

А. А. Котов, К. Ю. Мурашов
Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии
и геохимии РАН, г. Москва
kotovaleksey@gmail.com

Особенности рудной минерализации месторождения Вернинское, Бодайбинский золоторудный район

Месторождение Вернинское расположено в северной части Бодайбинского синклинория (в пределах собственно «Бодайбинского» синклинального погружения) и приурочено к центральной части Кропоткинского рудного узла. В строении рудного поля участвуют переслаивающиеся песчаники, алевролиты и филлиты верхнего протерозоя, измененные в условиях зеленосланцевой фации метаморфизма. В структурном плане месторождение представляет собой ассиметричную запрокинутую на юг сжатую складку, осложненную разрывными нарушениями. Среди них наиболее развиты субширотные нарушения, представленные зонами сближенных кулисообразных разрывов мощностью до 15–20 м, субмеридиональные и северо-западные разломы с крутым падением. Крылья антиклинали осложнены многопорядковой складчатостью, трещиноватостью, будинажем, осевым и внутреслоевым кливажем [Иванов, 2008].

Месторождение включает два геолого-промышленных типа золотого оруденения: кварц-сульфидный прожилково-вкрапленный и кварцево-жильный. Кварцево-жильная минерализация на месторождении представлена зоной Первенец, которая контролируется субширотным нарушением, продольным и косесекущим по отношению к Вернинской антиклинали и имеет падение более крутое относительно слоистости вмещающих пород (55–65° – зона Первенец к 40–50° – вмещающие породы).

Прожилково-вкрапленное оруденение, главное по промышленному значению, находится в трех рудных зонах, приуроченных к зонам смятия в наиболее деформированном участке антиклинали. В настоящее время отрабатываются рудные зоны 1 и 2. «Слепая» рудная зона 3 была подсечена несколькими скважинами на глубине 300 м. Наиболее крупной из вскрытых рудных зон является зона 1 в крыле антиклинали. Рудовмещающими породами являются ритмично переслаивающиеся песчаники, алевролиты и сланцы третьей пачки нижней подсвиты аунакитской свиты, подстилаемые горизонтом известковистых песчаников. Насыщенность пород сульфидами в центральной части зоны составляет 3–5 %, на флангах она уменьшается, что увязывается с меньшей интенсивностью зоны смятия и сменой литологического состава пород. Нижняя граница зоны, проходящая над горизонтом известняков, контрастная, в то время как верхняя – постепенная.

Сульфидная минерализация представлена, в основном, пиритом и арсенопиритом. В парагенезисе с ними в меньшем количестве встречаются халькопирит, сфалерит, галенит, блеклые руды и другие минералы. Из нерудных минералов с сульфидами постоянно отмечаются кварц и карбонаты.

Пирит на площади месторождения распространен повсеместно и отличается морфологией, характером и интенсивностью выделений в зависимости от литологического состава пород и степени их гидротермально-метасоматических преобразований. С усилением последних и увеличением в разрезе количества углеродсодержа-

щих алевролитов и сланцев, по сравнению с преимущественно песчаниковыми породами, количество пирита возрастает.

Широко развиты кристаллы мелко- и тонкозернистого, иногда глобулярного пирита (сферических образований без внутренней структуры), которые локализуются в песчаниках. Повсеместные вкрапления тонко- и мелкозернистого пирита в пирите других генераций и арсенопирите позволяют считать его наиболее ранним среди сульфидов.

Гнездово-линзовидные скопления пирита характерны для слоистых пород и, как правило, приурочены к контактам песчаников со сланцами, локализуясь в основном в песчаниках. Почти сплошные скопления пирита округлой формы сложены также тонко-мелкозернистыми (от тысячных до сотых долей миллиметра) кристаллами кубического и кубооктаэдрического габитуса, часто образующими сростки. Густота скопления пирита уменьшается от центра к периферии, иногда в центральной части сохраняются фрагменты, подчеркивающие первичную слоистость пород. Включения других минералов в таких образованиях довольно редки и представлены магнетитом (в сростании с пиритом), реже сфалеритом. «Облачные» скопления пирита сложены сростками зерен радиального строения, в которых тонкозернистый пирит образует нечеткие полосы и пятна среди выделений кристаллов мелкозернистого кубического и кубооктаэдрического пирита. В краевых частях сростков кристаллы пирита более правильные с огранкой куба. Довольно часто здесь встречаются включения золота, ассоциирующие с халькопиритом, сфалеритом, кварцем, либо локализованные самостоятельно в зернах пирита.

Прожилковые послойные скопления пирита прямолинейной и извилистой формы наиболее часто встречаются в пределах золотоносной части минерализованной зоны. Границы пиритовых прожилков обычно нечеткие, расплывчатые за счет равномерно убывающей от центра прожилков вкрапленности пирита. Центральные части прожилковоподобных скоплений мощностью от 0.1–0.5 до 1–3 см наиболее насыщены пиритом. Эти образования нередко сопровождаются окварцеванием пород. В перекристаллизованном пирите часто присутствуют мелкозернистые включения халькопирита, сфалерита, пирротина, иногда золота. Размер включений самородного золота достигает здесь сотых долей миллиметра. Оно локализуется по трещинам в зернах пирита и межзерновом пространстве в ассоциации со сфалеритом, халькопиритом, кварцем. Золотоносность таких образований несколько выше, чем в предыдущей группе. Перекристаллизованный пирит связан, по-видимому, с диагенезом осадков, и в значительной мере изменен в процессе регионального метаморфизма, но в окончательном виде он является продуктом более поздних гидротермальных процессов и характерен для участков распространения рудных зон.

Отдельные метакристаллы пирита и их сростания характерны как для рудных участков минерализованных зон, так и для их периферии. Размеры отдельных метакристаллов обычно составляют от 0.5 до 3–5 мм, изредка достигая 1–1.5 см. Представлены они кубическими кристаллами, реже уплощенными, искаженными и кубооктаэдрическими. Для метакристаллов пирита характерны включения вмещающих пород, кварца, карбонатов, халькопирита, арсенопирита, сфалерита, галенита, рутила, пирротина и золота. В некоторых крупных метакристаллах присутствуют фрагменты рассланцованных пород с вкрапленностью тонкокристаллического пирита. Все эти признаки свидетельствуют о его более позднем по отношению к вышеописанным разновидностям образовании и метасоматическом генезисе крупнокристаллического пирита.

Кварц-пиритовые прожилки с крупнозернистым пиритом встречаются редко. Их мощность обычно не превышает 1–3 см, протяженность по простиранию и падению – 1–3 м. Контролируются они секущими слоистость и сланцеватость трещинами скола и отрыва. Зерна пирита имеют размер 1–5 мм, кубический габитус, иногда кристаллы искажены. Включения пород, кварца, рутила, халькопирита, золота и сфалерита располагаются как во внутренних частях, так и по периферии зерен, однако внешние участки кристаллов обычно лишены включений. Сложное внутреннее строение крупных кристаллов пирита позволяет предположить, что их рост происходил в изменяющихся физико-химических условиях. Самородное золото, ассоциирующее со сфалеритом, халькопиритом, реже галенитом, широко распространено в позднем пирите.

Арсенопирит в виде прожилков и вкраплений характерен для центральной части минерализованных зон, тяготеющих к участкам максимального проявления элементов смятия в зонах дислокаций. Вмещающими арсенопирит являются горизонты тонко-среднеслоистых ритмов, залегающих на незначительном расстоянии от известковистых горизонтов. Контуры распространения арсенопирита в грубом приближении совпадают с положением золоторудных зон.

Вкрапленный арсенопирит представлен кристаллами пластинчатой, таблитчатой, клиновидной морфологии и крестообразными сростками размером от долей до 5–6 см. Кристаллы часто имеют зональное строение. Их внутренние части представляют пластинчатые сростки с редкими секторальными полосами, во внешних – прослеживаются тонкие, параллельные между собой зоны роста, участками корродированные. Наиболее характерной особенностью арсенопирита является повсеместное присутствие в его кристаллах включений тонкозернистого глобулярного и мелкозернистого пирита кубического габитуса. При этом в одних случаях отмечается их перекристаллизация, в других – ранний пирит сохраняется без изменений. Халькопирит, сфалерит, пирротин, блеклая руда и галенит совместно с кварцем в виде микропрожилков рассекают кристаллы арсенопирита либо концентрируются в кварц-карбонатных оторочках, образуя наросты на его гранях и слегка корродируя их. Для арсенопирита характерны редкие, но крупные (до 0.3 мм) включения золота. Они образуют прожилковидные или угловато-сглаженные выделения по трещинам в кристаллах арсенопирита.

Гнездово-линзовидные скопления арсенопирита широко развиты в пределах рудной зоны. Совместно с подобными агрегатами пирита они составляют 80–85 % всех разновидностей сульфидной минерализации. Их форма чаще неправильная желвакоподобная, размер этих образований от 2–5 до 8–10 см. Они контролируются крутопадающими трещинами скола и отрыва либо кливажными трещинами, но в любом случае располагаются удлиненно в их плоскости. Контакты гнезд четкие, но неровные. Кристаллы арсенопирита и крупнокристаллического пирита, также как и в предыдущих разновидностях, насыщены микровключениями вмещающих пород с реликтовой сланцеватостью, кварца, карбонатов, халькопирита, сфалерита, галенита, рутила, пирротина, отмечаются включения золота.

Халькопирит, сфалерит, галенит и блеклая руда наблюдаются в сульфидных зонах в виде включений в пирите, арсенопирите, часто в ассоциации между собой.

Особенностью рудной минерализации месторождения Вернинское является то, что золото в рудных зонах тесно ассоциирует, в первую очередь, с арсенопиритом и наблюдается в виде включений, на контакте с ним и с кварцем, а также развивается в

сульфидах и кварце по микротрещинам. Нередко проявления золота видны и на контакте с вмещающими породами.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-05-00084а.

Литература

Иванов А. И. Основные черты геологического строения и золотоносность Бодайбинского рудного района // Руды и металлы. 2008. Т. 3. С. 43–61.

А. Е. Будяк¹, А. В. Паршин¹, О. В. Акишина²

*¹ – Институт геохимии СО РАН, г. Иркутск
budyak@igc.irk.ru*

² – Иркутский государственный технический университет, г. Иркутск

Геохимическая характеристика нижнепротерозойских отложений юга Сибирской платформы

В пределах Байкальской горной области и Кодаро-Удоканской структурно-формационной зоны (СФЗ) выделяется несколько углеродистых толщ раннепротерозойского возраста, которые являются единой углеродисто-терригенной формацией, возникшей, скорее всего, в условиях эпикратонного рифтогенного морского бассейна (рис. 1). На Тонодском поднятии они представлены албазинской и михайловской свитами, на Нечерском – чуйской толщей и ходоканской свитой, а в Кодаро-Удоканской СФЗ – отложениями кодарской серии (боруяхская, веселинская, икабийская, аянская и, возможно, инырская (чинейская серия) свиты). Все они выделяются нами как кевактинская углеродисто-терригенная формация.

В работе основное внимание уделено Кодаро-Удоканской СФЗ, в пределах которой известны промышленные месторождения благородных и редких металлов. Наиболее известным является гигантское Удоканское месторождение меди, локализованное в зоне развития нижнепротерозойских пород Удоканского синклиория. Главная роль в локализации рудной минерализации принадлежит карбонатно-терригенному удоканскому комплексу. Образование комплекса делятся на четыре крупные серии: джялтуктинскую, кодарскую, чинейскую и кеменскую. Отложения кодарской серии, судя по литологическим характеристикам, формировались в условиях дистального шельфа и материкового склона. Наиболее характерной геохимической чертой всех отложений кевактинской углеродисто-терригенной формации является высокое содержание глинозема в сланцах Al_2O_3 (в среднем, 19 мас. % с максимумами до 27 мас. %) и K_2O (4–6 мас. %). Их накопление можно объяснить активным выветриванием исходных пород под влиянием жаркого гумидного климата. Отложения формации обогащены рассеянным углеродистым веществом, что свидетельствует о бурном развитии бактериального бентоса в бассейне осадконакопления с застойным режимом [Терлеев и др., 2006]. Концентрации C_{org} варьируют в пределах от 0.5 до 10 мас. %. Высокоуглеродистые метаалевролиты и метааргиллиты кодарской серии (икабийская, аянская и инырская свиты) характеризуются повышенными

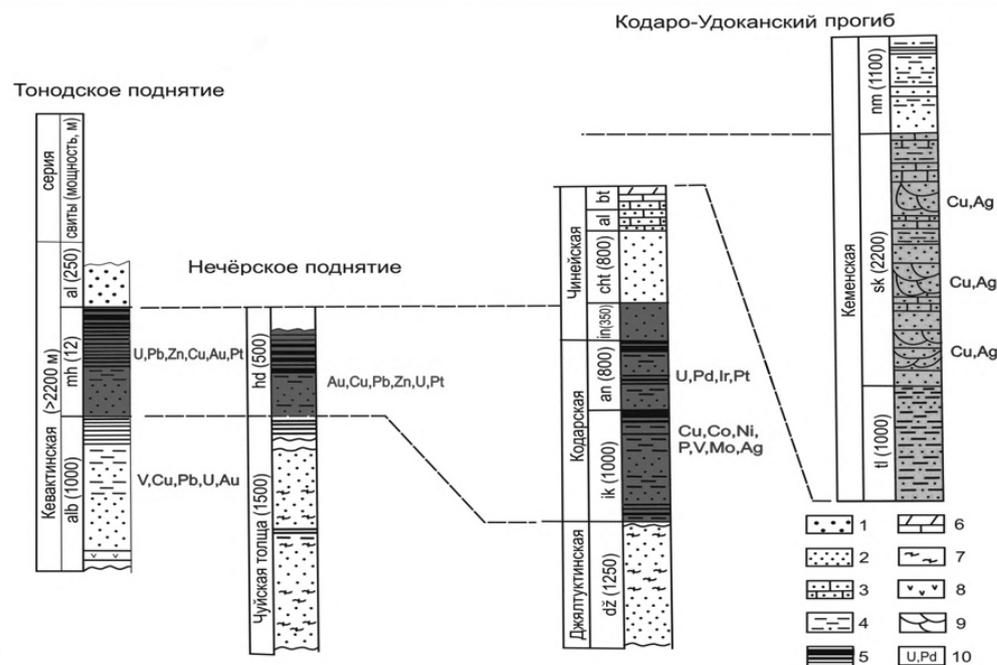


Рис. 1. Корреляция и металлогеническая характеристика разрезов нижнепротерозойской кевактинской углеродисто-терригенной формации Байкальской горной области.

1 – конгломераты, гравелиты; 2 – метапесчаники; 3 – песчаники известковистые; 4 – алевросланцы, алевропесчаники; 5 – сланцы черные углеродистые; 6 – карбонатные породы; 7 – парагнейсы; 8 – метабазиты; 9 – косая слоистость; 10 – металлогеническая специализация углеродистых толщ. Свиты: alb – албазинская; mh – михайловская; al – александровская; hd – ходоканская; ik – икабийская; an – аянская; in – инырская; cht – читкандинская; bt – бутунская; tl – талаканская; sk – сакуканская; nm – намингинская.

ми содержаниями мафических петрогенных элементов (Fe, Mg, Ca, Mn) и ряда халькофильных металлов (Cu, Ni, Zn, Pb, Au, Ag, U), а также элементов платиновой группы (ЭПГ), в единичных пробах достигающих 0.0п г/т. Такая геохимическая специализация может быть унаследована от пород более древнего зеленокаменного пояса [Федоровский, 1972], а также связана с синхронным вулканизмом основного состава, проявленным на раннем (рифтогенном) этапе развития прогиба и способствовавшим формированию металлогенической специализации толщ [Немеров и др., 2005; 2009]. Рудная минерализация углеродистых отложений представлена пиритом, халькопиритом, пирротинном, молибденитом, сульфидом никеля. Рудная минерализация также обогащена Cu, Co, Ni, V, Mo, Ag, U, Pt, As.

Характерным для Кодаро-Удоканской СФЗ является то, что терригенные и карбонатно-терригенные красноцветные отложения прибрежных и дельтовых фаций, расположенные на одном стратиграфическом уровне с отложениями кодарской серии и стратиграфически выше, часто обогащены рядом рудных компонентов: Cu, Zn, Pb, U, Ni, Au, Ag, Pt, Pd и др.

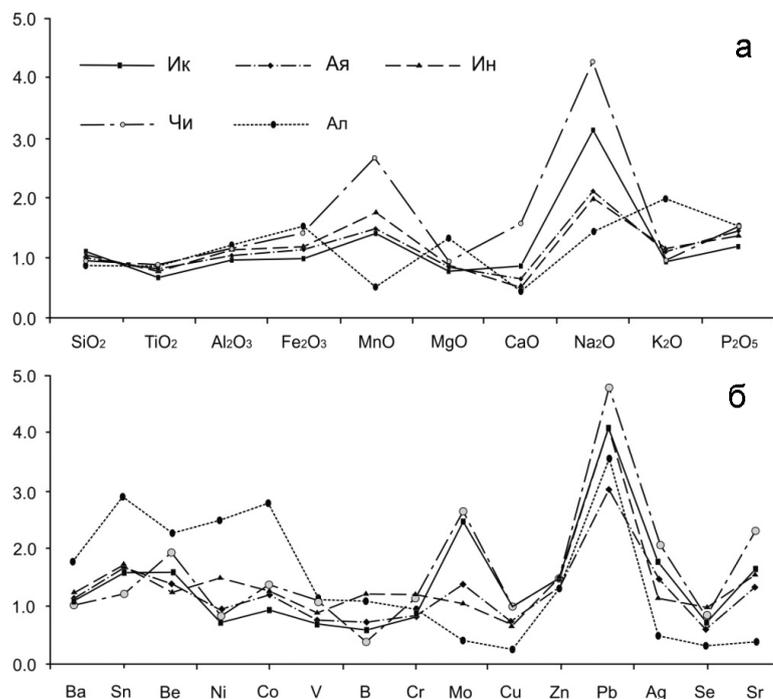


Рис. 2. Распределение петрогенных (а) и редких (б) элементов в породах кодарской и читкандинской серий: икабийской (Ик), аянской (Ая), иннырской (Ин) читкандинской (Чи) и александровской (Ал) свит, нормированных по стандартному образцу черных сланцев SCHS-1 [Petrov et al., 2004].

Для обоснования ведущей роли нижних стратиграфических горизонтов (кодарская и чинейская серии) в процессе формирования месторождений Кодаро-Удоканской СФЗ детально изучено распределение петрогенных (рис. 2а), редких и редкоземельных элементов (рис. 2б) в обозначенных толщах. Исследования проводились на базе ИГХ СО РАН методами РФА (петрогенные элементы), ICP-MS (редкие и РЗЭ), атомной абсорбции (Au, Ag, ЭПГ). Проанализировано около 300 проб, отобранных по двум полным пересечениям нижнепротерозойских отложений: район р. Нижний Ингамакит и Верхне-Сюльбанское рудное поле.

В результате выявлена отчетливая геохимическая специализация отложений икабийской, аянской и иннырской свит кодарской серии и читкандинской свиты чинейской серии, которые резко отличаются практически по всем основным показателям от александровской свиты, представляющей верхний стратиграфический уровень чинейской серии. Наиболее характерным является увеличение содержаний Fe_2O_3 , MnO , Na_2O и P_2O_5 от пород икабийской к породам читкандинской свиты (рис. 2а). Это характерно для гидротермальной деятельности, сопровождающейся щелочным (преимущественно натровым) метасоматозом с сопряженным формированием субщелочных метасоматитов хлоритового и слюдисто-карбонатного состава. Время формирования александровской свиты, по всей видимости, характеризуется изменением геодинамического режима и прекращением гидротермальной деятельности, синхронной осадконакоплению.

Отложения кодарской серии отличаются повышенными содержаниями Sn, Mo, Ag, Sr, относительно стандарта черных сланцев Байкальской горной области [Petrov et al., 2004] (рис. 2б). Геохимические параметры черносланцевых отложений нижних стратиграфических горизонтов резко отличаются от таковых пород вышележащей александровской свиты, особенно для Mo, Zn, Pb, Ag и Sr, характерных для гидротермального флюида на начальных этапах развития рифтогенеза, что подтверждает геодинамические построения В. С. Федоровского [1972].

Обращают на себя внимание повышенные концентрации благородных металлов в исследуемой толще, вероятно, обусловленные как унаследованностью химизма архейского фундамента, так и влиянием рифтогенного магматизма основного состава (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Содержание благородных металлов кодарской и чинейской серий (г/т)

	ik	an	in	cht	al
Ag	0.17	0.14	0.10	0.20	0.04
Au	0.002	0.003	0.032	0.044	0.013
Pt	0.011	0.009	0.006	0.006	0.019
Pd	0.034	0.025	0.016	0.009	0.035

П р и м е ч а н и е . Кодарская серия: ik – икабийская свита, an – аянская свита, in – иннерская свита; чинейская серия: cht – читкандинская свита, al – александровская свита.

Подобные аналитические данные приведены в работе Б. Н. Абрамова [2006], однако утверждение автора о приобретении подобной специализации толщ в условиях активной континентальной окраины не находит подтверждения ни при изучении геологической ситуации региона, ни при дополнительных геохимических построениях, полученных нами.

Корреляционный анализ не выявил закономерностей, указывающих на источник рудных компонентов. Однако при рассмотрении исследуемых пород от нижних стратиграфических горизонтов к верхним видно, что основная группа элементов, характерных для черносланцевых формаций (V, Mo, Cu, Zn), тесно коррелирует с благородными металлами и группой халькофильных элементов (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Корреляционные ассоциации элементов в отложениях Кодарской и Чинейской серий

Свиты	Ассоциация	Элементы
Читкандинская	породная	U-Th-V-Ba-Li-B--Ni-Co-Cr-Sn-Cu-Zn
	рудная	Sr-Mo-Be-Pb-Au-Pt
Иннерская	породная	U-Th-V-Ba-Li-B-Co-Sn-Sc-Zn-Au-Pd
	рудная	Pt-Ag
Аянская	породная	U-Th-V-Ba-Li-B-Cr-Mo-Sn-Sc-Pb-Cu-Zn-Ag
	рудная	1) ЭПГ – инертно, 2) Au-Ba-Zr
Икабийская	породная	V-Mo-Cr-Sc-Cu-Zn-Ag-Au
	рудная	1) Pt-Pd-B-Zr-Cu, 2) Ni-Co-Be

Повышенные содержания в отложениях икабийской и аянской свит относительно местного фона заметны для ограниченного ряда элементов (Sr, Mo, Cu, Ag, Au, Pt, Pd), что указывает на возможное заражение толщи уже на стадии седиментации за счет поступления дополнительного вещества в бассейн осадконакопления. Важно отметить максимальные содержания платиноидов (Pt, Pd) в икабийской и аянской, а Au и Ag – в иннырской и читкандинской свитах (см. табл. 1). На нижних стратиграфических уровнях благородные металлы положительно коррелируют с Zr и В, содержания которых ниже кларка для осадочных пород, что указывает на их седиментационный генезис на этапе заложения рифтогенного прогиба и поступления в бассейн осадконакопления продуктов кор выветривания. Расположенные стратиграфически выше иннырская и читкандинская свиты обогащены Au и Ag до 0.0n–0.n г/т. Характерно увеличение концентраций элементов, коррелирующих с Au, от нижних стратиграфических горизонтов к верхним, что вероятно обусловлено усилением гидротермальной деятельности с привнесом в систему сидеро-халькофильной группы элементов. Однако следует обратить внимание и на корреляционную связь литофильных элементов, среди которых наиболее интересными являются V–Ba–Li–B, а также U и Th. Содержания U и Th в породах кодарской серии (в среднем, 8.9 и 16 г/т соответственно) значительно превышают таковые для стандарта NASC [Gromet et al., 1984] и положительно коррелируют с породообразующими литофильными элементами и РЗЭ во всем разрезе отложений.

Все сказанное выше подтверждает мнение Л. Б. Макарьева [1994] о том, что углеродистые породы удоканской серии являются одним из рудоносных уровней Урага-Холболоского рудного узла, с которым связаны Холболоское, Графитовое, Бортовое и другие благороднометалльные проявления. Поэтому становится актуальным обнаружение проявлений благороднометалльного и радиоактивного сырья, генетически связанных с углеродистыми образованиями Тонодского и Нечерского поднятий, а также Кодаро-Удоканской СФЗ [Гурская, 2000; Паршин и др., 2013]. Полученные данные позволяют рассматривать кевактинскую углеродисто-терригенную формацию в качестве источника рудных и сопутствующих компонентов и учитывать ее при оценке перспектив благородного, редкометалльного и радиоактивного оруденения в пределах Байкальской горной области и Кодаро-Удоканской СФЗ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-05-00172-а и гранта Президента РФ МК-3747.2015.5 с использованием научного оборудования Байкальского аналитического центра коллективного пользования СО РАН.

Литература

- Абрамов Б. Н. Особенности распределения благородных металлов в медистых песчаниках Кодаро-Удоканского рудного района // Литосфера. 2006. № 4. С. 168–174.
- Гурская Л. И. Платинометальное оруденение черносланцевого типа и критерии его прогнозирования. СПб: ВСЕГЕИ, 2000. 208 с.
- Макарьев Л. Б. Платинометальность докембрийских углеродистых формаций Северо-Восточного Забайкалья // В кн.: Платина России. М.: Геоинформмарк, 1994.
- Немеров В. К., Будяк А. Е., Развозжаева Э. А. и др. Новый взгляд на происхождение медистых песчаников месторождения Удокан // Известия (Геология, поиски и разведка рудных месторождений). 2009. № 2 (35). С. 4–17.
- Немеров В. К., Спиридонов А. М., Развозжаева Э. А. и др. Основные факторы онтогенеза месторождений благородных металлов сухоложского типа // Отечественная геология. 2005. № 3. С. 17–24.

Паришин А. В., Абрамова В. А., Мельников В. А. и др. Перспективы благородно- и редко-металльного оруденения нижнепротерозойских отложений на территории Байкальской горной области // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 3 (74). С. 53–59.

Терлеев А. А., Постников А. А., Кочнев Б. Б. и др. Раннепротерозойская биота из удоканской серии западной части Алданского щита (Россия) // В сб.: Эволюция биосферы и биоразнообразия. К 70-летию А. Ю. Розанова. М.: Т-во научных изданий КМК, 2006. С. 271–281.

Федоровский В. С. Стратиграфия нижнего протерозоя хребтов Кодар и Удокан. М.: Наука, 1972. 130 с.

Gromet L. P., Dymek R. F., Haskin L. A. et al. The «North American shale composite»: its compilation, major and trace element characteristics // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1984. Vol. 48. P. 2469–2482.

Petrov L. L., Kornakov Y. N., Korotaeva I. Ia. et al. Multi-element reference samples of black shale // *Geostandards and Geoanalytical Research*. 2004. Vol. 28. № 1. P. 89–102.