

УДК 550.42 (571.55)

ШИРОКИНСКИЙ РУДНЫЙ УЗЕЛ (ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ): УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ, ГЕОХИМИЯ ПОРОД И РУД, СВЯЗЬ ОРУДЕНЕНИЯ С МАГМАТИЗМОМ

Абрамов Баир Намжилович¹,
b_abramov@mail.ru

Калинин Юрий Александрович^{2,3},
kalinin@igm.nsc.ru

Ковалев Константин Романович²,
kkr@igm.nsc.ru

Посохов Виктор Федорович⁴,
vitaf1@yandex.ru

¹ Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН,
Россия, 672014, г. Чита, ул. Недорезова, 16 а, а/я 1032.

² Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. академика Коптюга, 3.

³ Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2.

⁴ Геологический институт СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Павлова, 2.

Актуальность работы состоит в выявлении условий образования пород и руд Широкинского рудного узла. Отличительной особенностью рудного узла является повышенная золотоносность полиметаллических руд. Концентрации золота в рудах и его запасы соответствуют типичным золоторудным месторождениям. Объектами исследования являются наиболее крупное по запасам Ново-Широкинское золото-полиметаллическое месторождение, менее крупные – Лугининское золото-полиметаллическое и Кочковское золото-сурьмяное.

Цель работы заключается в раскрытии петрогеохимических особенностей пород и руд, в выявлении источников оруденения месторождений Широкинского рудного узла.

Методы исследования. Для определения элементного состава пород использовался рентгенфлуоресцентный метод (ГИН СО-РАН, г. Улан-Удэ). Содержание петрогенных компонентов определялось стандартным химическим методом, концентрации редкоземельных элементов определялись методом сорбционно-атомноэмиссионного анализа с индуктивно-связанной плазмой (ГИН СОРАН, г. Улан-Удэ). Определение изотопного состава кислорода проводилось с использованием установки MIR 10–30 (Центр коллективного пользования, г. Иркутск). Изучение изотопного состава серы сульфидов и содержаний Au и Ag проведены в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск).

Результаты исследования. Выявлено, что месторождения Широкинского рудного узла являются производными процессов образования Тайнинской вулcano-купольной структуры, магматические образования которого являются источниками рудного вещества. Это подтверждается зональным распределением рудной минерализации вокруг магматического центра Тайнинской структуры, а также данными изотопного состава кислорода, углерода рудоносных жил и серы сульфидов рудных минералов, указывающий на их магматический источник. Геохимические особенности интрузивных и эффузивных образований Широкинского рудного узла свидетельствуют о наличии в них мантийной составляющей, что подтверждается соответствием их адакитам. Образование свинцово-цинковых руд происходило из разной степени дифференцированных разноглубинных магматических очагов, что подтверждается особенностями распределения редкоземельных элементов в рудах.

Ключевые слова:

Восточное Забайкалье, Широкинский рудный узел, золото-полиметаллические руды, магматизм, источники рудного вещества, изотопия, условия образования руд.

Введение

Изучение закономерностей распределения и условий формирования рудных узлов с полиметаллическим профилем оруденения в последние годы приобретает новую жизнь на современном уровне геологических представлений. Проводятся поисково-оценочные работы на полиметаллы с учетом их золотоносности в пределах Салаирского кряжа. В Забайкальском крае усилиями компаний «Highland Gold Mining Ltd» и «Казцинк» ведутся

разведочные и эксплуатационные работы на Ново-Широкинском золото-полиметаллическом месторождении, одном из наиболее крупных и достаточно хорошо описанных в литературе. Особенности его геологического строения, петрогеохимические особенности рудовмещающих пород, минералогия и последовательность формирования рудных ассоциаций, обуславливающих характеристическую зональность Широкинского рудного узла, освещены во многих работах [1–8]. Основная задача на-

стоящего исследования состоит в изучении петро-геохимических особенностей пород и руд, реконструкции источников и условий их образования в пределах Тайнинской вулкано-купольной структуры (ТВКС). На основе изотопно-геохимических данных изучения руд и флюидных включений акцентировано внимание на вопросах связи оруденения с определенным типом магматических образований. Представленные здесь исследования дополнят знания о месторождениях Широкинского рудного узла.

Методика исследований

Изучение элементного состава пород и руд проведены в аналитических лабораториях Геологического института СО РАН (г. Улан-Удэ) и Института геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск). Содержания элементов определены РФА методом (аналитик Жалсараев Б.Ж.). Измерения концентраций редкоземельных элементов проведены ISP-AES методом (аналитики Казанцева Т.И., Цыренова А.А.). Содержание Au и Ag определены в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) атомно-абсорбционным методом (аналитик Ильина В.Н.). Определение изотопного состава кислорода проводилось в Геологическом институте СО РАН (г. Улан-Удэ) с использованием установки MIR 10–30 системы лазерного нагрева с лазером CO₂ мощностью 100 ватт и длиной волны 10,6 мкм в инфракрасной области, в присутствии реагента BrF₃ (аналитик Посохов В.Ф.). Изучение изотопного состава серы выполнено в центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск), аналитики В.Н. Реутский, М.Н. Колбасова.

Краткая геологическая характеристика Широкинского рудного узла

Широкинский рудный узел юго-восточной части Забайкальского края приурочен к Тайнинской купольно-кольцевой структуре первого порядка, являющейся одной из структур Газимуро-Будюкканской структурно-металлогенической зоны (рис. 1).

Повышенная проницаемость Монголо-Охотской сутуры в средней и поздней юре способствовала проникновению в литосферу мантийного вещества, что привело к образованию очагово-купольных структур. В результате процессов мантийно-корового взаимодействия происходило плавление континентальной коры с образованием в промежуточных камерах известково-щелочной и высококальцевой известково-щелочной магм. Основная рудопроизводящая роль в Широкинской купольно-кольцевой структуре отводится глубоко дифференцированным шопонит-латитовым и известково-щелочным магмам [1]. Рудное вещество имеет мантийные и мантийно-коровые источники. В центральных частях очагово-купольных структур размещаются штоки магматических образований кислого состава (граниты, гранодиориты), в

периферийных частях располагаются эффузивные образования. С такими структурами связано образование месторождений цветных, редких и благородных металлов. Широкинский рудный узел является единственным в Забайкалье, где золото-полиметаллическое оруденение имеет промышленное значение.

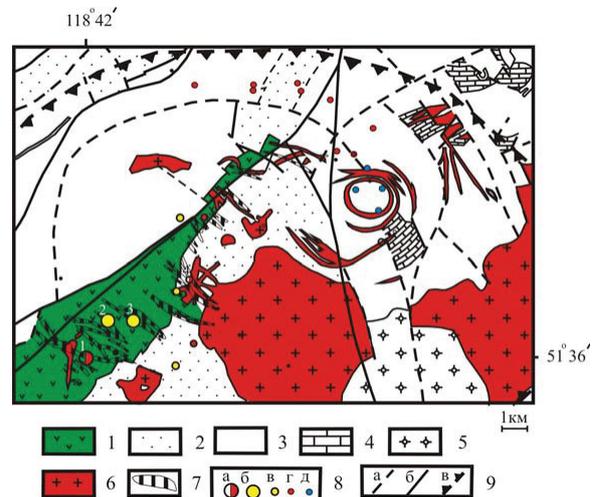


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Широкинского рудного узла (по материалам геолого-съёмочных работ, с дополнениями авторов): 1 – вулканогенно-осадочные отложения шадаронской свиты (J_{2-3}); 2 – песчано-алевролитно-аргиллитовые отложения акатуевской свиты (J_1); 3 – песчано-сланцевые отложения ушмунской свиты (ϵ_1); 4 – карбонатно-терригенные отложения джаргалантуйской свиты (ϵ_1); 5 – Ундинский интрузивный комплекс (C); 6 – Шахтаминский интрузивный комплекс (J_{2-3}); 7 – зоны пропилитизированных порфиров, благоприятных для выявления золото-полиметаллического оруденения; 8 – месторождения: а) золото-полиметаллические; б) золото-рудные; рудопроявления: в) золота; г) полиметаллов; д) молибдена; 9 – тектонические нарушения: а) предполагаемые; б) достоверные, в) Тайнинская кольцевая структура

Fig. 1. Schematic geological map of the Shirokinsky ore cluster (after geological survey works, with additions of authors): 1 are the volcanogenic-sedimentary rocks of shadaronk suite (J_{2-3}); 2 are the sandstone and siltstone rocks of akatuevsk suite (J_1); 3 are the sandstone and shale rocks of ushmunk suite (ϵ_1); 4 are the carbonate-terrigenous sediments of dzhargalantuysk suite (ϵ_1); 5 is the undinsk intrusive complex (C); 6 is the shakhtaminsk intrusive complex (J_{2-3}); 7 are the propylite-zones of porphyrites, enabling to identify gold-polymetallic mineralization; 8 are the deposits: a) gold-polymetallic; б) gold deposits; ore mineralization: а) gold; б) polymetallic; д) molybden; 9 are the tectonic faults: а) prospective; б) reliable; в) Tayninsk ring structure

Характерными признаками Широкинской структуры является кольцевое расположение магматических образований мезозойского возраста, сконцентрированных в центральной ее части, развитие кольцевых и радиальных разрывных нарушений. Размер структуры в диаметре 40–45 км. Образование куполов связано с процессами внедрения интрузий с образованием специфических ку-

польных структур разных порядков, нарушенных кольцевыми и радиальными тектоническими зонами, которые впоследствии служили местами разгрузки гидротермальных растворов. Общность структурной позиции, магматизма и минерализации указывает на развитие единого рудно-магматического очага. Это подтверждается и зональным распределением разных типов минерализации вокруг магматического центра. В контакте Лугиинского массива, расположенного в центральной части структуры, развиты скарнированные известняки с магнетитовой минерализацией. В ближайшем экзоконтакте Лугиинского массива отмечается кварц-турмалиновая минерализация. Далее, по мере удаления от массива, развиты золото-колчеданная, золото-полиметаллическая, золото-мышьяково-сурьмяная минерализации (рис. 1). В целом в пределах Широкинского рудного узла проявлены следующие рудные стадии: 1) кварц-пирит-турмалиновая, 2) кварц-пиритовая (колчеданная), 3) золото-полиметаллическая, 4) золото-сульфидно-полиметаллическая. Изотопный возраст калийсодержащей слюдки, выделенной из свинцово-цинковых руд, составляет 133 ± 5 млн лет [2].

Площадь Лугиинского золото-полиметаллического месторождения является составной частью северо-западного крыла Широкинской синклинали структуры, простирающейся в субмеридиональном направлении. В геологическом строении месторождения принимают участие вулканогенно-осадочные отложения шадаронской серии (J_{2-3}), несогласно перекрывающие осадочные породы нижней-средней юры, интрузивные образования шахтаминского комплекса (J_{2-3}), представленные дайками кварцевых порфиров, гранодиорит-порфиров, диоритовых порфиритов и лампрофиров. Абсолютный возраст гранитоидов Лугиинского массива составляет $155-146 \pm 6$ млн лет [3]. Гидротермальные изменения проявлены в виде протяженных субпараллельных зон окварцевания, карбонатизации, реже хлоритизации. В пределах Лугиинского месторождения выделяются следующие стадии минерализации: 1) кварц-турмалиновая; 2) серно-колчеданная, 3) карбонатно-полиметаллическая [4]. Среднее содержание золота в рудах составляет $2,03$ г/т и серебра – $4,57$ г/т. Рудные тела представлены прожилково-вкрапленной минерализацией и крутопадающими зонами метасоматически измененных пород. Они характеризуются протяженностью по простиранию $100-600$ м, мощностью $4-30$ м, прослежены по падению до 300 м от поверхности и по простиранию до 2 км. Рудная минерализация представлена пиритом, халькопиритом, галенитом, сфалеритом, при подчиненном распространении арсенопирита, блеклых руд, висмутина, золота, пирротина.

Особенности геологического строения Кочковско-го золото-сурьмяного месторождения, расположенного в $2,5$ км на северо-восток от Ново-Широкинского золото-полиметаллического месторожде-

ния, во многом аналогичны Лугиинскому. На месторождении известно семь рудных тел, наиболее крупное из которых характеризуется значительным развитием зоны прожилково-вкрапленной антимонит-реальгар-арсенопиритовой минерализации, мощностью до 21 м и протяженностью по латерали до 920 м [5]. На месторождении выделяются три минеральные ассоциации: карбонат-пирит-арсенопиритовая, карбонат-антимонит-реальгаровая и карбонатная. Для первой ассоциации характерны: пирит, марказит, арсенопирит, для второй – антимонит, арсенопирит, реальгар, шеелит, сфалерит, буланжерит, для третьей – кальцит с убогой вкрапленностью пирита. Содержание золота в рудах колеблется от $1,0-20,3$ г/т, серебра – $2,0-35,0$ г/т. Среднее содержание золота в рудах составляет $5,26$ г/т.

В геологическом строении Ново-Широкинского золото-полиметаллического месторождения принимают участие интрузии шахтаминского комплекса (J_{2-3}), эффузивы шадаронской серии (J_{2-3}), осадочные отложения акагуевской свиты (J_{1-2ak}) (рис. 2). Месторождение приурочено к субширотной зоне разлома, пересекающей под углом $60-75^\circ$ юго-западное крыло синклинали складки. Фундаментом Широкинской вулканоплутонической структуры являются отложения нижнего кембрия (известняки, доломиты, песчаники, кварциты). Мощность их превышает 300 м.

Эффузивные образования шадаронской серии (J_{2-3}) разделены на две толщи. Нижняя, существенно туфогенная, сложена туфопесчаниками, туфоалеволитами, туфобрекчиями, которые выше по разрезу сменяются покровами андезитов, андезибазальтов, их туфами. Мощность толщи составляет $800-1000$ м. Верхняя толща имеет однородный состав и представлена андезитами, андезибазальтами, кварцево-плаггиоклазовыми порфиритами с прослоями их туфов и лавобрекчий. Изотопный возраст нижней толщи (К-Аг метод) составляет $175 \pm 9-168 \pm 7$ млн лет, верхней толщи – $156 \pm 6-140 \pm 4$ млн лет [1].

Интрузивный шахтаминский комплекс (J_{2-3}) представлен дайками гранодиорит-порфиров, кварцевых диоритовых порфиритов и лампрофиров, распространенных в центральной и юго-восточной части Широкинского рудного узла. Мощность даек составляет $0,3-80$ м, протяженность – $50-400$ м. Диоритовые порфириты пересекают гранодиорит-порфиры, но, в свою очередь, рвутся самими молодыми лампрофирами, преимущественно спессартитами. Руды карбонатно-полиметаллической стадии, по-видимому, сингенетичны со спессартитами, поскольку в одних случаях спессартиты секут карбонатно-полиметаллические руды, в других пересекаются ими. По совокупности признаков даже выделен самостоятельный ширококинский комплекс, объединяющий эффузивные и интрузивные породы Широкинского рудного района [1].

На месторождении известно 15 рудных тел, представленных серией субпараллельных кварц-

сульфидных жил мощностью до 3 м. В целом Ново-Широкинскую минерализованную зону можно рассматривать как линейный штокверк. Протяженность рудных тел по простиранию колеблется от 50 до 1450 м, по падению – от 40 до 760 м. Рудные тела залегают кулисообразно, с заметным склонением рудных тел с глубиной от флангов месторождения к центру, к штоку гранодиорит-порфиров. Околорудные изменения вмещающих пород, проявляющихся совместно, выражаются в пропилитизации, окварцевании, хлоритизации, серицитизации, доломитизации и пиритизации. Выделяется четыре основных типа постепенно сменяющих друг друга гидротермально-метасоматических процессов: пропилитовый, хлорит-доломитовый, серицит-доломитовый и кварц-доломитовый. По составу, структурно-текстурным особенностям и содержанию ведущих полезных компонентов руды месторождения делятся на три минералогического-генетического типа, соответствующих

стадиям минерализации: а) медисто-сернисто-колчеданные; б) кварц-полиметаллические; в) карбонатно-полиметаллические (табл. 1).

В рудах Ново-Широкинского месторождения среднее содержание золота составляет 3,5 г/т; серебра – 86,5 г/т; свинца – 3,7 мас. %, меди – 0,3 % [6]. В составе руд установлено более 60 рудных и жильных минералов. Среднее содержание основных сульфидных минералов по месторождению: галенита – 4,2 %, сфалерита – 3,1 %, пирита – 5 %, блеклой руды – 0,4 %, халькопирита – 0,1 %. Зона окисления на месторождении развита слабо.

Сульфидные руды месторождения сложены метасоматическими кварц-сланцисто-доломитовыми породами, содержащими вкрапленность и прожилки сульфидов и жильных минералов. В прожилково-вкрапленных рудах отмечаются гнезда, линзы и жилы руд массивной, кокардовой, брекчиевидной и метаколлоидной текстур, а также

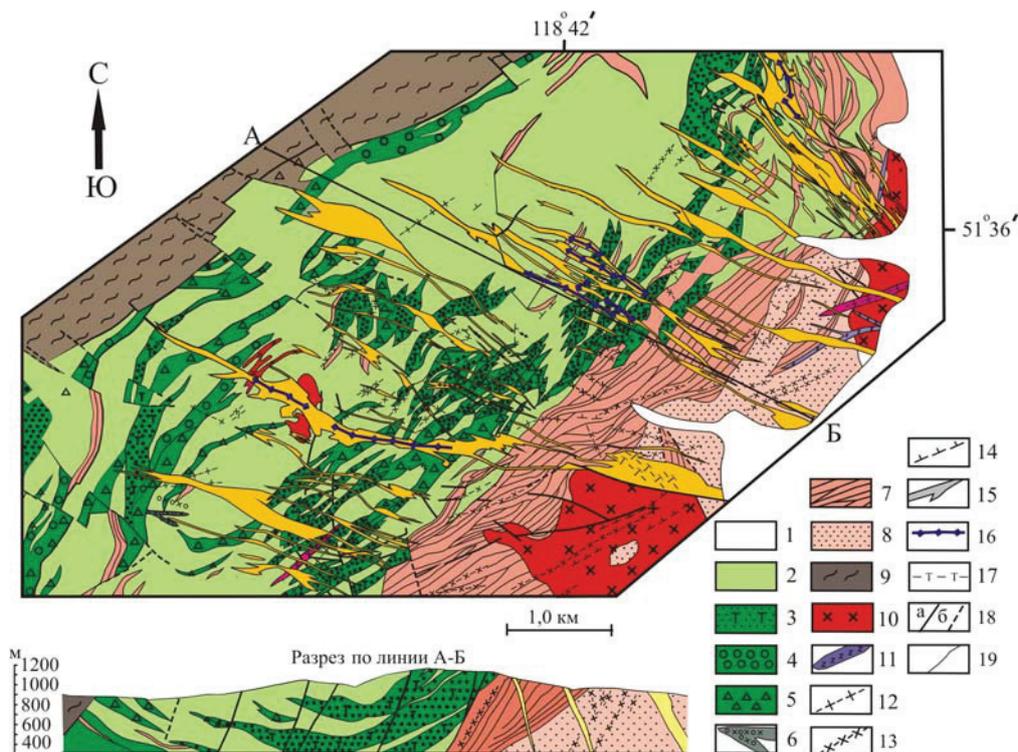


Рис. 2. Схема геологического строения Ново-Широкинского золото-полиметаллического месторождения (по материалам В.И. Гордеева, 2007 г., с дополнениями авторов): 1 – четвертичные отложения; 2–5 – шадаронская серия J_{2-3} ; 2 – верхняя эффузивная толща (андезиты, андезибазальты); 3–5 – нижняя толща (туфопесчаники, туфоалевролиты, туфобрекчии); 6 – кварцевые диоритовые порфиры J_{2-3} ; 7 – J_{1-2} : песчаники, алевролиты; 8 – J_{1-2} : песчаники; 9 – ϵ_{1-2} – слюдистые алевролиты, песчаники, сланцы; мезозойские интрузии: 10 – гранодиориты; 11 – кварцевые порфиры; 12 – гранит-порфиры; 13 – диоритовые порфиры; 14 – лампрофиры; 15 – зоны метасоматитов; 16 – рудоносные кварц-сульфидные жилы; 17 – кварц-турмалиновые жилы; 18 – тектонические нарушения: а) достоверные, б) предполагаемые; 19 – геологические границы

Fig. 2. Scheme of geological structure of Novo-Shirokinsky gold-polymetal deposit (after V.I. Gordeev, 2007, with the additions of the authors): 1 are the quaternary sediments; 2–5 are the shadaronk series (J_{2-3}): 2 is the upper volcanic thickness (andesite, andezibasalt); 3–5 is the lower thickness (tuff-sandstones, tuff-siltstone, tuff-breccias); 6 are the quartz diorite porphyry (J_{2-3}); 7 are the sandstones, siltstones (J_{1-2}); 8 are the sandstones (J_{1-2}); 9 are the micaceous siltstones, sandstones, shales (ϵ_{1-2}); mesozoic intrusions: 10 are the granodiorites; 11 are the quartz porphyries; 12 are the granite-porphyries; 13 are the diorite porphyry; 14 are the lamprophyre; 15 are the metasomatite zones; 16 are the ore-bearing quartz-sulfide veins; 17 are the quartz-tourmaline veins; 18 are the tectonic faults: a) reliable; b) estimated; 19 are the geological boundaries

кварцево-доломитовые жилы симметрично-полосчатой и крустификационной текстур. Жилы, гнезда и линзы богатых руд развиты главным образом в центральной части месторождения, где они вскрыты с поверхности шурфами с рассечками, на горизонте 853 м – обоими штреками и рассечками из них, а на глубоких горизонтах – буровыми скважинами. В целом богатые руды образуют пучок веерообразно расположенных «струй», причем корень пучка приурочен к слепому штоку гранодиорит-порфиоров.

Таблица 1. Стадийность минерализации Ново-Широкинского месторождения

Table 1. Paragenetic sequence of mineral of the Novo-Shirokiisky deposit

Распространенность рудных минералов/Ore minerals		
Главные Main	Второстепенные Minor	Редко встречающиеся Rare
Стадии минерализации/Mineralization stages Турмалиново-колчеданная/Tourmaline-pyrite		
Пирит Pyrite	Халькопирит Chalcopyrite	Мельниковит, молибденит Melnicovite, molibdenite
Медисто-сернисто-колчеданная/Cuprous-sulfite-pyrite		
Пирит Pyrite	Халькопирит Chalcopyrite	Сфалерит, галенит, золото, бурнонит, джемсонит, висмутин Sphalerite, Galena, Aurum, Bournonite, Jamesonite, Bismuthite
Кварцево-полиметаллическая/Quartz-polymetallic		
Пирит, сфалерит, галенит Pyrite, Sphalerite, Galena	Халькопирит Chalcopyrite	Буланжерит, магнетит, золото, гематит, бурнонит, арсенопирит, висмутин Boulangerite, Magnetite, Aurum, Hematite, Bournonite, Arsenopyrite, Bismuthinite
Карбонатно-полиметаллическая/Carbonate-polymetallic		
Сфалерит, галенит Sphalerite, Galena	Пирит/Pyrite	Золото, марказит, арсенопирит, буланжерит Aurum, Marcasite, Arsenopyrite, Boulangerite

Основная масса руд неравномерно-зернистая, размер зерен гипогенных минералов измеряется десятками долями миллиметра, реже встречаются более мелкие (сотые и тысячные доли миллиметра) и более крупные зерна (1–5 мм, редко до 3 см). Характерной особенностью руд Ново-Широкинского месторождения являются повышенные концентрации золота. Наиболее значительные содержания золота (до 186,1 г/т) установлены в рудах медисто-серно-колчеданной стадии минерализации. Золото встречается в пирите, халькопирите, блеклой руде, галените, а также в кварце в виде зерен неправильной и изометричной формы, размером в тысячные и сотые, редко десятые доли мм. Корреляционные анализ установил тесные связи золота с Cu ($r=0,69$), Bi ($r=0,86$), Ag (0,51) (по данным табл. 2). В рудах кварцево-полиметаллической стадии содержание Au по рядовым пробам колеблется от следов до 139 г/т (штрек шахты), причем

золотоносность (как и меденосность) руд этой стадии резко уменьшается к северо-западному флангу месторождения и постепенно увеличивается по направлению к юго-восточному флангу, что объясняется ассимиляцией рудообразующими растворами этой стадии ранее отложившихся медисто-серно-колчеданных руд. Наименее золотоносны руды карбонатно-полиметаллической стадии минерализации. Содержание золота в них колеблется от следов до 16 г/т, составляя в среднем 0,8–1,4 г/т. Необходимо отметить, что почти все высокие содержания золота встречены в центральной части и на юго-восточном фланге месторождения. Преобладающая его часть золота сосредоточена в интервале 0–5 г/т. Эти значения соответствуют концентрации золота в рудах кварц-полиметаллической стадии. В интервале 35–40 г/т отмечается некоторое увеличение значений, что можно объяснить повышенными содержаниями его в минералах серно-колчеданной стадии. Характерной особенностью элементного состава руд Ново-Широкинского месторождения является наличие Bi, концентрации которого в пирит-галенит-сфалеритовых рудах достигают 17800 г/т (табл. 2). Висмутовая минерализация (висмутит, галеновисмутит) отмечается в составе медисто-серно-колчеданной и кварц-полиметаллической стадий рудообразования, но не получила ярко выраженного самостоятельного характера, что более характерно для забайкальских месторождений медно-скарнового типа.

Геохимические особенности пород и руд Широкинского рудного узла

Магматические образования Широкинского рудного узла, с которыми связано рудообразование, представлены интрузиями шахтаминского комплекса и эффузивами шадаронской серии.

По геохимическому составу интрузивные и эффузивные образования Ново-Широкинского месторождения на диаграммах Sr–Y, $(La/Yb)_n$ – Yb_n соответствуют адакитам (рис. 3). Формирование адакитов связано с процессами плавления субдцировавшей океанической литосферы, деламинацией континентальной коры [8–14]. Образование адакитов сопровождается промышленной минерализацией Au, Cu, Mo и других халькофильных элементов [15, 16]. Адакитовые интрузии имеют следующие геохимические характеристики: величина $(La/Yb)_n$ не более 10; содержание Yb – менее 1,8 г/т; $Y < 18,0$ г/т; $Sr > 300$ г/т, которые обусловлены присутствием граната в рестите [9]. Часть магматитов Широкинского узла соответствует адакитам (табл. 3).

Для изучения изотопного состава кислорода были отобраны образцы кварца из кварц-полиметаллических руд. Преобладающие температуры рудообразования Ново-Широкинского месторождения, по данным изучения флюидных включений в минералах, определены в интервале 240–280 °C [7].

Таблица 2. Содержания элементов в сульфидно-кварцевых жилах Ново-Широкинского рудного узла (г/т), Zn, Pb, Cu в (%)
Table 2. Elemental composition of sulfide-quartz veins of the Novo-Shirokinsky deposit, ppm (Zn, Pb, Cu, wt. %)

Элементы/Elements	Номера проб/Numbers of samples														
	112	112-1	116	117	119	120	123	129	131	132	134	154	156	157	
Ново-Широкинское месторождение/Novo-Shirokinsky deposit															
Bi	–	–	–	–	150	–	–	800	–	3	400	17800	–	266	
Pb	13	22	50	43	30	10,5	9,12	20,68	21,06	8,63	1,75	13,9	21,12	0,21	
Zn	27	16	11,5	2,6	11,7	16,1	1,09	1,22	1,29	6,74	0,5	1,07	7,61	0,17	
Rb	81	124	238	207	143	49	248	175	170	96	39	339	141	47	
Sr	31	28	–	–	–	89	16	–	2	374	49	–	–	55	
Au	17,0	33,0	53,0	41,0	12,0	0,78	25,0	14,0	24,0	12,0	3,60	73,0	16,0	42,0	
La	–	–	–	–	–	2,9	2,2	–	1,8	6,6	3,1	–	–	–	
Ce	–	–	–	–	–	5,9	4,4	–	3,2	12,0	6,1	–	–	–	
Pr	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,7	–	–	–	–	
Nd	–	–	–	–	–	2,7	1,65	–	1,3	5,2	2,9	–	–	–	
Sm	–	–	–	–	–	0,47	0,35	–	0,36	1,1	0,64	–	–	–	
Eu	–	–	–	–	–	1,34	0,12	–	0,13	0,32	0,32	–	–	–	
Gd	–	–	–	–	–	0,89	0,7	–	–	1,1	0,70	–	–	–	
Tb	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
Dy	–	–	–	–	–	0,74	0,34	–	–	0,96	0,75	–	–	–	
Ho	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,24	0,13	–	–	–	
Er	–	–	–	–	–	0,42	0,2	–	0,3	0,51	0,38	–	–	–	
Tm	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
Yb	–	–	–	–	–	0,18	0,14	–	0,10	0,34	0,22	–	–	–	
Lu	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
Y	–	–	–	–	–	3,8	1,6	–	1,33	4,2	2,6	–	–	–	
ΣTR	–	–	–	–	–	19,34	11,70	–	8,52	34,27	17,84	–	–	–	
(La/Yb) _n	–	–	–	–	–	11,17	10,95	–	12,46	13,47	9,81	–	–	–	
Eu/Eu*	–	–	–	–	–	6,36	0,74	–	–	0,89	1,64	–	–	–	
Eu/Sm	–	–	–	–	–	2,85	0,34	–	0,36	0,29	0,50	–	–	–	

Продолжение таблицы 2

Table 2

Элементы/Elements	Номера проб/Numbers of samples																
	140	141	142	143	144	145	146	147	171	172	173	174	175	176	177	179	
Лугиинское месторождение/Lugiinsky deposit									Кочковское месторождение/Kochkovsky deposit								
Bi	–	3	2	3	4	–	2	2	–	–	–	–	–	–	3	–	
Pb	44	33	53	42	41	35	27	37	0,58	0,0023	109	22	0,0018	24	20	1,12	
Zn	33	37	47	32	43	34	39	42	0,9	0,0066	0,1	35	0,0065	45	51	1,68	
Rb	126	10	3,3	18	122	25	88	113	82	62	198	1,3	20	21	47	35	
Sr	709	314	386	231	462	143	341	402	263	625	311	395	542	489	418	712	
Au	–	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,06	0,81	2,6	0,56	0,10	–	7,3	1,1	0,47	
La	–	10	6,7	13,8	–	–	–	–	21	6,6	–	–	–	–	6,9	–	
Ce	–	17	12	19	–	–	–	–	30	13,5	–	–	–	–	14,3	–	
Pr	–	2,15	1,6	2,1	–	–	–	–	3,7	–	–	–	–	–	–	–	
Nd	–	6,1	3,6	4,8	–	–	–	–	10,5	6,4	–	–	–	–	6,3	–	
Sm	–	1,1	0,64	0,95	–	–	–	–	2,1	1,4	–	–	–	–	1,3	–	
Eu	–	0,17	0,12	0,14	–	–	–	–	1,31	0,43	–	–	–	–	0,46	–	
Gd	–	0,9	0,7	0,8	–	–	–	–	1,8	1,5	–	–	–	–	1,5	–	
Tb	–	0,9	–	–	–	–	–	–	0,22	–	–	–	–	–	–	–	
Dy	–	–	–	–	–	–	–	–	1,1	1,0	–	–	–	–	1,3	–	
Ho	–	–	–	–	–	–	–	–	0,22	–	–	–	–	–	–	–	
Er	–	0,55	0,50	0,50	–	–	–	–	0,60	0,6	–	–	–	–	0,7	–	
Tm	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
Yb	–	0,6	0,57	0,56	–	–	–	–	0,41	0,28	–	–	–	–	0,4	–	
Lu	–	–	–	–	–	–	–	–	0,06	–	–	–	–	–	–	–	
Y	–	4,8	3,8	4,4	–	–	–	–	6,2	4,3	–	–	–	–	5,8	–	
ΣTR	–	44,27	30,92	47,05	–	–	–	–	78,12	35,01	–	–	–	–	37,66	–	
(La/Yb) _n	–	11,55	8,16	17,12	–	–	–	–	35,56	16,43	–	–	–	–	11,98	–	
Eu/Eu*	–	0,52	0,55	0,49	–	–	–	–	2,05	0,91	–	–	–	–	1,00	–	
Eu/Sm	–	0,15	0,19	0,15	–	–	–	–	0,62	0,31	–	–	–	–	0,35	–	

Таблица 3. Содержания элементов-примесей в магматических породах Широкинского рудного узла (г/т)

Table 3. Elemental composition of magmatic formations of the Shirokinsky ore cluster, ppm

Элементы Elements	Номера проб/Numbers of samples													
	136	137	138	118	126	130	149	150	161	164	165	167	168	169
As	6	9	11	29	35	115	15	401	32	20	36	14	20	12
Rb	94	113	102	80	100	271	47	109	75	46	32	67	65	114
Sr	782	679	710	384	571	390	353	1738	665	627	545	475	474	266
Nb	8,5	10,3	7,3	8,3	8,7	4,5	6,8	7,0	6,2	7,2	8,1	7,0	6,8	6,6
La	30,9	33,0	30,5	27,5	30,2	17,8	21,8	28,4	24,9	22,3	27,2	24,6	25,8	26,2
Ce	54,0	60,9	53,0	52,0	58,6	32,8	41,6	55,9	48,4	46,3	52,2	50,0	48,6	49,1
Pr	6,0	6,8	6,0	6,9	7,3	3,85	4,8	6,5	5,6	5,7	5,9	6,04	5,8	5,6
Nd	19,8	24,5	20,0	25,0	26,8	14,7	19,8	28,7	23,1	21,4	25,1	24,0	23,3	23,4
Sm	3,4	4,2	3,3	5,7	4,31	2,63	3,4	5,15	4,0	3,4	4,5	4,6	4,3	4,5
Eu	0,81	0,87	0,80	1,17	1,26	0,71	0,91	1,4	1,16	1,14	1,25	1,18	1,14	1,17
Gd	2,5	3,0	2,5	3,9	4,0	2,0	3,15	4,3	3,9	3,6	4,3	4,0	3,8	4,1
Tb	0,50	0,57	0,38	0,54	0,51	0,39	0,66	0,73	0,70	0,45	0,56	0,66	0,60	0,65
Dy	1,7	2,1	1,7	2,5	2,96	1,38	2,4	2,9	3,0	3,0	3,06	3,2	3,07	2,9
Ho	0,32	0,37	0,34	0,42	0,51	0,25	0,44	0,44	0,54	0,55	0,50	0,62	0,55	0,47
Er	0,82	0,98	0,81	1,26	1,4	0,70	1,2	1,2	1,45	1,5	1,4	1,6	1,5	1,29
Tm	0,13	0,18	0,17	0,2	0,27	0,15	0,18	0,19	9,23	0,32	0,24	0,30	0,26	0,19
Yb	0,82	1,0	0,75	1,0	1,14	0,66	1,0	1,0	1,3	1,28	1,3	1,48	1,4	1,14
Lu	0,08	0,1	0,08	0,14	0,14	0,07	0,12	0,09	0,14	0,15	0,16	0,17	0,15	0,14
Y	9,63	12,5	9,1	13,4	15,4	7,5	12,8	14,5	16,6	15,4	16,5	18,0	17,3	16,0
ΣTR	131,9	151,1	129,4	114,1	154,8	85,6	114,3	151,4	144,0	126,5	144,2	140,5	137,6	136,9
(La/Yb) _n	26,16	22,9	30,54	19,1	22,0	18,7	15,1	19,7	13,0	12,1	14,6	12,4	12,8	16,0
Eu/Eu*	0,85	0,75	0,85	0,76	0,65	0,94	1,00	0,91	0,90	1,00	0,87	0,84	0,86	0,83
Eu/Sm	0,24	0,21	0,24	0,20	0,29	0,27	0,27	0,27	0,29	0,33	0,28	0,26	0,26	0,26
Rb/Sr	0,12	0,17	0,14	0,21	0,17	0,69	0,13	0,06	0,11	0,07	0,06	0,14	0,14	0,43

Примечание. Пробы: гранитоиды – 136, 137, 138; диоритовые порфириды – 118, 149; базальты, андезитобазальты – 126, 130, 150, 161, 164, 165, 167, 168, 169.

Note. Samples: Granitoids – 136, 137, 138; Diorite porphyry – 118, 149; Basalt, andesite-basalt – 126, 130, 150, 161, 164, 165, 167, 168, 169.

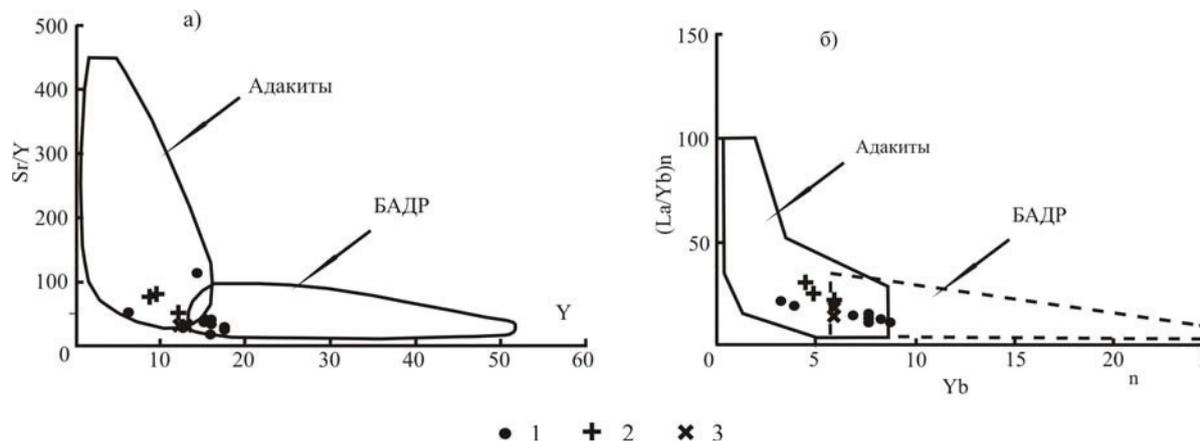


Рис. 3. Дискриминационные диаграммы и геохимические спектры интрузивных и эффузивных образований Широкинского рудного узла: а) дискриминационная диаграмма Sr/Y–Y; б) дискриминационная диаграмма (La/Yb)_n–Yb_n по [17]. БАДР – породы базальт-андезит-дацит-риолитовых ассоциаций островных дуг и активных континентальных окраин; 1 – андезитобазальты и андезиты шадаронской свиты, шахтаминский комплекс; 2 – граниты; 3 – диоритовые порфириды

Fig. 3. Discrimination diagram and geochemical spectra of intrusive and volcanic formations of the Shirokinsky ore cluster: a) Sr/Y versus Y; b) (La/Yb)_n versus Yb_n [17]. BADR are the rocks of basalt-andesite-dacite-riolite associations of island arcs and active continental margins; 1 are the andesite-basalt and andesite of shadaronsk and shakhtaminsk complex; 2 are the granites; 3 are the diorite-porphyrates

Изотопный состав кислорода кварца изменяется от +8,7 до +13,7 ‰ (табл. 4). Изотопный состав кислорода гидротермального флюида рассчитан в системе кварц–вода по уравнению

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{кварц}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = 3,34 (10^6/T^2) - 3,31,$$

где T – температура по Кельвину [18]. Рассчитанный изотопный состав $\delta^{18}\text{O}$ во флюиде в равновесии с кварцем продуктивного этапа 240–280 °C ме-

няется от $-0,69$ до $+6,09$ ‰ (табл. 4). Эти данные можно объяснить взаимодействием рудоносных флюидов с метеорной водой. Значение $+6,09$ ‰ соответствует образованиям флюидов магматической воды [19]. Изотопный состав углерода во флюиде, из которого кристаллизовался доломит, рассчитан по уравнению [20]:

$$\Delta_{\text{доломит}}^{-\text{CO}_2} = -0,891(10^9/T^3) + 8,737(10^6/T^2) - 18,11(10^3/T) + 8,44.$$

Рассчитанный изотопный состав кислорода во флюиде кварц-карбонатных жил при температуре минералообразования $240\text{--}280^\circ\text{C}$ колеблется от $+0,56$ до $+6,03$. Значения ‰ доломита укладываются в интервал значений изотопного состава углерода в карбонатах мезотермальных месторождений золота: от $+7$ до -25 ‰ [21].

Таблица 4. Изотопный состав кислорода, углерода и расчетный состав флюида при формировании Широкинского рудного узла

Table 4. Isotopic composition of oxygen, carbon and estimated composition of fluid in formation of Shirokinsky ore cluster

Номера проб Numbers of samples	Состав руд Ore composition	Минерал Mineral	Изотопный состав флюида при различных температурах, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ Isotopic composition of fluid at different temperatures, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$					
			$\delta^{18}\text{O}$, ‰ SMOW		$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$			
			240 °C	280 °C	240 °C	280 °C		
Кварц-сульфидные жилы/Quartz-sulfide veins								
112-2	Gn-sf	Кварц Quartz	11	+1,62	+3,39			
131			13,7	+4,32	+6,09			
132			13,7	+4,32	+6,09			
134			13,6	+4,22	+5,99			
141	Q-tr	Кварц Quartz	8,7	-0,69	+1,02			
142			11	+1,62	+3,39			
143			10,6	+1,22	+2,99			
Кварцево-карбонатно-сульфидные жилы Quartz-carbonate-sulfide veins								
			$\delta^{13}\text{C}$ (PDT)	$\delta^{18}\text{O}$, ‰ SMOW	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$		$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$	
					240 °C	280 °C	240 °C	280 °C
123	Gn-sf	Доломит Dolomite	0,4	11,3	+0,56	+1,41	+3,23	+4,73
112-3			3,1	11,6	+3,23	+4,11	+3,53	+5,03
175	Q-ant	Доломит Dolomite	3,0	11,5	+3,16	+4,01	+3,43	+4,93
177			3,6	12,6	+3,76	+4,61	+4,53	+6,03

Примечание. Пробы: 112–2, 112–3, 131, 132, 134 – Ново-Широкинское месторождение; 141, 142, 143 – Лугинское месторождение; 175, 177 – Кочковское месторождение. Руды: Gn-sf – галенит-сфалеритовые; Pr-gn-sf – пирит-галенит-сфалеритовые; Q-tr – кварц-турмалиновые; Q-ant – кварц-антимонитовые.

Note. Samples: 112–2, 112–3, 131, 132, 134 – Novo-Shirokinsky deposit; 141, 142, 143 – Lugiinsky deposit; 175, 177 – Kochkovsky deposit. Ores: Gn-sf – galena-sphalerite; Pr-gn-sf – pyrite-galena-sphalerite; Q-tr – quartz-tourmaline; Q-ant – quartz-antimonite.

Установлено, что значения $\delta^{18}\text{O}$ флюида ртутно-сурьмяных месторождений юго-западной Аляски варьируют от -12 до $+14$ ‰, что предполагает участие в рудообразовании метеорных вод [22]. В полиметаллических рудах месторождений Прогноз (Якутия) и Купол (Чукотка) изотопные

составы рудоносных флюидов при температуре 200°C колеблются от -8 до $+2,0$ ‰, что указывает на участие метеорных вод в рудообразовании [23]. Рассчитанные значения изотопных составов кислорода и углерода во флюиде Широкинского рудного узла указывают на магматический источник рудоносных флюидов, вступивший во взаимодействие с метеорной водой (рис. 4).

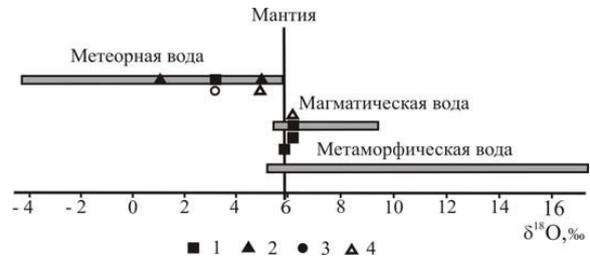


Рис. 4. Изотопный состав кислорода минералообразующего флюида Широкинского рудного узла: 1 – рудоносный кварц с галенитом, сфалеритом; 2 – кварц-турмалиновой стадии; 3 – кварц-доломитовые жилы с галенитом, сфалеритом; 4 – кварц-доломитовые жилы с антимонитом

Fig. 4. Oxygen isotopic compositions of hydrothermal fluid of the Shirokinsky ore cluster: 1 is the ore-bearing quartz with galena and sphalerite; 2 is the quartz-tourmaline stage; 3 are the quartz-dolomite veins with galena and sphalerite; 4 are the quartz-dolomite veins with antimonite

Изотопный состав серы во флюиде (δS^{34}), находящемся в равновесии с сульфидами в момент минералообразования, был рассчитан по уравнениям фракционирования [20, 24], исходя из предположения, что в растворах преобладал H_2S :

$$\Delta_{\text{пирит-H}_2\text{S}} = \delta^{34}\text{S}_{\text{пирит}} - \delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}} = 0,4 (10^6/T^2);$$

$$\Delta_{\text{халькопирит-H}_2\text{S}} = \delta^{34}\text{S}_{\text{халькопирит}} - \delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}} = 0,05(10^6/T^2);$$

$$\Delta_{\text{галенит-H}_2\text{S}} = \delta^{34}\text{S}_{\text{галенит}} - \delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}} = -0,64 (106/T^2);$$

$$\Delta_{\text{сфалерит-H}_2\text{S}} = \delta^{34}\text{S}_{\text{сфалерит}} - \delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}} = 0,1 (106/T^2).$$

Преобладающий изотопный состав серы во флюиде Широкинского рудного узла при температуре 280°C характеризуется повышенными значениями изотопов серы сфалерита от $+6,33$ до $+9,43$ ‰; галенита – $+16,85$ до $+18,46$ ‰, что указывает на образование их за счет магматического источника и частичного заимствования из вмещающих пород. Облегченное значение изотопов серы во флюиде сфалерита (проба 179) можно объяснить участием в рудообразовании метеорной воды (табл. 5).

Распределение редкоземельных элементов (РЗЭ) в рудах Широкинского рудного узла показывает, что наибольшими концентрациями легких РЗЭ характеризуются руды кварц-антимонитового состава, наименьшими – свинцово-цинковые руды (табл. 2). Анализ распределения РЗЭ показывает, что формирование свинцово-цинковых руд происходило из двух в разной степени дифференцированных разноглубинных магматических очагов. Первый, более глубокий магматический очаг, характеризовался положительными значениями

Таблица 5. Изотопный состав серы сульфидных минералов и расчетный состав серы во флюиде Широкинского рудного узла

Table 5. Sulfur isotopic compositions of sulfide minerals and current composition of sulfur in fluid of the Shirokinsky ore cluster

Образец Sample	Минерал Mineral	$\delta^{34}\text{S}, \text{‰}$ CDT	Изотопный состав серы во флюиде Sulphur isotopic composition in fluid $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ ‰ CDT	
			240 °C	280 °C
Ново-Широкинский месторождение/Novo-Shirokinsky deposit				
112	Сфалерит Sphalerite	9,3	+7,57	+8,00
112-2	Сфалерит Sphalerite	9,5	+7,77	+8,23
117	Халькопирит Chalcopyrite	11,9	+11,03	+11,27
119	Сфалерит Sphalerite	8,8	+7,07	+7,53
120		8,3	+6,57	+7,07
132		10,6	+8,87	+9,33
134		10,7	+8,97	+9,43
179		-2,1	-0,37	-0,83
116	Галенит Galena	10,3	+21,41	+18,46
117		9,4	+20,51	+17,55
123		9,6	+20,71	+17,75
129		9,5	+20,61	+17,65
131		8,7	+19,81	+16,85
Лугинское месторождение/Lugiinsky deposit				
150	Пирит/Pyrite	11,7	+4,76	+6,60
Кочковское месторождение/Kochkovsky deposit				
161	Реальгар/Realgar	5	–	–
162	Антимонит/Antimonite	6,9	–	–
163	Сфалерит/Sphalerite	7,6	+5,87	+6,33

Примечание. Прочерк – нет данных.

Note: Dash – no date.

европиевого минимума ($\text{Eu}/\text{Eu}^* - 1,64-6,36$), повышенными значениями Eu/Sm отношений ($\text{Eu}/\text{Sm} - 0,50-2,85$). Второй магматический очаг имел соответственно следующие значения ($\text{Eu}/\text{Eu}^* - 0,74-0,89$; $\text{Eu}/\text{Sm} - 0,29-0,36$) (табл. 2, рис. 5). Наличие двух разноглубинных, в разной степени дифференцированных магматических очагов подтверждается распределением РЗЭ в свинцово-цинковых рудах на диаграмме $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{pm}}-(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{pm}}$. Здесь четко выделяются две группы свинцово-цинковых руд с разными геохимическими характеристиками. Изучение изотопного состава свинца галенитов Ново-Широкинского месторождения показало, что на месторождении обосновано выделение двух источников свинца корового и мантийно-корового, имеющего резко подчиненную роль. Мантийно-коровый источник, вероятно, связан с внутриплитными магматическими образованиями трахибазальтовой серии [8].

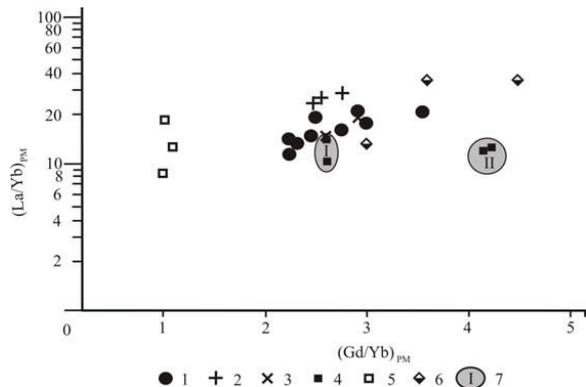


Рис. 5. Диаграмма $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{pm}}-(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{pm}}$ пород Широкинского рудного узла. 1 – эффузивы шадаронской серии, интрузии шахтаминского комплекса; 2 – граниты, 3 – диоритовые порфириды; 4 – свинцово-цинковые руды; 5 – кварц-турмалиновая минерализация; 6 – кварц-доломит-сурьмяная минерализация; 7 – поля развития свинцово-цинковых руд с разными геохимическими характеристиками (I – свинцово-цинковые руды, образованные из недифференцированных глубоких магматических очагов, II – свинцово-цинковые руды, образованные из дифференцированных магматических очагов)

Fig. 5. Diagram $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{pm}}$ versus $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{pm}}$ from rocks of the Shirokinsky ore cluster. 1 are the volcanic rocks of shadaronk series, shahtaminsk intrusion complex; 2 are the granites, 3 are the diorite-porphyr; 4 are the lead-zinc ores; 5 is the quartz-tourmaline mineralization, 6 is the quartz-dolomite-antimony mineralization; 7 are the fields of development of lead-zinc ores with different geochemical characteristics: I are the lead-zinc ores, formed from undifferentiated deep magma chambers, II are the lead-zinc ore, formed of differentiated magma chambers

Заключение

Таким образом, месторождения Широкинского рудного узла являются производными процессов эволюции Тайнинской вулcano-купольной структуры, магматические образования которой являются источниками рудного вещества. Это подтверждается зональным распределением рудной минерализации вокруг магматического центра структуры, а также данными изотопного состава кислорода, углерода рудоносных жил и серы сульфидов, указывающие на их магматический источник. Геохимические особенности интрузивных и эффузивных образований Широкинского рудного узла свидетельствуют о наличии в них мантийной составляющей, что подтверждается соответствием их адакитам. Образование свинцово-цинковых руд происходило из разной степени дифференцированных, разноглубинных магматических очагов, что подтверждается особенностями распределения редкоземельных элементов в рудах.

Работа выполнена в рамках госзадания (проект 0330-2016-0001) и при частичной поддержке РФФИ (грант 16-05-00353).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зорина Л.Д., Санин Б.П. Петрохимия и геохимические особенности Широкинского вулcano-плутонического комплекса (Восточное Забайкалье) // Геохимия. – 1980. – № 2. – С. 17–25.
2. Комаров П.В., Томсон И.Н. Возрастная последовательность оруденения и плутогенные минерагенические циклы на примере Восточного Забайкалья // Отечественная геология. – 1995. – № 10. – С. 26–36.
3. Зорина Л.Д., Кравченко В.М., Романов В.А. Новые данные о магматизме Широкинского рудного района // Доклады АН СССР. – 1986. – Т. 290. – № 5. – С. 1221–1224.
4. Шадрина А.А., Редин Ю.О. Минеральный состав руд Лугинского золото-полиметаллического месторождения (Восточное Забайкалье) // Металлогения древних и современных океанов. – 2011. – № 17. – С. 222–225.
5. Павленко Ю.В. Геолого-структурный прогноз: Кочковское золото-сурьмянное месторождение // Вестник Забайкальского государственного технического университета. – 2012. – № 12 (91). – С. 129–139.
6. Трубачев А.И., Секисов А.Г.Б., Лавров А.Ю. Ассоциации минералов в рудах и продуктах обогащения Восточно-Забайкальских месторождений цветных и благородных металлов // Известия Сибирского отделения наук о Земле РАН. – 2016. – № 3 (56). – С. 44–56.
7. Али А.А., Прокофьев В.Ю., Кряжев С.Г. Геохимические особенности формирования Ново-Широкинского золото-полиметаллического месторождения (Восточное Забайкалье, Россия) // Вестник МГУ. – 2014. – № 2. – С. 15–21.
8. Дриль С.И. Изотопный состав свинца полиметаллических руд Ново-Широкинского месторождения Восточного Забайкалья: источники вещества и возможная связь с внутриплитным магматизмом региона // Известия Сибирского отделения Секция наук о Земле РАН. – 2015. – № 3 (52). – С. 7–12.
9. Ефремов С.В., Дриль С.И., Сандмирова Г.П. Образование гранитоидов с адакитовой геохимической характеристикой в коллизонных орогенах на примере раннепалеозойских гранитоидов хребта Мунку-Сардык (Восточный Саян) // Геохимия. – 2016. – № 7. – С. 633–640.
10. Гусев А.И., Коробейников А.Ф. Петрология и золотоносность адакитовых гранитоидов Усть-Беловского комплекса Макарьевского ареала Горного Алтая // Вестник Томского государственного университета. Инжиниринг ресурсов. – 2015. – Т. 326. – № 10. – С. 81–91.
11. Martin H. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids // Lithos. – 1999. – V. 46. – P. 411–429.
12. Kay R.W. Aleutian magnesian andesites: melts from subducted Pacific Ocean crust // J. Volcanology and Geothermal Research. – 1978. – V. 4. – P. 117–132.
13. Defant M.J., Drummond M.S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere // Nature. – 1990. – V. 347. – P. 662–665.
14. Dacite genesis via both slab melting and differentiation: petrogenesis of La Yeguada Volcanic Complex, Panama / M.J. Defant, P.M. Richerson, J.Z. Boer et al. // J. Petroleum. – 1991. – V. 32. – № 6. – P. 1101–1142.
15. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: implications for the genesis of porphyry copper mineralization / Q. Wang, Ping Jian, Bao Zhi-Wei et al. // J. Petroleum. – 2006. – V. 47. – P. 119–144.
16. Hou Z.-Q., Qu X.-M., Li Y.-G. Melt components derived from a subducted slab in late orogenic ore bearing porphyries in the Gangdese copper belt, southern Tibetan plateau // Lithos. – 2004. – V. 74. – P. 131–148.
17. Sharp Z.D. A laser-based microanalytical method for the in-situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1990. – V. 54. – P. 1353–1357.
18. Matsuhisa Y., Goldsmith J.R., Clouton R.N. Oxygen isotopic fractionation in the system quartz-albite-anortite-water // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1979. – V. 43. – P. 1131–1140.
19. Bortnikov N.S., Prokofyev V.Y. World-class mesothermal gold deposits of Russia: Composition and origin of ore-forming fluids // Mineral exploration and research: Digging Deeper. Proceed. of the 9th Biennial SGA Meeting. – Dublin, 2007. – V. 1. – P. 793–796.
20. Ohmoto H., Rye R.O. Isotope of sulfur and carbon // Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. – N.Y.: J. Wiley and Sons, 1979. – P. 509–567.
21. Jia Y., Kerrich R. Giant quartz vein systems in accretionary orogenic belts: for a metamorphic fluid origin from $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ studies // Earth Planet. Sci. Lett. – 2000. – V. 184. – P. 211–224.
22. Grau J.E., Snee L.W., Wilson F.H. Epithermal mercury-antimony and gold-bearing vein lodes of southwestern Alaska // Economic Geology Monograph 9. – 1997. – P. 287–305.
23. Бортников Н.С. Геохимия и происхождение рудообразующих флюидов в гидротермально-магматических системах и тектонически активных зонах // Геология рудных месторождений. – 2006. – Т. 48. – № 1. – С. 2–28.
24. Гаманин Г.Н., Викентьева О.В., Прокофьев В.Ю., Бортников Н.С. Аркачан – новый золото-висмут-сидерит-сульфидный тип месторождений в оловоносном Западно-Верхоянском районе (Якутия) // Геология рудных месторождений. – 2015. – Т. 57. – № 6. – С. 513–543.

Поступила 11.04.2017 г.

Информация об авторах

Абрамов Б.Н., доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геохимии и рудогенеза Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН.

Калинин Ю.А., доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории прогнозно-металлогенических исследований Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН; доцент, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет.

Ковалев К.Р., доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории прогнозно-металлогенических исследований Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Посохов В.Ф., старший научный сотрудник лаборатории физических методов анализа Геологического института СО РАН.

UDC 550.42 (571.55)

SHIROKINSKY ORE CLUSTER (EASTERN TRANS-BAIKAL): FORMATION CONDITIONS, PETROCHEMISTRY OF ROCKS AND ORES, ASSOCIATION BETWEEN MINERALIZATION AND MAGMATISM

Bair N. Abramov¹,
b_abramov@mail.ru

Yuri A. Kalinin^{2,3},
kalinin@igm.nsc.ru

Konstantin R. Kovalev²,
kkr@igm.nsc.ru

Victor F. Posokhov⁴,
vitaf1@yandex.ru

¹ Institute of Natural resources, Ecology, and Cryology SB RAS,
PO box 1032, 16 a, Nedorezov street, Chita, 672014, Russia.

² V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS,
3, Koptuyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia

³ National Research Novosibirsk State University,
2, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.

⁴ Geological Institute SB RAS,
2, Pavlov street, Ulan-Ude, 670047, Russia.

Relevance of the work is in revealing conditions of formation of rocks and ores from the Shirokinsky ore cluster. The distinctive feature of the ore cluster is the high gold mineralization of its polymetallic ores. The concentrations of gold in ores and its reserves correspond to typical lode gold deposits. The targets of investigation are the Novo-Shirokinsky gold-polymetallic deposit that is the largest with respect to reserves and massively smaller – the Lugiinsky gold-polymetallic and Kochkovsky gold-antimony deposits.

The aim of the research is to identify petrochemical features of rocks and ores; to reveal mineralization sources of Shirokinsky ore cluster.

Methods of investigation. X-ray fluorescence analysis was used (at GIN SB RAS, Ulan-Ude) for determining an element composition of rocks. Content of major elements was determined by the standard chemical method, concentrations of rare earth elements were determined using sorption-atomic-emission spectrometer with inductively coupled plasma (ISP-SAES) (at GIN SB RAS, Ulan-Ude). Determination of oxygen isotopic composition was performed using the MIR 10–30 equipment (at Common User Center, Irkutsk). The authors studied sulfide sulfur isotopic composition and contents of Au and Ag at CUC SB RAS of multi-element and isotope investigation (Novosibirsk).

Investigation results. It was ascertained that deposits of the Shirokinsky ore cluster are derivatives of Taininsky volcanic-dome structure formation. Its magmatic rocks serve as sources of ore matter. This is supported by zonal distribution of ore mineralization around the magmatic center, as well as by the data on isotope compositions of oxygen and carbon of ore-bearing veins and sulfur of sulfide ore minerals indicating their magmatic source. The geochemical features of intrusive and volcanic igneous rocks of the Shirokinsky ore cluster evidence the presence of mantle constituent and adakites. Formation of lead-zinc ores is associated with differentiated, different depth magmatic magma chambers. This is proved by the peculiarities of REE distribution in ores.

Key words:

Eastern Transbaikal, Shirokinsky ore cluster, gold-polymetallic ores, magmatism, sources of ore, isotopy, conditions of ore formation.

The research was carried out within the State Task (project 0330–2016–0001) and it was partially financially supported by the RFBR (grant 16–05–00353).

REFERENCES

1. Zorina L.D., Sanin B.P. Petrological Geochemistry and geochemical features of Shirokinsky volcano-plutonic complex (Eastern Transbaikalia). *Geochemistry International*, 1980, no. 2, pp. 17–25. In Rus.
2. Komarov P.V., Tomson I.N. Age sequence of mineralization and mineral plutogene cycles on the example of Eastern Transbaikalia. *Otechestvennaya geologiya*, 1995, no. 10, pp. 26–36. In Rus.
3. Zorina L.D., Kravchenko B.M., Romanov V.A. New data on magmatism of Shirokinsky ore district. *Doklady Earth Sciences*, 1986, vol. 290, no. 5, pp. 121–124. In Rus.
4. Shadrina A.A., Redin Yu.O. Mineral composition of ores of Lugiinsk gold-polymetallic Deposit (East Transbaikalia). *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov*, 2011, no. 17, pp. 222–225. In Rus.
5. Pavlenko Yu.V. Structural forecast: Kochkovsky gold-antimony field. *Vestnik Zabaykalskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, no. 12 (91), pp. 129–139. In Rus.

6. Trubachev A.I., Sekisov A.G., Lavrov A.Yu. Mineral Association in ores and dressing products in the East Transbaikalian deposits of nonferrous and precious metals. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya nauk o Zemle RAEN*, 2016, no. 3 (56), pp. 44–56. In Rus.
7. Ali A.A., Prokofev V.Yu., Kryazhev S.G. Geochemical features of formation of Novo-Shirokinsky gold-polymetallic Deposit (East Transbaikalia, Russia). *Moscow University Geology Bulletin*, 2014, no. 2, pp. 15–21. In Rus.
8. Dril S.I. Isotopic composition of lead ores of Novo-Shirokinsky deposits of Eastern Transbaikalia: the sources of substances and possible link with intraplate magmatism of the region. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya. Sektsiya nauk o Zemle RAEN*, 2015, no. 3 (52), pp. 7–12. In Rus.
9. Efremov S.V., Dril S.I., Sandimirova G.P. Formation of granitoids with additive geochemical feature in collisional orogens by the example of early-Paleozoic granitoids of Munku-Sardyk range (Eastern Sayan). *Geochemistry International*, 2016, no. 7, pp. 633–640. In Rus.
10. Gusev A.I., Korobeynikov A.F. Petrology and gold content of adakitic granitoids of Ustbelovskii complex in Makarevskii range of Gorny Altai. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 10, pp. 81–91. In Rus.
11. Martin H. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 1999, vol. 46, pp. 411–429.
12. Kay R.W. Aleutian magnesian andesites: melts from subducted Pacific Ocean crust. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1978, vol. 4, pp. 117–132.
13. Defant M.J., Drummond M.S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 1990, vol. 347, pp. 662–665.
14. Defant M.J., Richerson P.M., Boer J.Z. Dacite genesis via both slab melting and differentiation: petrogenesis of La Yeguada Volcanic Complex, Panama. *Journal of Petrology*, 1991, vol. 32, no. 6, pp. 1101–1142.
15. Wang Q., Jian Ping, Zhi-Wei Bao. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: implications for the genesis of porphyry copper mineralization. *Journal of Petrology*, 2006, vol. 47, no. 1, pp. 119–144.
16. Hou Z.-Q., Qu X.-M., Li Y.-G. Melt components derived from a subducted slab in late orogenic ore bearing porphyries in the Gangdese copper belt, southern Tibetan plateau. *Lithos*, 2004, vol. 74, pp. 131–148.
17. Sharp Z.D. A laser-based microanalytical method for the in-situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, vol. 54, pp. 1353–1357.
18. Matsuhisa Y., Goldsmith J.R., Clouton R.N. Oxygen isotopic fractionation in the system quartz-albite-anortite-water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1979, vol. 43, pp. 1131–1140.
19. Bortnikov N.S., Prokofyev V.Y. World-class mesothermal gold deposits of Russia: Composition and origin of ore-forming fluids. *Mineral exploration and research: Digging Deeper. Proceed. of the 9th Biennial SGA Meeting*. Dublin, 2007. Vol. 1, pp. 793–796.
20. Ohmoto H., Rye R.O. Isotope of sulfur and carbon. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. N.Y., J. Wiley and Sons, 1979. pp. 509–567.
21. Jia Y., Kerrich R. Giant quartz vein systems in accretionary orogenic belts: for a metamorphic fluid origin from $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ studies. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, vol. 184, pp. 211–224.
22. Grau J.E., Snee L.W., Wilson F.H. Epithermal mercury-antimony and gold-bearing vein lodes of southwestern Alaska. *Economic Geology Monograph* 9, 1997. pp. 287–305.
23. Bortnikov N.S. Geokhimiya i proiskhozhdenie rudoobrazuyushchikh flyuidov v gidrotermalno-magmatischenkikh sistemakh i tektonicheski aktivnykh zonakh [Geochemistry and origin of ore-forming fluids in magmatic-hydrothermal systems and tectonically active zones]. *Geology of Ore Deposits*, 2006, vol. 48, no. 1, pp. 2–28.
24. Gamyanyan G.N., Vikenteva O.V., Prokofev V.Yu. Arkachan – Novy zoloto-bismut-siderit-sulfidny tip mestorozhdeniy v olovonosnom Zapadno-Verkhoyanskom rayone (Yakutiya) [Arcachon – new gold-bismuth-siderite-sulfide type deposits of tin in the Western Verkhoyansk region (Yakutia)]. *Geology of Ore Deposits*, 2015, vol. 57, no. 6, pp. 513–543.

Received: 11 April 2017.

Information about the authors

Bair N. Abramov, Dr. Sc., leading researcher, Institute of Natural resources, Ecology, and Cryology SB RAS.

Yuri A. Kalinin, Dr. Sc., senior researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS; assistant professor, National Research Novosibirsk State University.

Konstantin R. Kovalev, Dr. Sc., senior researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.

Victor F. Posokhov, senior researcher, Geological Institute SB RAS.