряная (на Лугоканском месторождении) минерализации. В работе впервые приведены детальные данные по химическому составу самородного золота и сульфидных минералов, их изотопному составу. Выявлены закономерности пространственного размещения минеральных ассоциаций, охарактеризована латеральная и вертикальная зональность. Проведенные термобарогеохимические исследования флюидных включений в минералах основных минеральных ассоциаций позволили оценить физико-химические параметры рудоотложения. Первые данные по изотопному составу серы сульфидных минералов позволили установить вероятные источники серы рудного вещества для различных минеральных ассоциаций. На основе впервые полученных данных по Ag-Ag возрасту различных типов золотого оруденения Лугоканского рудного узла и магматических пород обосновано выделение нескольких этапов формирования и установлена временная связь золоторудной минерализации с конкретными магматическими комплексами.

Практическая значимость. Полученные в работе данные об этапности формирования золотого оруденения, его временной корреляции с определенными магматическими комплексами могут быть использованы при постановке поисково-оценочных работ, а также в прогнозе и поиске месторождений золота в этом регионе. Данные о минеральных формах благородных металлов в рудах месторождений могут использоваться при разработке технологий их отработки и обогащения, а также решать проблему комплексного использования минерального сырья.

Апробация результатов. Результаты исследования представлялись на Международных и Всероссийских научных конференциях, таких как: “Металлогения древних и современных океанов”, Миасс, 2011; “34 International Geological Congress”, Брисбен (Австралия), 2012; “International Geologica Belgica meeting”, Брюссель (Бельгия), 2012; “The 6th International Siberian Early Career Geoscientists Conference”, Новосибирск, 2012; “Минерагения Северо-Восточной Азии”, Улан-Удэ, 2012; “Современные проблемы геохимии”, Иркутск, 2012; “Геодинамика

и минерагения Северо-Восточной Азии”, Улан-Удэ, 2013; “Рудообразующие процессы: от генетических концепций к прогнозу и открытию новых рудных провинций и месторождений”, Москва, 2013; “Геология, геофизика и минеральное сырье Сибири”, 2014, Новосибирск.

По теме диссертации опубликовано 12 работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 7-и глав, заключения и списка литературы из 166 наименования, общий объем работы составляет 124 страницы, включая 56 рисунков и 20 таблиц.

Благодарности. Автор выражает искреннюю признательность за научное руководство и помощь в подготовке диссертационной работы д.г.-м.н. Ю.А. Калинину. Автор благодарит за неоценимые консультации и помощь на всех стадиях работы заведующего лабораторией д.г.-м.н. А.С. Борисенко. За обсуждение результатов и полезные советы автор выражает искреннюю благодарность: П.А. Неволько, В.Ф. Дульцеву, А.А. Шадринной, В.В. Колпакову, Р.А. Шелепаеву, В.П. Сухорукову, О.М., Туркиной, М.М. Буслову, А.А. Боровикову, М.В. Кириллову, И.Р. Прокопьеву. За помощь в проведение экспедиционных работ, предоставленные образцы, помощь и поддержку автор благодарит А.В. Кузнецова, Е.А. Шивохина, В.М. Козлову, А.В. Баранова, И.Н. Локтеву, а также руководство и геологов ООО “Востокгеология”. Отдельная признательность аналитикам ИГМ СО РАН: В.Н. Королюку, М.В. Хлестову, А.В. Травину, В.Н. Реутскому, М.Н. Колбасовой, О.С. Хмельниковой; В.Г. Цимбалист, В.Н. Ильиной, С.В. Палесскому.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда научных исследований (гранты: №10-05-00677, №13-05-00998).

Геологическое строение Лугоканского рудного узла

Лугоканский рудный узел расположен в междуречье рр. Аргунь - Шилка, в пределах Ага-Борзинской структурно-формационной зоны Монголо-Охотского орогенного пояса.

Формирование Лугоканского рудного узла происходило на протяжении средне-позднеюрской и раннемеловой эпох тектономагматической активизации.

Домезозойский фундамент сложен рифейскими-нижнекембрийскими (быстринская свита E_1bs) и девонскими терригенно-карбонатными отложениями (ильдиканская D_{1-2il} и яковлевская свита D_{2-3jak}), которые смяты в линейные складки северо-восточной ориентировки, прорванные ундинскими гранитоидами. Мезозойский чехол сформировался в пределах локальных впадин и сложен вулканогенно-осадочными и осадочными образованиями верхней юры-нижнего мела (Глушковская J_3gl_1 и Тургинская свита K_{1tr_1}) (рис. 1). Завершается

мезозойский тектогенез формированием небольших грабеноподобных приразломных впадин раннемелового возраста, выполненных грубообломочной молассой. Наравне со складчатыми дислокациями, широко проявлены разрывные нарушения: Газимуровская мобильная зона и Урово-Джалирский разлом. Газимуровская мобильная зона северо-восточного простираения представлена сложной системой сопряжённых разломов (Аэмканский, Северо-Солонеченский, Сивачинский, Солонеченский, Будюмканский). По кинематике большинство разломов являются взбросо-надвигами и сбросами. Большинство разломов, в том числе и главных, заложено в юрско-раннемеловое время, соответствующее коллизионному и постколлизионному этапам развития Монголо-Охотского пояса.

В Лугоканском рудном узле проявлены разновозрастные группы магматических комплексов: позднепалеозойская и позднемезозойская. Первая группа представлена ундинским и кутомарским комплексами. Ко второй – относятся шахтаминский, кукульбейский и “порфиновый” комплексы. Непосредственно на месторождениях развиты интрузивные породы шахтаминского и порфинового комплекса. Лугоканское месторождение приурочено к гранодиоритовому массиву, расположенному в центральной части рудного узла. Интрузивные образования Лугоканского массива относятся ко второй фазе шахтаминского комплекса ($\gamma\delta\lambda_2J_{2-3s}$). В составе массива доминируют породы, варьирующие по составу от гранодиорит- до гранит-порфиров. Абсолютный возраст (K-Ar) гранодиорит-порфиров составляет 178-157 млн. лет [Сазонов, 1978]. В приконтактных частях интрузива вмещающие породы мраморизованы и скарнированы, мощность эндо- и экзоскарнов от первых см до десятков м, при протяжённости до первых сотен метров. Такие гранитоидные массивы, расположенные на юге Восточного Забайкалья, относятся к коллизионным образованиям [Zogin et al., 2001; Берзина и др., 2013]. В пределах массива и вмещающих его пород (Лугоканское м-е), а также на удалении от него (Серебряное м-е) распространены мелкие тела и дайки порфинового комплекса. Некоторые исследователи относят дайки к заключительной фазе шахтаминского комплекса [Сидоренко, 1961], другие выделяют их в самостоятельный порфиновый комплекс [Сотников и др., 1977; Берзина и др., 1996, 2013]. С комплексами малых интрузий связывают промышленное молибденитовое, полиметаллическое, золото-полиметаллическое и золотое оруденение [Тимофеевский, 1972; Евсеев, 1975; Полохов и др., 1977; Таусон, 1982; Таусон и др., 1987; Зорина, 1993; Коваль, 1998; Прокофьев и др., 2000; Спиридонов и др., 2006; Абрамов, 2012].

Защищаемые положения и их обоснование

1. *Лугоканский рудный узел характеризуется комплексным (Au, Ag, Cu, Sb) полистадийным оруденением: установленная последовательность рудообразования включает в себя следующие минеральные ассоциации (от ранних к поздним): золото-пирит-арсенопиритовую (Au-890-960 ‰, Cu-0.3%) – золото-халькопиритовую (Au-900-920 ‰, Hg-0.4%) – золото-полиметаллическую (Au-750-870 ‰, Hg-0.6%) – золото-висмутовую (Au-730-940 ‰, Hg-0.6%) – золото-серебряную (Au-380-660 ‰, Hg-2.2%) – сурьмяно-ртутную (Sb-Hg).*

К наиболее ранним и высокотемпературным золоторудным ассоциациям относятся золото-пирит-арсенопиритовая и золото-халькопиритовая.

Золото-пирит-арсенопиритовая (Au-As) минеральная ассоциация наибольшее распространение получила на Лугоканском (вкрапленность, гнезда, прожилки в скарнах и кварцевых жилах) и Серебряном месторождениях (вкрапленность и прожилки в кварц-серицитовых (\pm турмалин) метасоматитах). На Солонеченском месторождении Au-As ассоциация проявлена локально и приурочена к зонам брекчирования и катаклаза. Au-As ассоциация представлена пиритом, арсенопиритом и самородным золотом (I). *Арсенопирит* представлен двумя генерациями – сернистым ($S/As > 1$) и мышьяковистым ($As/S > 1$). Мышьяковистый арсенопирит встречается в виде изометрических катаклазированных кристаллов, сростков неправильной формы и характерен для Лугоканского месторождения. На месторождении Серебряное он проявлен локально и обнаружен в ассоциации с лёллингитом и пирротинитом в известковых скарнах. Из примесей в значимых количествах в нем отмечаются (%): Sb-0.4; Ni-0.1; Co-0.1; Au-0.1. Сернистый арсенопирит представлен одиночными кристаллами призматического, удлиненно-призматического и игольчатого облика и характерен для Серебряного и Солонеченского месторождений. Из примесей в нем отмечены максимумы (%): Co – 0.5, Ni – 0.1, Sb – 0.3 и Au – 0.08. *Пирит* является сквозным минералом, из примесей в нем отмечаются (%): As – 1.9; Ni – 0.5; Co – 0.2; Au – 0.1. Примесь As характерна для пирита из кварц-серицитовых метасоматитов месторождения Серебряное. *Самородное золото* наблюдалось в виде удлиненных, комковидных, интерстициальных выделений в основной массе породы, а также в сростаниях с пиритом и арсенопиритом (рис. 2а). Пробность самородного золота составляет 890-960‰. Отличительной особенностью Au данной генерации является примесь меди до 0.3%.

Золото-халькопиритовая (Au-Cu) минеральная ассоциация проявлена только на Лугоканском месторождении и представлена

халькопиритом, пирротинном, пиритом, борнитом и самородным золотом (II). *Халькопирит* встречается преимущественно в скарнах в виде мономинеральных скоплений, вкрапленности и прожилков. В кварцевых жилах халькопирит цементирует более ранний пирит и развивается по микротрещинам в арсенипирите. В свою очередь кристаллы халькопирита часто катаклазированы и цементируются более поздними сульфидами. В халькопирите в виде звездчатых продуктов распада твердых растворов отмечается сфалерит, что свидетельствует о высоких температурах образования халькопирита [Рамдор, 1962]. В борните в виде продуктов распада твердого раствора отмечаются сетчатые и тонкие таблички халькопирита. Самородное золото обнаружено в виде включений в халькопирите и в сростаниях с ним (рис. 2б). Пробность Au составляет 900-920 ‰ (Hg до 0.4%).

Золото-полиметаллическая минеральная ассоциация (Au-Pb-Zn) представлена пиритом, галенитом, сфалеритом, халькопиритом тетраэдритом, теннантитом и самородным золотом (III). Наибольшее распространение она получила на Серебряном месторождении в виде вкрапленности и прожилков в кварц-серицитовых метасоматитах. Локально Au-Pb-Zn ассоциация проявлена на Лугоканском и Солонеченском месторождении (в кварц-карбонатных прожилках). В *галените* из примесей установлены серебро (до 3%) и висмут (до 1%). Галенит с примесью серебра характерен также и для Лугоканского месторождения. Для Серебряного месторождения характерен галенит с примесью висмута, который обнаружен как на контактах, так и в дайках монзонит-порфиоров. *Тетраэдрит* и *теннантит* встречаются в виде включений в галените, микропрожилков в халькопирите, а также образуют агрегаты неправильной формы и ксеноморфные выделения в нерудной массе (рис. 2в). Как правило, блеклая руда выполняет микротрещины в более ранних сульфидах (халькопирите, арсенипирите, пирите). Характерной примесью для тетраэдрита и теннантита является Ag до 4%. Примесь ртути (до 5%) отмечается в теннантите на Солонеченском месторождении. В виде включений в тетраэдрите отмечается *итромейерит* (Ag-50%; Cu-33%; S-16%; Fe-1%). *Сфалерит* ассоциирует в основном с галенитом и встречается в виде ксеноморфных выделений и зернистых масс. Характерной примесью является кадмий (до 4-9%) [Козлова и др., 2010]. *Самородное золото*, обнаруженное в сростаниях с галенитом, сфалеритом и блеклой рудой, имеет пробность 800-870 ‰ (примесь ртути до 0.6%).

Золото-висмутовая минеральная ассоциация (Au-Bi) проявлена только на Лугоканском и Серебряном месторождениях. Она является наложенной на более ранние и высокотемпературные минеральные

ассоциации. Рудные минералы представлены целой группой висмутовых и висмутосодержащих минералов.

На месторождении *Серебряное* золото-висмут-теллуридная минеральная ассоциация представлена: висмутином, жозеитом В ($\text{Bi}_4\text{Te}_2\text{S}$), соединением PbBiS (гиссенитом или бурсаитом), сульфоцумоитом ($\text{Bi}_3\text{Te}_2\text{S}$), теллуридом висмута, мальдонитом (Au_2Bi), самородным висмутом, которые образуют мелкокристаллические выделения и вместе с самородным золотом (IV) тяготеют к микротрещинам в мышьяковистом арсенипирите (рис. 2г). Пробность самородного золота в сростаниях с висмутовыми минералами составляет 730–820 ‰, помимо серебра в нем присутствует примесь ртути, максимальное содержание которой достигает 0.6%. Общая последовательность кристаллизации выглядит следующим образом: (соединение PbBiS → висмутин → жозеит В → сульфоцумоит → теллурид висмута → самородный висмут → самородное золото → мальдонит). Последовательность формирования указанных минералов указывает на то, что этот процесс происходил при постепенном понижении фугитивности серы. Наличие интерметаллида висмута (мальдонита) свидетельствует об образовании его при воздействии золотоносных растворов на ранее отложенный висмут.

На *Лугоканском месторождении* Au-Bi ассоциация представлена: сульфидом (висмутин), теллуридом (цумоит), сульфотеллуридами (тетрадимит, ингодит), сульфосолями Cu и Bi (эмплектит, виттихенит) (минералы группы айкинита: наффилдит?, пекоит, фридрихит?), сульфосолями Pb и Bi (козалит, ашамальмит, гиссенит), сульфосолю висмута (Ag-Pb-Bi) (ширмерит), самородным висмутом. Нерудные минералы представлены кварцем, адуляром, флюоритом, баритоцелестином, карбонатом. Выделяются три минеральных парагенезиса:

1 – фридрихит-пекоит-виттихенит-эмплектит-висмутиновый (Bi-Cu-Pb);

2 – висмутин-наффилдит-ширмерит-ашамальмит-гиссенитовый (Bi-Pb-Sb-Ag);

3 – тетрадимит-ингодит-козалит-цумоит-висмутиновый (Bi-Te-Pb).

Различия в фазовом составе висмутовых и висмутосодержащих минералов напрямую зависят от минералого-геохимических особенностей ранних ассоциаций. *Первый парагенезис* наложен на скарны с ранней золото-халькопиритовой ассоциацией, в этом случае за счет халькопирита образовался целый ряд Bi-Cu сульфосолей. В качестве элементов примесей присутствуют (‰): в висмутине (Pb-3.5, Sb-1, Se-1.5), эмплектите (Pb-3, Te-0.9, Se-0.3), фридрихите (Se-4). Самородное золото

обнаружено во включениях в эмплектите, виттихените, а также в сростаниях с фридрихитом. Пробность золота составляет 800-890 ‰. Кроме того, в висмутине отмечаются включения гессита.

Второй парагенезис обнаружен в кварц-адуляровых прожилках, заполняющих зоны дробления в известняках. Ранняя ассоциация представлена катаклазированными кристаллами арсенопирита и халькопирита, в трещинах и в межзерновом пространстве которых развита полиметаллическая ассоциация. Там, где происходит совмещение висмутовой минерализации с Ag-блеклыми рудами, образуются сульфосоли сложного состава (Ag-Pb-Bi). Тогда как в кварце развит только гиссенит в виде игольчатых и призматических кристаллов. Ашамальмит и наффилдит образуют длиннопризматические кристаллы и агрегаты неправильной формы. В ширмерите ($\text{AgPb}_2\text{Bi}_3\text{S}_7$) отмечается примесь селена (до 1%). Самородное золото, обнаруженное в сростаниях с гиссенитом, имеет пробность 910-940 ‰.

Третий парагенезис наложен на скарны с ранней арсенопиритовой минерализацией. Висмутин образует сферообразные, игольчатые, кристаллы и агрегаты неправильной формы, а также образует каймы, мелкокристаллические выделения в трещинах и межзерновом пространстве арсенопирита. В виде включений в нем отмечаются цумоит (Bi_2Te_2), козалит ($\text{Pb}_5\text{Bi}_2\text{S}_5$), тетрадимит ($\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{S}$) (рис. 2д), ингодит (Bi_2TeS) и самородное золото. В качестве элементов примесей в висмутине установлен Pb до 5%. Самородное золото, наблюдавшееся в сростаниях и в виде включений в висмутине, цумоите (рис. 2е), козалите, тетрадимите, ингодите, имеет пробность 880-940 ‰.

Золото-серебряная (Au-Ag) минеральная ассоциация наблюдалась только на Лугоканском месторождении, причем в образцах с поверхности, которые представляют собой окисленные руды. Она представлена низкопробным самородным золотом (V) (электрум) (рис. 2ж), кюстелитом и вейшанитом (природная амальгама золота). Морфология самородного золота характеризуется развитием жилковидно-пластинчатых, трещинных, интерстициальных и проволоковидных выделений. Характерной особенностью состава самородного золота Au-Ag минеральной ассоциации является его высокая серебристость, что придает самородному золоту белый (серебристый) оттенок. Пробность электрума варьирует в интервале 400-660 ‰, с модой распределения 400-500‰. Для всех выделений самородного золота характерна примесь ртути до 2 ‰. В единичных случаях отмечалось зональное строение зерен, ядра золотин сложены более высокопробным самородным золотом (по данным сканирующей электронной микроскопии 680 ‰), вокруг которого развивается электрум. Ртутистый электрум, кюстелит и вейшанит

характерны для месторождений, формировавшихся в условиях низкой фугитивности серы (fS_2) [Спиридонов, 2010].

Сурьмяно-ртутная (Sb-Hg) минеральная ассоциация наиболее широко развита на Солонеченском и Серебряном месторождениях.

На месторождении Серебряное Sb-Hg ассоциация представлена *сульфосолевым (Sb и Pb) парагенезисом*. В пределах тектонических зон сконцентрировано наиболее богатое сурьмяное оруденение, развитое преимущественно в кварц-карбонатном цементе. В составе цемента господствующую роль играют буланжерит, джемсонит, бурнонит и менегинит, которые цементируют катаклазированные зерна более ранних сульфидов (пирита, арсенопирита, сфалерита, галенита) (рис. 2з). Характерной примесью для сульфосолей является As (до 2.5%). Примесь Вi (до 1.75%) отмечается в буланжерите, наибольшие концентрации висмута установлены в менегините (до 10%). Структуры замещения галенита буланжеритом и менегинитом часто наблюдаются в полированных аншлифах. *Антимонитовый парагенезис* наиболее широко проявлен на флангах рудного узла (Солонеченское месторождение) и представлен антимонитом, реальгаром, аурипигментом, киноварью и баритом. Антимонитовая минерализация представлена вкрапленными и гнездово-вкрапленными минерализованными зонами в джаспероидах на Солонеченском месторождении и редкой вкрапленностью на Серебряном и Лугоканском месторождениях. Наиболее богатые сурьмяные рудные тела приурочены к зоне взбросо-надвига (Солонеченский разлом), контролирующей сурьмяное оруденение. Геологические и минераграфические наблюдения отчетливо показывают, что сурьмяное оруденение наложено на ранние золото-сульфидные руды. Антимонит является одним из наиболее поздних рудных минералов, выполняющим роль цемента в катаклазированных джаспероидах (рис. 2и). Аурипигмент и реальгар проявлены очень локально в виде прожилков, секущих антимонитовые агрегаты, в ассоциации с баритом и флюоритом.

2. *Формирование золотого оруденения Лугоканского рудного узла тесно связано со становлением шахтаминского и дайкового (порфирового) магматических комплексов. Развитие процессов магматизма и рудообразования в Лугоканском рудном узле, по данным прямых геологических наблюдений и Ar-Ar датирования, выражается следующим последовательным рядом: Au-As (163±1.9 млн. лет, Ar-Ar) → шахтаминский комплекс (161.7-161 млн. лет, U-Pb) → Au-Cu (160±2 млн. лет, Ar-Ar) → порфировый комплекс (159-155 млн. лет U-Pb, Ar-Ar) → Au-Pb-Zn (156.3±1.8 млн. лет, Ar-Ar) → Au-Bi (155.9±4.5, Ar-Ar) → Au-Ag → Sb-Hg.*

Важной проблемой генезиса золоторудных месторождений Восточного Забайкалья является определение возраста золотого оруденения, что является основой его корреляции с магматизмом и анализа металлогении золота Восточного Забайкалья. Полученные ранее А.С. Борисенко с соавторами [2010] данные (Ar-Ar, Re-Os методы) показывают, что возраст золотого и золотосодержащего оруденения охватывает интервал средняя юра – ранний мел.

Проведенные нами исследования возраста K-содержащих минералов синрудных парагенезисов $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методом показали, что наиболее ранними золоторудными минеральными ассоциациями являются – Au-As и Au-Cu. К более поздним золоторудным минеральным ассоциациями относятся Au-Pb-Zn и Au-Bi. Полученные данные позволяют в первую очередь рассмотреть вопрос о связи золоторудной минерализации Лугоканского рудного узла с конкретными магматическими образованиями. Общеизвестно, что подавляющая часть золоторудных месторождений Восточного Забайкалья находятся в генетической и парагенетической связи с позднюрскими и раннемеловыми магматическими комплексами.

Сопоставление основных рубежей формирования золотого оруденения со становлением позднюрских магматических комплексов в регионе показало близкий возраст их формирования (рис. 3). Формирование золотого оруденения Лугоканского рудного узла тесно связано со становлением шахтаминского и порфиривого магматических комплексов. Ранние золоторудные ассоциации (Au-As и Au-Cu) являются додайковыми и пространственно приурочены (Лугоканское м-е) к эндо- и экзоконтактовым частям Лугоканского массива. Близкий возраст формирования магматических пород шахтаминского комплекса и Au-As, Au-Cu ассоциаций позволяют сделать вывод об их пространственно-генетической связи. В то же время, Au-Bi и Au-Pb-Zn ассоциации являются последайковыми образованиями, которые пространственно и генетически связаны со становлением порфиривого комплекса. На это указывает близкий возраст формирования порфиривого комплекса и золоторудной минерализации (Au-Bi и Au-Pb-Zn), а также приуроченность ее к ареалам развития монзонит-, диорит-, и гранит-порфиров. Подтверждает это предположение и то, что изменение пород отмечаются в непосредственной близости к дайковым телам, формируя наиболее мощные ореолы в их лежачем боку.

Нельзя также не отметить, что полученная оценка возраста для Лугоканского рудного узла близка возрасту других рудных объектов. Так, для пород амуджикано-сретенского комплекса, со становлением которого

связана золоторудная минерализация Карийского рудного поля, получены близкие изотопные возраста: 154.3 ± 1.8 и 155.9 ± 1.8 [Ефремов и др., 2013].

Результаты исследования изотопного состава серы сульфидных минералов (рис. 4) показали незначительное утяжеление серы относительно метеоритного стандарта (от +2 до +6.6‰), что свидетельствует о глубинном эндогенном (мантийно-коровом) источнике серы рудных минералов. Узкий диапазон колебаний изотопного состава серы подтверждает вывод о генетической связи золоторудной минерализации Лугоканского рудного узла с верхнеюрскими магматическими комплексами. Большие отрицательные значения $\delta^{34}\text{S}$ в реальгаре Солонеченского месторождения (-11.6‰) могут быть объяснены частичным окислением сульфидной серы рудного раствора или флюида при повышении окислительного потенциала. В результате происходит разделение изотопов между окислительными и восстановленными формами серы, причем последние обогащаются легким изотопом (S^{32}). В таких случаях рудный процесс заканчивается отложением гипогенных сульфатов, в нашем случае барита, находящегося в ассоциации с реальгаром и аурипигментом.

3. Лугоканский рудный узел представляет собой полихронную рудно-магматическую систему, в пределах которой проявлена латеральная и вертикальная эндогенная зональность. Латеральная зональность проявляется в последовательном сокращении доли высоко- и среднетемпературных минеральных ассоциаций и в снижении масштабов проявления позднеюрского магматизма от центральной части рудного узла к его флангам. Вертикальная зональность выражается в количественной и качественной смене одних минеральных ассоциаций другими от верхних горизонтов к нижним, что также отражается и в составе самородного золота

Как показали проведенные исследования, на Лугоканском месторождении с глубиной происходит количественная и качественная смена одних минеральных ассоциаций другими. Так, ранние минеральные ассоциации наиболее широко распространены и характерны для нижних горизонтов месторождения. Действительно, магнетитовая минерализация приурочена к скарновым образованиям и окаймляет контакты интрузива. В эндо- и экзоконтактных частях Лугоканского массива широкое распространение также получили и ранние золоторудные ассоциации (золото-пирит-арсенопиритовая и золото-халькопиритовая), для которых характерны наиболее высокие температуры образования 290-390°C. По мере продвижения от нижних горизонтов к верхним увеличивается роль, золото-полиметаллической ассоциации (с халькопиритом), для которой характерны средние температуры образования – 225-290°C. Наиболее

низкие температуры образования характерны для золото-висмутовой минерализации из кварц-адуляровых жил и составляют 170-220°C. Более поздняя золото-серебряная и сурьмяно-ртутная минерализация установлена только в верхних частях месторождения. Нередко такая последовательность усложняется телескопированием руд. Идеализированная схема вертикальной зональности Лугоканского месторождения показана на рис. 5. По мере эволюции процесса минералообразования происходило постепенное уменьшение концентрации солей и CO₂ в составе рудообразующих флюидов, а также снижение их температуры. Наличие рудных фаз во включениях свидетельствует о потенциальной металлоносности флюида. Таким образом, в пределах Лугоканского месторождения наблюдается прямая регрессивная (вертикальная) эндогенная зональность [Рундквист, Неженский, 1975].

Однако общий характер подобной зональности показывает, что изменение минеральных ассоциаций по вертикали обусловлено двумя главными факторами: глубиной эрозионного среза и удаленностью от магматических образований. Фрагментарный характер проявления эпitherмального оруденения в пределах Лугоканского месторождения обусловлен значительным эрозионным срезом. При большом эрозионном срезе значительные объемы пород и зонально распределенная в них минерализация удалены, в результате чего объемная зональность фиксируется в плане в виде латеральной (горизонтальной) зональности. В пределах рудного узла четко намечается “эпицентр” оруденения с наибольшим разнообразием минеральных ассоциаций – Лугоканское месторождение, приуроченное к одноименному массиву. Эта же область является центром, откуда расходится система дайковых образований, которые в большом количестве наблюдаются в срединной части рудного узла (месторождение Серебряное). В настоящее время на поверхности Лугоканского месторождения обнажены наиболее ранние образования, в то время как большая часть низкотемпературных ассоциаций эродирована. В результате этого возникает своеобразная латеральная зональность, выражающаяся в последовательном сокращении доли высоко- и среднетемпературных минеральных ассоциаций и в снижении масштабов проявления позднеюрского магматизма от центральной части рудного узла к его флангам (рис. 6). Удаленность Солонеченского месторождения от “эпицентра” оруденения и отсутствие рудопроизводящих позднеюрских комплексов обусловили слабое развитие ранних золоторудных ассоциаций. Несомненно, что на размещение оруденения в пределах рудного узла определенно влияет и приуроченность месторождений к сложным систем разрывных

нарушений. Этот факт наглядно виден на примере поздней сурьмяной минерализации: наиболее богатые сурьмой рудные тела приурочены к надвиговым зонам северо-восточной ориентировки, контролирующим сурьмяное оруденение.

К проявлениям зональности месторождений может относиться закономерное повышение с глубиной (или от ранних ассоциаций к поздним) пробности самородного золота [Петровская, 1973]. Эволюция Лугоканской рудно-магматической системы отражается и в составе самородного золота. Наблюдается отчётливая тенденция – с понижением пробности золота от ранних высокотемпературных к поздним минеральным ассоциациям возрастает ртутистость золота (от 0 в Au-Ру-Ару до 2.2 % в Au-Ag) (рис. 7).

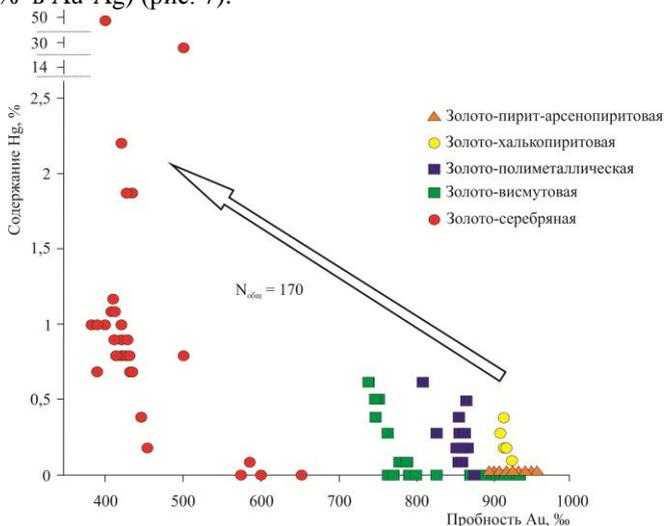


Рис. 7. Особенности состава самородного золота из различных минеральных ассоциаций Лугоканского рудного узла.

Заключение

1. Лугоканский рудный узел представляет собой полихронную рудно-магматическую систему и характеризуется комплексным (Au, Ag, Cu, Sb) полистадийным оруденением: установленная последовательность рудообразования включает в себя следующие минеральные ассоциации (от ранних к поздним): золото-пирит-арсенопиритовую (Au-890-960 ‰, Hg-0.4%) – золото-халькопиритовую (Au-900-920 ‰, Hg-0.6%) – золото-полиметаллическую (Au-750-870 ‰, Hg-0.6%) – золото-висмутную (Au-730-940 ‰, Hg-0.6%) – золото-серебряную (Au-380-660 ‰, Hg-2.2%) – сурьмяно-ртутную (Sb-Hg).

2. Формирование золотого оруденения Лугоканского рудного узла тесно связано со становлением шахтаминского и порфиривого магматических комплексов.

3 Развитие процессов магматизма и рудообразования в Лугоканском рудном узле, по данным прямых геологических наблюдений и Ar-Ar датирования, выражается следующим последовательным рядом: Au-As (163 ± 1.9 млн. лет, Ar-Ar) → шахтаминский комплекс ($161.7-161$ млн. лет, U-Pb) → Au-Cu (160 ± 2 млн. лет, Ar-Ar) → порфириновый комплекс ($159-155$ млн. лет U-Pb, Ar-Ar) → Au-Pb-Zn (156.3 ± 1.8 млн. лет, Ar-Ar) → Au-Bi (155.9 ± 4.5 , Ar-Ar) → Au-Ag → Sb-Hg.

4. Геохимический профиль (Au, Ag, Te, Bi, Pb, Cu, Sb), минеральный состав, условия локализации руд и температуры образования позволяют отнести золото-висмутовую минерализацию Лугоканского месторождения к эпитермальному типу оруденения. Серьезным доводом в пользу этого является присутствие Se в качестве примеси в висмутовых и Bi-содержащих минералах (висмутин, фридрихит, эмплектит, ширмерит).

5. Сурьмяная минерализация является наиболее поздней низкотемпературной минеральной ассоциацией, проявленной в рудном этапе и наложенной на ранние сульфидные золотосодержащие руды.

6. На основании исследования флюидных включений в кварце рудных парагенезисов установлено, что по мере развития процесса минералообразования происходило постепенное уменьшение концентрации солей и CO₂ в составе рудообразующих флюидов, а также снижение их температуры.

7. Результаты исследования изотопного состава серы сульфидных минералов свидетельствуют о глубинном эндогенном (мантийно-коровом) источнике серы рудных минералов. Узкий диапазон колебаний изотопного состава серы подтверждает вывод о генетической связи золоторудной минерализации Лугоканского рудного узла с верхнеюрскими магматическими комплексами.

8. Эволюция Лугоканской рудно-магматической системы отражается и в составе самородного золота. Отчётливо наблюдается тенденция – с понижением пробности золота от ранних высокотемпературных к поздним минеральным ассоциациям возрастает ртутистость золота.

9. В пределах Лугоканского рудного узла проявлена латеральная и вертикальная эндогенная зональность. Латеральная зональность проявляется в последовательном сокращении доли высоко- и среднетемпературных минеральных ассоциаций и в снижении масштабов проявления позднеюрского магматизма от центральной части рудного

узла к его флангам. Вертикальная зональность выражается в количественной и качественной смене одних минеральных ассоциаций другими от верхних горизонтов к нижним.

Список публикаций по теме диссертационной работы

Статьи в рецензируемых журналах:

1. **Редин Ю.О.**, Козлова В.М. Золото-висмут-теллуридная минерализация в рудах месторождения Серебряного // Тихоокеанская геология. - 2014. - Т.33, №3. - С. 39-52.
2. **Редин Ю.О.**, Калинин Ю.А., Неволько П.А., Кириллов М.В., Колпаков В.В. Минеральные ассоциации и зональность оруденения Лугоканского рудного узла (Восточное Забайкалье) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. - 2014. - Т.18, №2. - С. 83-93.
3. Кузьмина О.Н., Дьячков Б.А., Владимиров А.Г., Кириллов М.В., **Редин Ю.О.** Геология и минералогия золотосных джаспероидов Восточного Казахстана (на примере рудного поля Байбура) // Геология и геофизика. - 2013. - Т.54, №12. - С. 1889-1904.

Материалы докладов на конференциях:

1. **Редин Ю.О.**, Кириллов М.В., Неволько П.А. Минералого-геохимические особенности золота Савкинского золоторудного месторождения (Восточное Забайкалье) // Материалы XVII молодежной научной школы “Металлогения древних и современных океанов”. Миас: ИМин УрО РАН, 2011. - С. 228-231.
2. **Редин Ю.О.** Соотношение золотого и сурьмяного оруденения на объектах Лугоканского рудного узла, Восточное Забайкалье // Материалы всероссийского совещания (с участием иностранных ученых) “Современные проблемы геохимии”, посвященного 95-летию со дня рождения академика Л.В. Таусона. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б.Сочавы СО РАН, 2012. - С. 114-117.
3. **Редин Ю.О.** Типоморфные особенности и золотосность арсенопиритов Серебряного месторождения (Восточное Забайкалье) // Материалы III всероссийской научно-практической конференции “Минерагения Северо-Восточной Азии”. Улан-Удэ: Издательский Дом “Экос”, 2012. - С. 130-132.
4. **Redin Yu.**, Dultsev V. Forms of gold occurrence in the ore from the Serebryanoe deposit (Eastern Transbaikalia) // Conference Proceedings edition: 34 International Geological Congress, Brisbane, Australia, 2012, CD-publication 3355.
5. **Redin Yu.O.** On the formation assignment of the Lugokan deposit (Eastern Transbaikalia). // Proceedings of the Conference: The 6th International Siberian Early Career Geoscientists Conference. Novosibirsk, 2012. - P. 130.

6. **Redin Yu., Dultsev V.** Gold-bismuth-telluride mineral association in ores from the Serebryanoe deposit (Eastern Transbaikalia) // Proceedings of the Conference: 4th International Geologica Belgica Meeting “Moving plates and melting icecaps Processes and forcing factors in geology”. Brussels, 2012. - P. 194.

7. **Редин Ю.О.** Au-As тип оруденения на золоторудных месторождениях Восточного Забайкалья // Материалы четвертой всероссийской научно-практической конференции “Геодинамика и минерагения Северо-Восточной Азии”. Улан-Удэ: Издательский Дом “Экос”, 2013. - С. 300-303.

8. **Редин Ю.О.** Минералого-геохимические типы золоторудной минерализации на полиформационных месторождениях Восточного Забайкалья // Материалы всероссийской конференции (с международным участием) “Рудообразующие процессы: от генетических концепций к прогнозу и открытию новых рудных провинций и месторождений”. М.: ИГЕМ РАН, 2013. - С. 163.

9. **Редин Ю.О., Калинин Ю.А., Неволько П.А., Козлова В.М.** Эндогенная зональность Лугоканского рудного узла (Восточное Забайкалье) // Материалы 1-й научно-практической конференции “Геология, геофизика и минеральное сырье Сибири”. Новосибирск: СНИИГГиМС, 2014. - Т.1. - С. 123-127.

ПРИЛОЖЕНИЯ

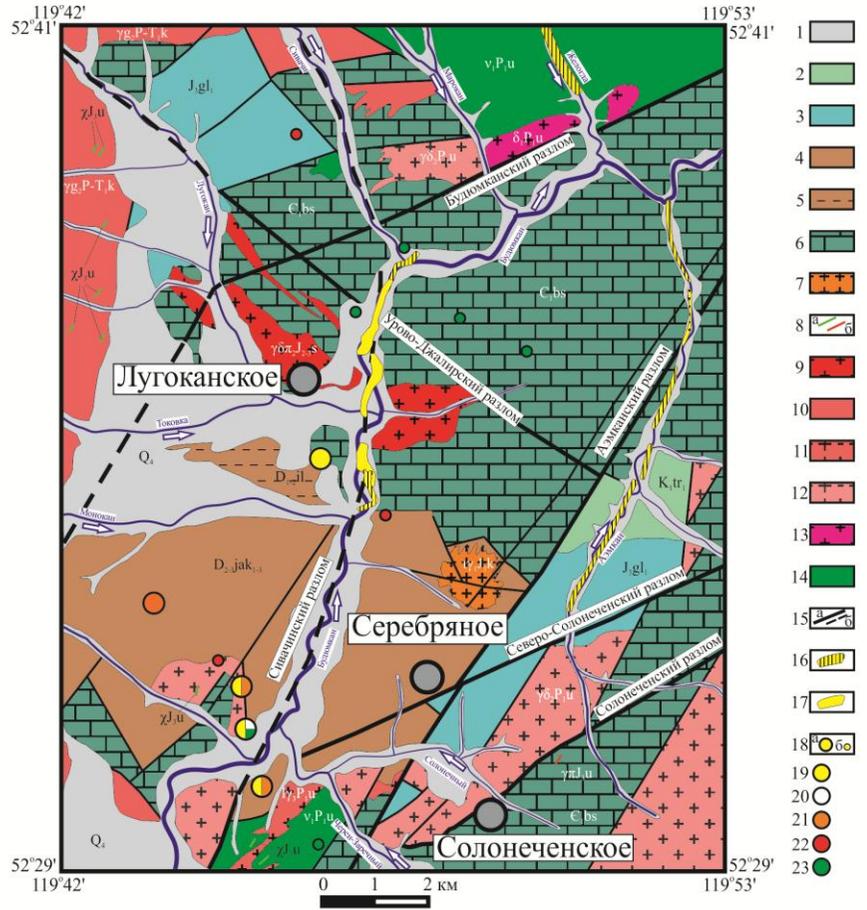


Рис. 1. Геологическая схема Лугоканского рудного узла (составлена на основе геологической карты [Новокрещенов, 2009]).

1 – Четвертичные отложения (Q_4); 2 – Тургинская свита (K, tr_1), конгломераты; 3 – Глушковская свита (J_3gl_1), конгломераты, песчаники, алевролиты, лавы трахиандезибазальтов, андезибазальтов, андезитов, базальтов; 4 – Яковлевская свита ($D_{2,jak}$), песчаники, алевролиты, известняки; 5 – Ильди́нская свита ($D_{1,il}$) – слюдястые, кварц-сланцевые сланцы; 6 – Быстри́нская свита (C, bs), известняки, доломиты; 7 – Кукульбе́йский комплекс (γ_3J_3k), лейкограниты; 8 – Урдынода́нский комплекс (J_3u): а – дайки лампрофиров, гибридных порфиров, б – дайки гранит-порфиров; 9 – Шахта́минский комплекс (γ_3J_3s), гранодиорит порфиры; 10 – Кутома́рский комплекс (γ_3P-T, k), гнейсо-граниты; 11-14 Урды́нский комплекс (P_1u): 11 – лейкократовые граниты (γ_3); 12 – граниты (γ_2) и гранодиориты (γ_2), 13 – диориты (δ_1), 14 – габбро (v_1); 15 – Разрывные нарушения: а – достоверные, б – предполагаемые; 16 – Промышленные россыпи малые аллювиальные; 17 – Непромышленные россыпи аллювиальные; 18-23 Полезные ископаемые: 18 – проявления (а), пункты минерализации (б); 19 – золото; 20 – серебро; 21 – мышьяк; 22 – вольфрам; 23 – свинец.

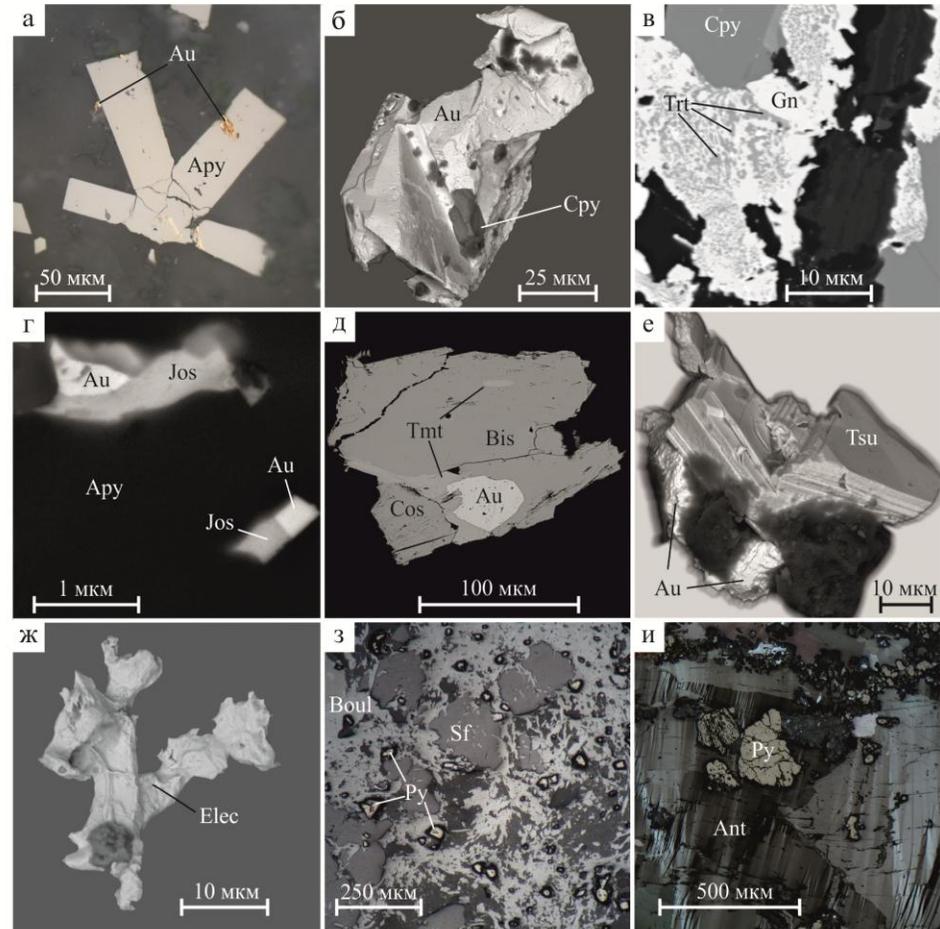


Рис. 2. Минеральные ассоциации Лугоканского рудного узла.

а – Самородное золото (Au) в сростаниях с арсенопиритом (Arpy), Au-As ассоциация Серебряного м-я; б – Самородное золото в сростаниях с халькопиритом (Cpy), Au-Cu ассоциация Лугоканского м-я; в – Мирмекитовые включения тетраэдрита (Trt) в галените (Gn), Au-Pb-Zn ассоциация Лугоканского м-я; г – Самородное золото в сростаниях с жозеитом В (Jos), Au-Bi ассоциация Серебряного м-я; д – Самородное золото в сростаниях с цумоитом (Tsu), Au-Bi ассоциация Лугоканского м-я; е – Включения тетрадимита (Tmt), козалита (Cos) и самородного золота в висмутине (Bis), Au-Bi ассоциация Лугоканского м-я; ж – Интерстициальное выделение электрума (Elec), Au-Ag ассоциация Лугоканского м-я; з – Буланжерит (Boul) цементирует кристаллы пирита и сфалерита (Sf), Sb-Hg ассоциация, сульфосоляный парагенезис Серебряного м-я; и – Катаклазированные кристаллы пирита, сцементированные антимонитом (Ant), Sb-Hg ассоциация, Солонеченского м-я.

Период	Эпоха	Магматизм	Минеральные ассоциации	Геодинамические обстановки
Меловой	Ранняя	Шахтаминский комплекс Порфировый комплекс Амурская-средненский комплекс		Рифтогенная
Юрский	Поздняя			Постколлизинная
	Средняя		Коллизинная	



Рис. 3. Возраст золоторудной минерализации и ее корреляция с магматическими комплексами юрского возраста. Цифрами показаны рубежи формирования золотого и золотосодержащего оруденения: 1 – Cu-Mo (Au), Шахтаминское месторождение; 2 – Au-Pb-Zn, Дарасунское месторождение и Карийский рудный узел (Амурская дайка); 3 – Au-Ag, Балейское и Карийский рудный узел (Пильнейское месторождение); 4 – Sb-Hg (Au), Жипкошинское месторождение.

Примечание: Жирным, курсивным шрифтом выделены датировки, полученные Ag-Ag методом автором, курсивом – Ag-Ag [Ефремов и др., 2013], подчеркнутым – U-Pb [Берзина и др., 2013].

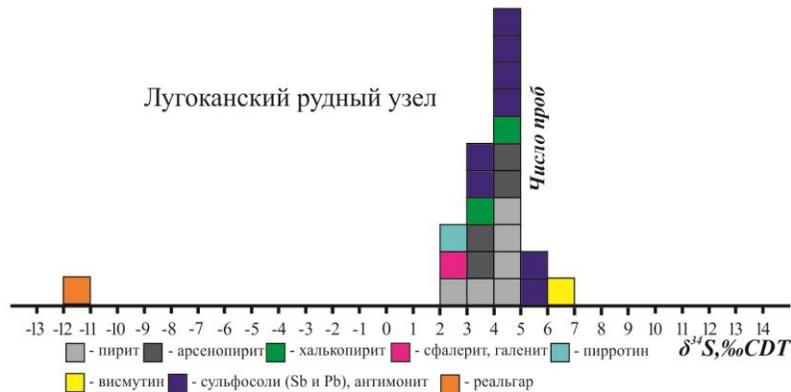


Рис. 4. Изотопный состав серы сульфидных минералов Лугоканского рудного узла.

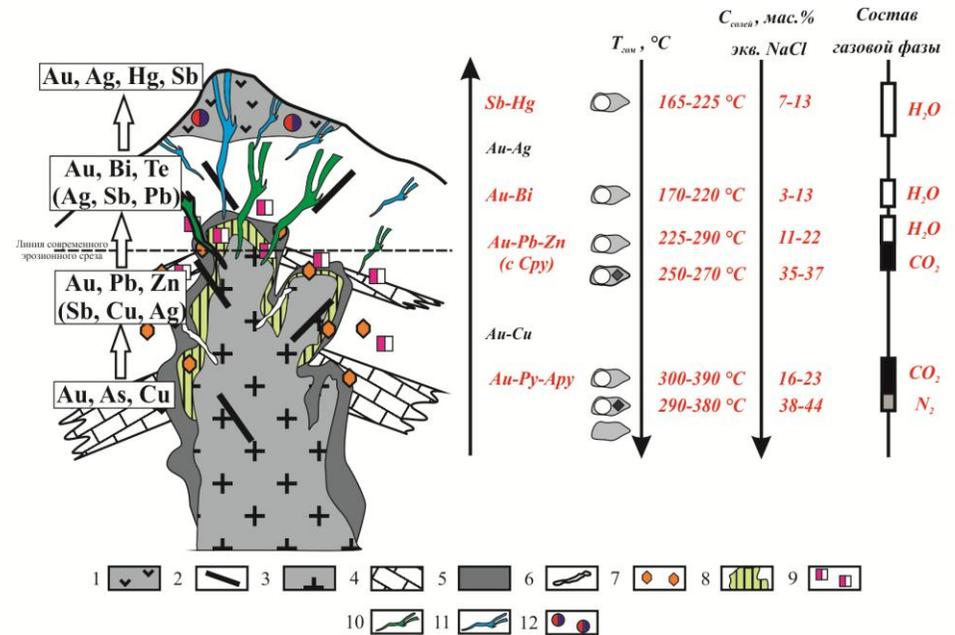


Рис. 5. Идеализированная схема вертикальной зональности Лугоканского месторождения.

1 – трахиандезитбазальты, андезитбазальты (J_3gl_1); 2 – дайки порфирового комплекса (πJ_3); 3 – гранодиориты шахтаминского комплекса ($\gamma \delta J_{2,3}$); 4 – известняки (C_1bs); 5 – скарны с магнетитовой минерализацией; 6 – кварцевые жилы с молибденитом; 7 – золото-пирит-арсенопиритовая; 8 – золото-халькопиритовая; 9 – золото-полиметаллическая (с халькопиритом); 10 – золото-висмутовая; 11 – золото-серебряная; 12 – сурьмяно-ртутная.

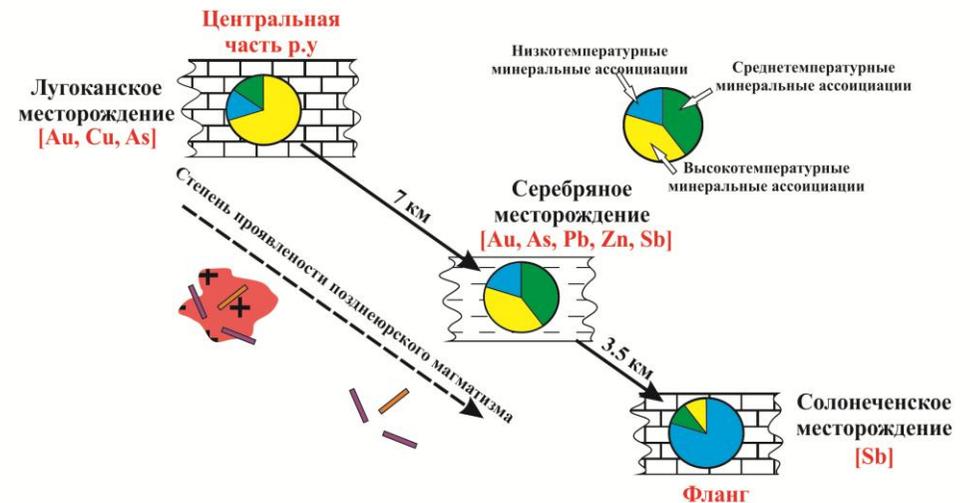


Рис. 6. Латеральная эндогенная зональность Лугоканского рудного узла.