

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ Au–U МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТИПА “НЕСОГЛАСИЯ” (СЕВЕРНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

© 2017 г. А. Е. Будяк^{a*}, А. В. Паршин^{a, b}, А. М. Спиридонов^a, В. Н. Реутский^c, Б. Б. Дамдинов^d, М. Г. Волкова^a, Ю. И. Тарасова^a, В. А. Абрамова^e, Н. Н. Брюханова^a, О. В. Зарубина^a

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

^bИркутский государственный технический университет
Россия 664073, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

^cИнститут геологии и минералогии СО РАН
Россия 630090, г. Новосибирск, просп. Коптюга, 3

^dГеологический институт СО РАН
Россия 67004, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а

^eИнститут природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН
Россия 672014, г. Чита, ул. Недорезова, 16а

*E-mail: budyak@igc.irk.ru

Поступила в редакцию после доработки 16.07.2015 г.

Принята к печати 13.11.2015 г.

Проведены комплексные геохимические, минералогические, изотопные исследования пород и руд нижнепротерозойских черносланцевых отложений Кодаро-Удоканской структурно-формационной зоны, вмещающих золото-урановое месторождение Хадатканда. Результаты свидетельствуют о том, что урановое и золотое оруденение в основном являются одновременными и связаны с различными геодинамическими режимами. Золотое оруденение связано с заложением глубинного Сюльбанского разлома и имеет ювенильный источник. Более поздняя торий-урановая минерализация формировалась на этапе тектонического омоложения Сюльбанской зоны; источником радиоактивных элементов вероятнее всего служили нижележащие отложения кевактинской серии, имеющей распространение на всей территории Байкальской горной области (БГО). Полученные данные позволяют отнести золотоурановые месторождения исследуемой территории к типу “несогласия”, что дает основание считать их аналогом детально изученных Au–U месторождений Австралии и Канады. В связи с этим вероятность обнаружения месторождений Au и U на территории БГО значительно возрастает.

Ключевые слова: Байкальская горная область, рудные месторождения, золото, уран, катагенез, метаморфизм, метасоматические преобразования

DOI: 10.7868/S0016752517010046

ВВЕДЕНИЕ

Генезис U и Au–U месторождений, приуроченных к выходам нижнепротерозойских отложений южного обрамления Сибирской платформы – Тонодское и Нечерское поднятия и Кодаро-Удоканская структурно-формационная зона (СФЗ), с которыми в настоящее время связаны определенные перспективы исследователей на обнаружение новых объектов благородного и радиоактивного сырья, по-прежнему является остро дискуссионным. Вопрос об источнике полезного компонента имеет прикладное значение, так как вероятность более точной постановки поисково-разведочных работ напрямую зависит от понимания процессов

формирования рудной минерализации и ее концентрирования до промышленных объектов.

В настоящее время существует две основных концепции возникновения урановых и золото-урановых месторождений: эндогенного типа (Мигута, Модников, 1999; Гребенкин, 2013) и месторождения типа “несогласия”, источником полезного компонента в которых является катагенный флюид, заимствованный из нижележащих осадочных толщ (Андреева, 2012, Паршин и др., 2013).

В предлагаемой работе максимальное внимание уделено Верхнесюльбанской рудной зоне, территориально принадлежащей к Чарскому району Забайкальского края с детальным изучением Au–U месторождения Хадатканда. Выбор объек-

та продиктован его приуроченностью к нижнепротерозойским отложениям Удоканского комплекса и предположительно формированием рудной минерализации месторождения в геологических условиях, соответствующих месторождениям типа “неогласия”.

Несмотря на активное освоение этой территории в XX веке, изученность ее довольно фрагментарна, а применяемые аналитические методы не соответствуют современному уровню. С целью более детального сопоставления металлогении Тонодского и Нечерского поднятий с отложениями Кодаро-Удоканской СФЗ изучались наименее измененные отложения кодарской и чинейской серий в районе реки Нижний Ингамакит, а также породы и руды месторождения Хадатканда. Определялись вероятные источники рудного вещества, и геодинамические условия, способствовавшие концентрированию благородных и радиоактивных металлов в пределах Кодаро-Удоканской СФЗ.

Методология настоящих исследований базируется на достаточно обоснованных на сегодняшний день представлениях о том, что многие металлы (прежде всего органофильные и сидерофильные U, Mo, V, а также Ni, Zn, Au, Ag, ЭПГ и др.) способны концентрироваться в органическом веществе черносланцевых осадочных формаций еще на этапе седиментации, образуя комплексы ионов металлов с серо-, азот-, фосфор- и кислородсодержащими функциональными группами (Варшалл и др., 1994, Драйвер, 1985). В процессах постседиментационных преобразований металлоносных осадков в ходе диагенеза, катагенетических, метаморфогенно-метасоматических и гидротермальных процессов, металлоносное ОВ, мигрируя, окисляется, карбонизируется, в результате чего теряет связь с металлами, которые могут концентрироваться в благоприятных физико-химических обстановках (Андреева, 2012, Будяк и Брюханова, 2012, Cuneu et al., 2003).

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время существует мнение, что обстановки накопления осадочных толщ обрамления Сибирской платформы в пределах Тонодского, Нечерского поднятий и Кодаро-Удоканской структурно-формационной зоны (рис. 1) сопоставимы с детально изученными условиями формирования золото-урановых руд Северной Австралии и Канады (Немеров и Станевич, 2001). В строении перечисленных выше крупных выходов палеопротерозойских отложений, представляющих собой антиклинальные структуры, главным образом принимают участие докембрийские образования, имеющие трехъярусное строение: архей-палеопротерозойский, палеопротерозойский и неопротерозойский ярусы соответственно.

Также, как на территории Северной Австралии и Канады, в пределах Тонодского и Нечерского поднятий и Кодаро-Удоканской структурно-формационной зоны наиболее продуктивным является средний ярус, в составе которого имеется несколько углеродистых толщ палеопротерозойского возраста, по сути являющихся единой углеродисто-терригенной формацией кевактинской серии, возникшей, вероятнее всего, в условиях эпикратонного рифтогенного морского бассейна (Федоровский, 1972) (рис. 1).

Эти отложения в разрезе Тонодского поднятия представлены албазинской и михайловской свитами, на Нечерском – ходоканской свитой, а в пределах Кодаро-Удоканской структурно-формационной зоны – отложениями кодарской серии (икабийская, аянская и иннырская свиты) и относятся нами к кевактинской серии (Паршин и др., 2013), сложенной довольно однородными рассланцованными, иногда гнейсовидными метапесчаниками и темно-серыми до черных углеродисто-слюдисто-кварцевыми сланцами. Эти отложения выделяются характерной геохимической специализацией – ЭПГ, Au, Ag, U, Th, а также Zn, Pb, Co, Ni, Cu.

В пределах Тонодского и Нечерского поднятий данные толщи характеризуются высоким содержанием в сланцах глинозема (в среднем 19 мас. % Al_2O_3 с максимумами до 27 мас. %) и K_2O (4–6 мас. %). Накопление отложений подобной специализации можно объяснить активным выветриванием исходных пород под влиянием жаркого, гумидного климата. Эти отложения обогащены рассеянным углеродистым веществом, что вероятно свидетельствует о бурном развитии бактериального бентоса в бассейне осадконакопления с застойным режимом (Терлеев и др., 2006). Концентрации $C_{орг}$ варьируют в пределах от 0.5 до 10 мас. %.

Степень метаморфизма данных отложений не превышала зеленосланцевой фации. Породы претерпели различные изменения под влиянием интрузивного магматизма позднепалеозойского времени (от габбро до гранитов) ингамакитского комплекса. Перекрываются палеопротерозойские отложения среднего яруса несогласно залегающими высокоглиноземистыми песчано-сланцевыми осадками неопротерозоя. В пограничной части палео- и неопротерозойских отложений установлено большое количество золото- и урановородных объектов, наиболее известными из которых являются Чертово Корыто, Туюкан, Чепок, Хадоканская группа месторождений, а также месторождения Кодаро-Удоканской СФЗ Мраморное, Хадатканда и многие другие.

Месторождения, перечисленные выше, как и их менее известные сателлиты, в пределах изучаемой территории являются однотипными по ряду

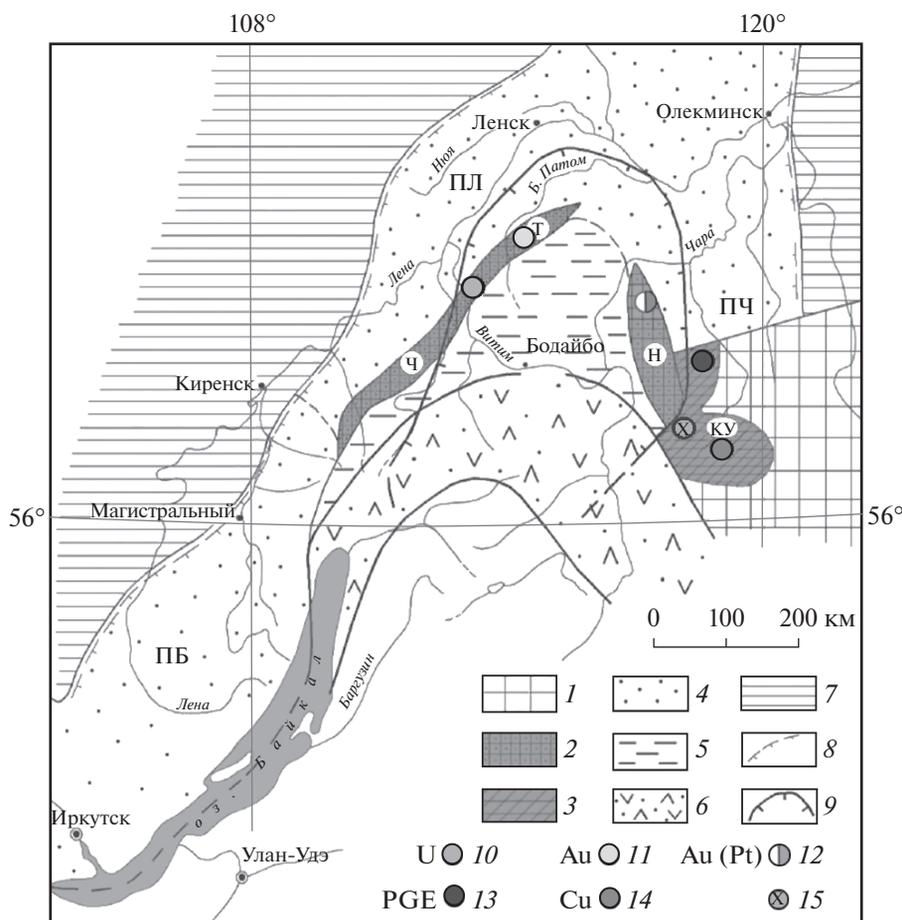


Рис. 1. Схема структурно-формационного районирования Байкальской горной области (БГО) (по материалам (Немеров, Станевич, 2001) с добавлениями): 1 – дорифейские образования фундамента Сибирской платформы; 2 – выступы дорифейского фундамента в БГО; С-Б – Северо-Байкальский вулканно-плутонический пояс, Ч – Чуйский, Т – Тонодский, Н – Нечерский; 3 – Кодаро-Удоканская структурно-формационная зона; 4–6 – рифейские структурно-формационные зоны: 4 – внешняя – Приленская (ПЛ), Причарская (ПЧ); внутренние 5 – Мамско-Болайбинская, 6 – Байкало-Муйская; 7 – фанерозойские отложения чехла Сибирской платформы; 8 – северная граница накопления рифейских образований; 9 – границы Ленского золотоносного района; месторождения: 10 – U, 11 – Au, 12 – Au (Pt), 13 – PGE, 14 – Cu, 15 – Au-U месторождение Хадатканда.

геологических признаков и практически аналогичны по геохимическим и минералогическим критериям. Главным из них, безусловно, являются пространственная приуроченность к углеродистым отложениям кевактинской серии, где сами рудопоявления расположены в пределах зоны несогласия неопротерозойского времени, а также контроль рудных тел зонами разрывных нарушений северо-западного и северо-восточного простирания, макро- и микротрещиноватостью, по которым развиты зоны катаклаза и проявлена гидротермально-метасоматическая деятельность. Отмечается однотипный минеральный состав руд, представленный настураном, уранитом, коффинитом в ассоциации с сульфидами: пирит, пирротин, халькопирит, молибденит, галенит и сфалерит.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ ХАДАТКАНДА

Месторождение Хадатканда локализовано на пересечении двух глубинных разломов – Сюльбанского и Хадаткандского, расположенных на юго-западной периферии Верхнесюльбанского магматического узла (рис. 2), в составе которого выделяется крупный массив габбро-норитов рудопродуктивного чинейского комплекса палеопротерозоя и многофазные позднепалеозойские интрузии. Рудные тела приурочены к зоне максимальной проработки терригенно-карбонатных отложений чинейской серии (александровская и бутунская свиты), залегающих согласно на отложениях кодарской серии, которые повсеместно прорваным дайками габброидов. Рудный процесс проявлен в виде полистадийной флюидной

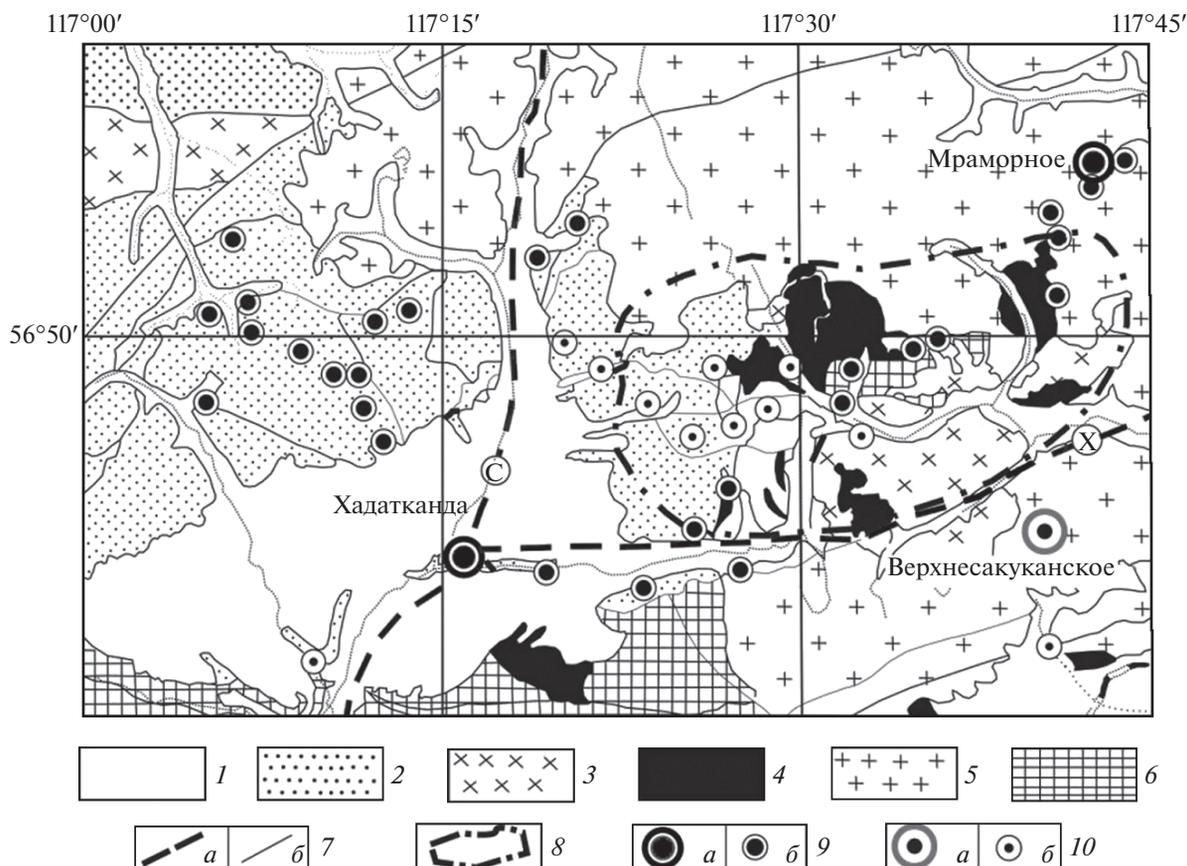


Рис. 2. Схематическая геологическая карта Верхнесурьбанского магматического поля (Макарьев и др., 2009). 1 – четвертичные отложения нерасчлененные; 2 – палеопротерозойские карбонатно-терригенные отложения удоканского комплекса; 3 – позднепалеозойский ингамакитский комплекс монзонит-гранитовый; 4 – палеопротерозойский чинейский комплекс габбро-норитовый; 5 – палеопротерозойский кодарский комплекс рапакиви-гранитовый; 6 – архейско-палеопротерозойские гранитоидно-метаморфические образования нерасчлененные; 7 – разломы главные (а) и второстепенные (б), в том числе: С – Сурьбанский, Х – Хадаткандский; 8 – аномалия магнитного поля; 9 – урановые месторождения (а) и проявления (б); 10 – золоторудные месторождения (а) и проявления (б).

проработки отложений, их преобразовании до субщелочных железо-магнезиально-кальциевых и щелочных метасоматитов, а на участках пересечения глубинных разломов, где максимально проявлены катаклаз и дробление, устанавливается появление сульфидной минерализации (Макарьев, 2010).

Вскрытые на поверхности золото-урановые рудные тела месторождения образуют зону меридиональной ориентировки протяженностью около 3.5 км, со средним содержанием урана от 0.1 до 0.72% (Макарьев, 2009). Золото распространено весьма неравномерно, с разбросом значений от 0.006 до 2.1 г/т; по данным Макарьева (2009) содержания могут достигать ураганных значений до 300 г/т.

МИНЕРАЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

В пределах месторождения Хадатканда, а также на удалении от него были опробованы отложения

кодарской и чинейской серий. Перечисленные отложения имеют близкий минеральный состав и представлены осадочными породами (алевролиты, алевропелиты) с содержанием органического вещества до 10 мас. % (Немеров и др., 2009).

Отложения кодарской серии, представлены преимущественно слюдисто-кварцевыми метапесчаниками, сланцеватой текстуры. Обломки алевропсаммитовой размерности представлены кварцем (60–80%), единичными зернами плагиоклаза, микроклина. Бiotит, мусковит и хлорит (15–40%) чаще образуют тонкие прерывистые полосы, формирующие сланцеватость, реже присутствуют в виде отдельных чешуек рассеянных среди кварцевой массы. Акцессорные минералы представлены апатитом, гранатом, эпидотом. В разрезе серии выделяются икабийская, аянская и инырская свиты. Икабийская свита сложена метапесчаниками и метаалевролитами темно-серой до черной окраски с тонкораспыленным углеродистым веществом и сульфидной минерализацией. Мощностью до 1000 м. Аянская представлена

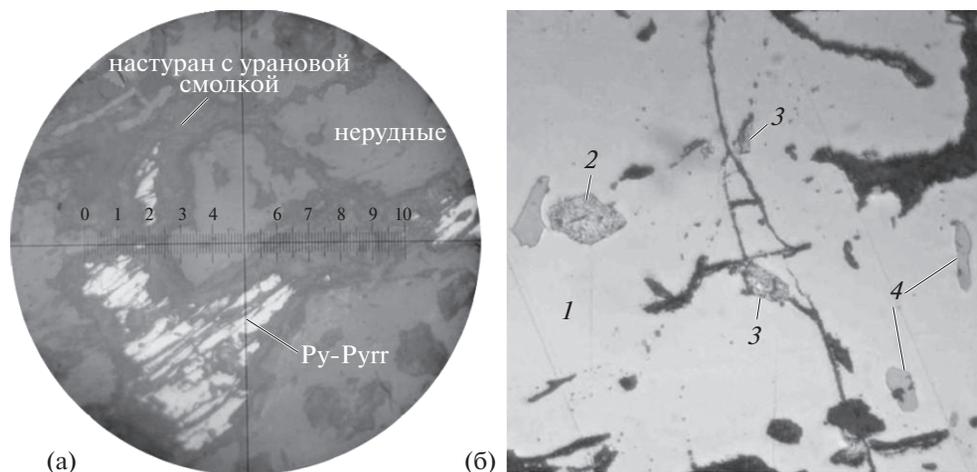


Рис. 3. а – Пирит с периферии и по параллельным трещинам замещается сложными агрегатами минералов урана. Микроскоп. Николи II. Поле зрения рисунка – 0.54 мм; б – в пирите (1) наблюдается тонкое золото: кристаллоподобное (ромбической формы) (2) и слабо вытянутое с прямыми ограничениями (3). Кроме того, присутствуют тонкие выделения халькопирита (4). Микроскоп. Николи II. Поле зрения рисунка 0.2 мм.

тонким ритмичным переслаиванием темно-серых алевролитов, песчаников и черных филлитовидных сланцев, мощностью 500–1000 м. Характерно присутствие текстур взмучивания и подводных оползней. В составе иннырской свиты преобладают серые, лилово-серые, иногда черные песчаники. Мощность 120–600 м.

Породы чинейской серии залегают согласно на кодарских отложениях. Расчленены они на читкандинскую, александровскую и бутунскую свиты. Читкандинская свита сложена зеленоватыми известковистыми, слюдястыми и светло-серыми до белых кварцитовидными метапесчаниками с вкраплениями рудных минералов. Мощность от 300 до 1000–1500 м. Главными породами александровской свиты являются лилово-серые и серые тонкозернистые метапесчаники, обладающие повышенной известковистостью с выдержанным горизонтом кварцитов в кровле. Среди кварцитов и песчаников отмечаются стратифицированные слои и линзы мощностью до 1–2 м, обогащенные углеродистым веществом. Мощность свиты 160–220 м. Бутунская свита отличается наличием мраморизованных известняков и альбитсодержащих пород. Мощность более 220 м. В александровской и бутунской свитах также отмечаются горизонты с содержанием $C_{орг}$ не превышающим 0.8 мас. %.

Рудная минерализация углеродистых отложений кодарской и чинейской серий представлена пиритом, халькопиритом, пирротинном, молибденитом, сульфидом никеля, с характерным повышенным содержанием Co, V, Ag, U, Pt, As. В единичных пробах содержания элементов платиновой группы (ЭПГ) достигают Pt – 0.027, Pd – 0.044 г/т.

В пределах месторождения рудовмещающими являются породы чинейской серии, прорванные

телами габбро, вебстеритов, плагиовебстеритов, плагиооклинопироксенитов, плагиоверлитов, которые в условиях метасоматоза, преобразованы в щелочные и субщелочные железо-магнезиально-кальциевые метасоматиты. Серицитизация и карбонатизация в породах носит наложенный характер. Породы сильно брекчированы, смяты, пронизаны тонкими прожилками. Урановая минерализация обнаружена в слабо метасоматически измененных амфиболовых клинопироксенитах, амфиболовых габбро и эпидот-цоизит-карбонат-хлоритовых метасоматитах по породам чинейской серии.

В пределах месторождения рудная минерализация представлена, в основном, пирротинном, оксидами урана (уранинитом, настураном, урановой чернью), титанатами (сфеном, иттрокразитом?) (рис. 3а). Кроме того, в породе наблюдаются скопления тонковкрапленных пирита, пирротина, халькопирита с редкими знаками молибденита, висмутотеллуридов, галенита, алтаита и самородного свинца.

Выделения пирротина представлены единичными вкрапленниками и мелкозернистыми агрегатами размером не более 1 мм. В редких случаях в пирротине отмечаются реликты более раннего пирита. По трещинам и по периферии выделения пирротина интенсивно замещаются пиритом, по которому развиваются тонкие каемки пиритамарказита с корочками более позднего тонкозернистого пирита. В сростании с пирротинном и в виде единичных прожилковидных выделений в нем отмечен халькопирит, самостоятельные выделения которого наблюдаются в виде вкрапленности в нерудных породах.

В U-рудных телах кроме структур замещения пирротина, пирит присутствует в виде рассеян-

ной тонкой вкрапленности и крупных агрегатов, представленных единичными идиоморфными зернами, иногда, со скелетными ответвлениями по тонким трещинам в метасоматитах. В пирите, также как и в пирротине, халькопирит выполняет тонкие трещинки, интерстиции, разъедает и корродирует пирит. В ассоциации с халькопиритом и в непосредственной близости от него отмечаются включения золота (рис. 3б). Скорее всего, появление золота по времени связано с процессами выделения халькопирита. Размеры видимого золота колеблются от 5 до 40 мкм, с пробностью около 780.

Тесные сростания пирита-пирротина осложняются развитием более поздней урановой минерализации, представленной сетью параллельных тонких прожилков оксидов урана (рис. 3а). Урановая минерализация имеет явно наложенный характер. Оксиды урана (уранинит, настуран) часто развиваются по трещинам и периферии пирит-пирротинных агрегатов, а также в нерудных. Размеры единичных агрегатов менее 0.5 мм, мощность прожилков менее 0.2–0.5 мм. Они представляют собой прожилковидные агрегаты колломорфной, зональной структуры, серые в центральной части с черными каемками до сплошных черных масс.

Пирит-пирротинные взаимоотношения регулируются отношением S/Fe в минералообразующей системе. Согласно диаграммам фазовых равновесий $\lg f - T^{\circ}\text{C}$, изменения отношения S/Fe связано с рядом параметров системы (f_S , f_{O_2} , T , P и др.) (Колмаков и др., 2010). Таким образом, установленные в рудах месторождения Хадатканда пирит-пирротинные взаимоотношения свидетельствуют, о том, что процесс минералообразования шел при последовательном снижении температуры и увеличении фугитивности S. Кроме того появление марказита указывает на снижение pH среды.

Полученные результаты согласуются и с петрографическими данными. Так минеральные взаимоотношения свидетельствуют о том, что процесс карбонатизации с урановой минерализацией, является процессом постзолоторудным. В золотоносных породах проявлены метасоматические изменения березитового характера (до 300°C) с образованием серицит + кварц + пирит + карбонатной (анкерит) ассоциации. В образцах с рудным содержанием урана наблюдаются метасоматические изменения с образованием средне, низкотемпературного (~200°C) пропилитового парагенезиса (эпидот + хлорит + альбит + кальцит). Как известно, пропилитизация происходит под воздействием растворов повышенной кислотности, что согласуется с классическим представлением о подвижности урана в кислой среде при температуре, не превышающей 200°C (Гончаренко, 1993). Средняя температура гидротермальных

растворов, образующих настурановые жильные месторождения, составляет 150°C и в целом не выходит за пределы 200°C.

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОТЛОЖЕНИЙ КОДАРСКОЙ И ЧИНЕЙСКОЙ СЕРИЙ

Для более обоснованного утверждения ведущей роли нижних стратиграфических горизонтов (кодарская и чинейская серии) в процессе формирования месторождений Кодаро-Удоканской СФЗ, было произведено детальное изучение распределения петрогенных, редких и редкоземельных элементов в обозначенных толщах (рис. 4–6). Исследования проводились рядом аналитических методов на базе ИГХ СО РАН (петрогенные элементы – РФА, редкие и REE – ICP-MS, Au, Ag, ЭПГ – атомно-абсорбционный). Установлено, что отложения кодарской серии (икабийская, аянская и иннырская свиты) и читкандинской свиты чинейской серии (рис. 4), которые имеют резкое отличие практически по всем основным показателям от александровской свиты, представляющей верхний стратиграфический уровень чинейской серии. Наиболее характерным является увеличение содержания Fe_2O_3 , MnO, Na_2O и P_2O_5 от пород икабийской к породам читкандинской свиты, что характерно для гидротермальной деятельности, характеризующейся щелочным (преимущественно натровым) метасоматозом с сопряженным формированием субщелочных метасоматитов хлоритового, слюдисто-карбонатного состава. Время формирования александровской свиты, по всей видимости, характеризуется изменением геодинамического режима и прекращением гидротермальной деятельности синхронной осадконакоплению.

По распределению редких элементов, отложения кодарской серии, относительно стандарта черных сланцев Байкальской горной области (SCHS-1) (Petrov et al., 2004) отличаются повышенными содержаниями Sn, Mo, Ag, Sr (рис. 5). Обращает внимание резкое отличие геохимических параметров черносланцевых отложений нижних стратиграфических горизонтов от пород вышележащей александровской свиты, особенно четко проявленное в распределении концентраций Mo, Zn, Pb, Ag и Sr, характерных для гидротермального флюида на начальных этапах развития рифтогенеза, что подтверждает геодинамические построения В.С. Федоровского (Федоровский, 1972).

Характерным является значительное повышение концентраций благородных металлов в пределах исследуемой толщи, вероятно обусловленное как унаследованностью химизма архейского фундамента, так и рифтогенного магматизма основного состава (таблица).

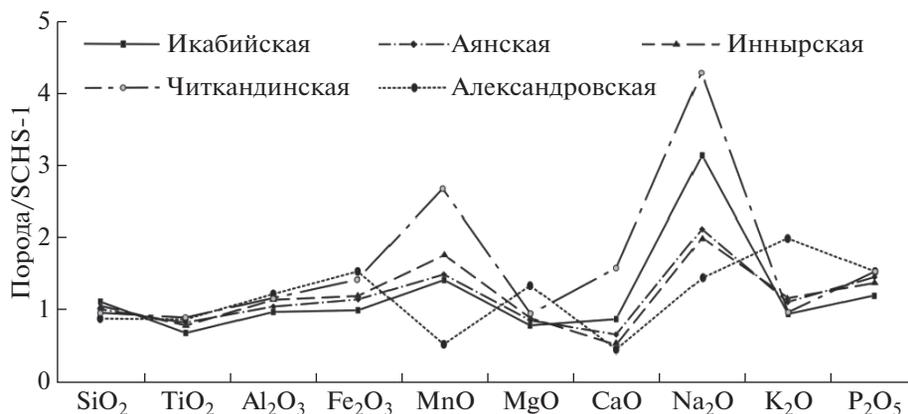


Рис. 4. Распределение петрогенных элементов в породах кодарской и читкандинской серий: икабийской (17), аянской (15), иннырской (17) читкандинской (19) и александровской (19) свит, нормированных по стандартному образцу черных сланцев SCHS-1 (Petrov et al., 2004). Здесь и на рис. 5, 6 в скобках указано количество проб.

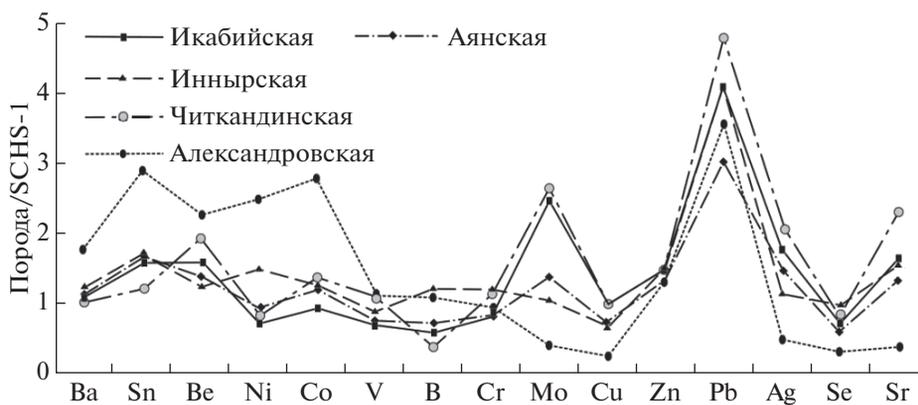


Рис. 5. Распределение редких элементов в породах кодарской и читкандинской: икабийской (17), аянской (15), иннырской (17) читкандинской (19) и александровской (19) свит, нормированных по стандартному образцу черных сланцев SCHS-1 (Petrov et al., 2004).



Рис. 6. Спектры распределения REE. а – в породах кодарской и читкандинской подсерий; свиты: икабийская (17), аянская (15), иннырская (17) читкандинская (19), александровская (19); граниты Сакуканского комплекса (7); б – в породах и рудах месторождения Хадатканда; U – метасоматиты с рудными содержаниями урана (21); Au – метасоматиты с рудными содержаниями золота (25); БР – безрудные метасоматиты чинейской серии: александровская и бутунская свиты (73); ЧС – черносланцевые отложения кодарской серии (24). Для нормирования использован состав хондрита по (Wakita et al., 1971).

Содержание благородных металлов кодарской и чинейской серий Кодаро-Удоканской СФЗ (г/т)

Элемент	Кодарская серия свиты			Чинейская серия свиты	
	икабийская (17)	аянская (15)	иннырская (17)	читкандинская(19)	александровская(19)
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

Примечание. В скобках обозначено количество проб.

Корреляционный анализ не выявил какой-либо закономерности, свидетельствующей об источнике рудного компонента. Однако, от нижних стратиграфических горизонтов к верхним основная группа элементов, характерных для черносланцевых формаций (V, Mo, Cu, Zn), тесно коррелирует с благородными металлами и группой халькофильных элементов.

При этом повышенные (относительно местного фона) содержания, зафиксированные в отложениях икабийской и аянской свит, заметны для ограниченного ряда компонентов – Sr, Mo, Cu, Ag, Au, Pt, Pd (рис. 5), что указывает на возможное “заражение” толщи уже на стадии седиментации. Важно отметить максимальные содержания платиноидов (Pt, Pd) в икабийской и аянской, а Au и Ag – в иннырской и читкандинской свитах (таблица). 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 и поступления в бассейн осадконакопления продуктов размыва кор выветривания. Расположенные стратиграфически выше, иннырская и читкандинская свиты значительно 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 и привносом в систему сидеро-халькофильной группы элементов. Однако, также присутствует корреляционная связь литофильных элементов, среди которых V–Ba–Li–B, а также U и Th.

Содержание U и Th в целом для пород кодарской серии значительно превышают таковые для стандарта NASC (Gromet et al., 1984), достигая средних значений (8.9 и 16 г/т соответственно), и положительно коррелируют с породообразующими литофилами и особенно с REE по всему разрезу отложений кодарской и чинейской серий.

Отдельно были изучены геохимические особенности пород и руд Au–U месторождения Хадатканда. Все пробы были разделены на 4 группы: БР – безрудные наименее измененные породы чинейской серии в пределах рудного поля

(<0.3 г/т Au; <400 г/т U); ЧС – нерасчлененные черносланцевые отложения кодарской серии на незначительном удалении от рудной зоны месторождения (верхнее течение р. Сюльбан); руда-Au – породы чинейской серии с повышенными содержаниями золота (≥ 0.3 г/т); руда-U – породы чинейской серии с повышенными содержаниями U (≥ 400 г/т).

Анализ полученных результатов свидетельствует о геохимической специализации черносланцевых отложений кодарской серии, находящихся в ближайшем обрамлении месторождения, на благородные (Au, Pt, Pd) и радиоактивные (U, Th) металлы. Отмечается значительное превышение в породах кодарской серии относительно стандарта NASC таких характерных для черносланцевых отложений элементов, как V, Sr и особенно Mo, что характерно и для метасоматитов по породам чинейской серии в пределах месторождения. Отличие заключается в увеличении, содержания сидерофильной группы (Mn, Co, Ni), а также Y, что объясняется наложенными метасоматическими процессами.

Результаты анализа метасоматически измененных пород, отобранных в пределах месторождения, показали, что содержания Au и U геохимически не связаны. Корреляционный анализ, который проводился по выборке из 34 проб рудной зоны, показал, что КК между Au и U, в пробах с рудными содержаниями Au колеблется в пределах $-0.2 \dots +0.2$, а в пробах с рудными содержаниями U $-0.3 \dots -0.37$. Из распределения элементов в рудных пробах видно, что основным характерным признаком проб с повышенным содержанием золота (>0.3 г/т) является увеличение концентраций, кроме соответственно Au и Ag, еще и Sn. В образцах с рудными содержаниями U (>400 г/т) наблюдается резкий рост содержания Y, Mo, Pb и Pd. Хотелось бы отметить, что корреляционная связь Mo и Pd в черных сланцах кодарской серии, безрудных метасоматитах чинейской серии и пробах с содержанием золота ≥ 0.3 г/т отсутствует, однако в пробах с содержанием урана от 400 до 18000 г/т корреляция достигает 0.9, что свидетельствует об их генетическом родстве.

В отложениях кодарской и чинейской серий как на удалении, так и непосредственно в преде-

лах месторождения Хадатканда сумма REE составляет от 170 до 190 г/т независимо от стратиграфического положения. Eu/Eu^* возрастает от 0.56 в нижних горизонтах (икабийская, аянская свиты) до 0.73 в осадках читкандинской свиты (рис. 6а), что может быть обусловлено усилением синхронного осадконакопления рифтогенного вулканизма основного состава. Значение $Ce/Ce^* \sim 1$ во всех изученных образцах, говорит об удаленности формирования исследуемого материала от зоны спрединга. Такие значения характеризуют окраинно-континентальные либо морские эпиплатформенные обстановки осадконакопления. Колебания отношения La/Yb незначительно уменьшаются от икабийской (15.8) к иннырской и читкандинской свитам (~ 13.5), чему вероятно способствовало незначительное увеличение карбонатного материала (доломит) ввиду регрессии океана в это время, приведшее к более активной сорбции тяжелых REE. В целом такие незначительные изменения отношений LREE/HREE без изменения других характеристик, вряд ли могли быть продиктованы изменениями геодинамической обстановки в регионе, приведшим к изменению источника сноса.

Кривая распределения REE в палеозойских гранитах Сауканского комплекса стандартна для гранитов поздних фаз, с глубоким европейским минимумом и равноплечим распределением HREE и LREE. Можно утверждать, что предположение о влиянии флюидов, связанных с интрузивными образованиями комплекса, на формирование геохимической специализации терригенных образований не имеет геохимического подтверждения. Ввиду чего интересным выглядит спектр распределения REE в пределах месторождения. Как видно из рисунка 6б, распределение REE отложений кодарской серии и наименее метасоматически измененных отложений чинейской серии, абсолютно повторяет таковое для всех неизмененных пород кодарской и чинейской серий, находящихся на удалении от месторождения.

Характерным в пределах месторождения является резкое увеличение содержания Σ REE до 350–370 г/т, в пробах с рудным содержанием U, относительно безрудных метасоматитов в пределах месторождения, и черносланцевых толщ кодарской серии в пределах рудного поля (соответственно 175 и 190 г/т). На фоне такого значительного изменения для проб с повышенным содержанием радиоактивных элементов наблюдается однозначный тренд снижения концентраций REE в образцах с рудным содержанием Au (рис. 6б). Из графика видно, что, несмотря на снижение концентраций лантаноидов в пробах с повышенным содержанием Au, рисунок их распределения практически повторяет таковой для наименее измененных пород, из чего следует, что флюид, принесший “золотую” минерализацию в рудную зону месторож-

дения, практически не имел редкоземельной нагрузки. И, напротив, в пробах с повышенными содержаниями U и Th, наблюдается изменение распределения REE с характерным глубоким минимумом Eu/Eu^* . Максимальные содержания REE (до 800 г/т), наблюдались в пробах с ураганными содержаниями U (до 18000 г/т).

Обращает на себя внимание полное совпадение распределения REE неизмененных черносланцевых пород кодарской серии (ЧС) в пределах месторождения и наименее измененных метасоматитов александровской и бутунской свит (БР) месторождения Хадатканда (рис. 6б) с отложениями этого же стратиграфического яруса, отобранными на значительном удалении от месторождения (рис. 6а), в пределах р. Ниж. Ингамакит. Несмотря на некоторую схожесть рисунков распределения, которую показали пробы с рудным содержанием урана (рис. 6б) и гранитоиды сауканского комплекса (рис. 6а), необходимо указать, что Σ REE в гранитоидах не достигает 90 г/т, и соответствующие интрузивы вряд ли могли быть источником рудного флюида при формировании месторождения с повышенными содержаниями REE. Вместе с тем, нельзя отрицать участие гранитоидов как источника энергии, при перераспределении флюидной составляющей отложений кодарской серии.

Из распределений значений аддитивного железомарганцевого ($Fe_2O_3 + FeO + MnO/TiO_2$) и мультипликативного эксгалационного (MnO^*Zn^*Pb/TiO_2) модулей (соответственно ЖМ и ЭМ), приведенных на рис. 7, хорошо видно, что отложения кодарской серии имеют повышенные значения ЭМ. Это указывает на наличие эксгалативной составляющей и соответствует отложениям, сформированным в условиях седиментации, сопровождавшейся синхронной гидротермальной деятельностью. Александровская и бутунская свиты, принадлежащие к верхнему стратиграфическому ярусу и относящиеся к чинейской серии, напротив показывают резкое снижение данного показателя, что говорит об изменившихся геодинамических условиях седиментации в это время. Значения ЭМ для отложений читкандинской свиты, превышающие 1600, свидетельствуют о гидротермальном рудном процессе. ЖМ для тех же отложений не выявил высокотемпературной эндогенной составляющей на стадии осадконакопления. Незначительное повышение этого показателя в отложениях чинейской серии, с разбросом значений в отдельных пробах в зону характеризующую процесс рудообразования, связанный с глубинным флюидом, говорит о некотором поступлении в бассейн седиментации “высокотемпературных” элементов сидерофильной группы, что вероятнее произошло в результате размыва габброидов чинейского комплекса, имеющего явную сидерофильную специализацию

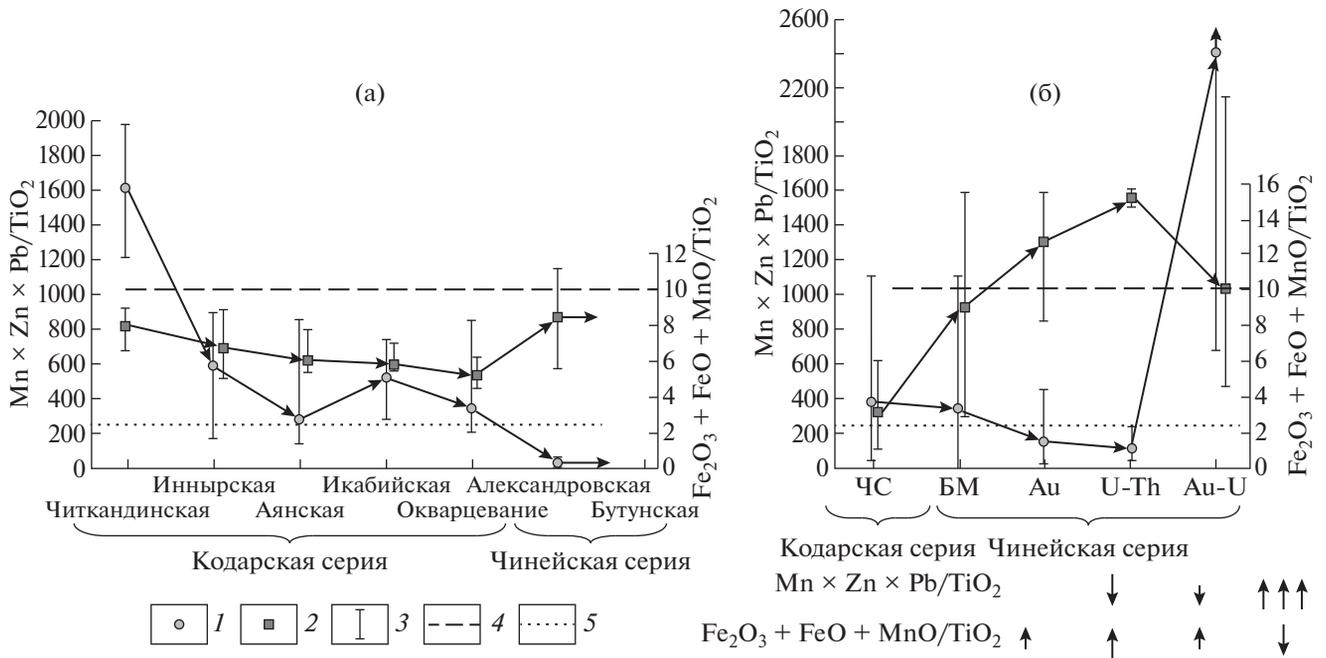


Рис. 7. Распределение железо-марганцевого ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MnO}/\text{TiO}_2$) и эксгальтивного ($\text{Mn} \times \text{Zn} \times \text{Pb}/\text{TiO}_2$) модулей в углеродистых сланцах кодарской и метасоматически измененных отложениях чинейской серий в разрезе по р. Ниж. Ингамакит (а) и на месторождении Хадатканда (б). 1 – среднее значение эксгальтивного модуля, 2 – среднее значение железо-марганцевого модуля, 3 – разброс значений, 4–5 нижняя граница влияния гидротермального флюида: 4 – по эксгальтивному, 5 – по железо-марганцевому показателям.

(Гонгальский, 2010). Соответственно, обнаруженная геохимическая специализация данной формации может быть следствием некоторой унаследованности химизма зеленокаменных поясов, служивших фундаментом для рифтогенного прогиба, а также синхронного вулканизма основного состава, проявленного преимущественно на ранних этапах рифтогенеза и способствовавшего формированию металлогенической специализации отложений чинейской серии.

На графике (рис. 7б) приведены те же отношения, но уже для проб, отобранных на самом месторождении, либо в непосредственной близости от него. Выборка для этого графика отличается от рис. 6, тем, что в отдельную категорию выделены пробы с аббревиатурой Au–U. Это 3 пробы, в которых кроме рудных содержаний золота, также наблюдается повышенное содержание урана (до 400 г/т).

Из графика видно, что значения как эксгальтивного, так и железо-марганцевого модулей для нерасчлененных черносланцевых отложений кодарской серии находятся в тех же пределах, что и для кодарских отложений в районе реки Ниж. Ингамакит. Метасоматически измененные отложения чинейской серии в рудной зоне месторождения, не проявляя каких-либо изменений по показателям ЭМ, демонстрируют незначительное увеличение до 9.2 по показателю ЖМ, а отдель-

ные пробы даже до 16. Это, несомненно, указывает на рудную проработку эндогенным флюидом пород, несмотря на отсутствие в них рудного золота.

Далее рассмотрим пробы с рудными содержаниями Au или U. В пробах с повышенным содержанием Au ЭМ имеет тенденцию к значительному снижению, ЖМ же показатель напротив резко увеличивается с разбросом значений от 8 до 16 (среднее 13.4). Это безусловно говорит о том, что поступление золота связано с глубинным флюидом сидерофильной специализации. “Низкотемпературные” халькофильные элементы (Zn, Pb) в этом процессе не участвуют. Группа проб с золото-урановой нагрузкой демонстрирует практически полное совпадение с золоторудными пробами, с незначительными вариациями, ввиду чего может сложиться впечатление о едином рудном процессе. Однако на более поздней стадии рудогенеза с привнесом в систему радиоактивных и редкоземельных элементов картина кардинально меняется. Пробы с рудным содержанием U и Th демонстрируют кардинальные изменения поведения рассматриваемых отношений. Среднее значение ЭМ, представленного средне-низкотемпературными элементами, увеличивается до 2400, с единичными пробами превышающими 3000–3500, ЖМ же показатель заметно снижается с 13.4 до 10.1.

Безусловно, изучение геохимических показателей, приведенных в работе, подтверждает поли-

генное и полихронное формирование Au–U оруденения месторождения Хадатканда. Вероятнее всего, сидерофильное золото связано с заложением глубинного Сюльбанского разлома и соответственно имеет ювенильный источник. В отличие от золота, урановая минерализация формировалась в результате реактивации сюльбанской зоны при внедрении позднепалеозойских гранитоидов Сакуканского комплекса. Увеличение ЭМ, вероятнее всего, связано с перераспределением вещества нижежащих отложений кодарской и низов чинейской серий, имеющих халькофильную геохимическую специализацию.

Полученные выводы полностью согласуются с минералого-петрографическими данными по вещественному составу руд месторождения, которые также позволяют сделать вывод о полигенности и полихронности уранового и золотого оруденения в пределах месторождения. В результате проведенных исследований было определено, что на месторождении имели место как минимум две стадии, которые были связаны с различными тектоническими и соответственно метасоматическими процессами. Установлено, что по крайней мере часть золота отлагалась на ранней стадии рудного процесса и имела глубинный источник. Об этом кроме более высокотемпературной стадии березитов относительно наложенной пропилитизации, свидетельствует ассоциация Au с никелистым пирит-пирротинном (Паршин и др., 2013), замещаемым более поздним пиритом, который, в свою очередь, корродируется агрегатами оксидов урана (уранинит, коффинит, настуран).

Перечисленные геохимические и минералогические особенности нашли подтверждение и при исследовании изотопных характеристик серы исследуемых отложений. Так, для метасоматически измененных пород с повышенными содержаниями Au значения $\delta^{34}\text{S}$ составили +2...+4‰ CDT, что на 4‰ легче состава серы в пробах с рудными содержаниями U (+6...+8‰ CDT). Можно предполагать, что формирование золотой минерализации связано с заложением глубинного Сюльбанского разлома и разгрузкой преимущественно глубинных флюидов. Повышенные значения $\delta^{34}\text{S}$ в образцах с урановой минерализацией могут являться свидетельством заимствования тяжелого изотопа серы из вмещающих пород кодарской и низов чинейской серий при фильтрации сквозь них рудных растворов на стадии заложения Хадаткандского разлома, оперяющего главный Сюльбанский разлом.

ВЫВОДЫ

1) В пределах Байкальской горной области (Тонодское и Нечерское поднятия) и Кодаро-Удоканской структурно-фармационной зоны вы-

деляются несколько углеродистых толщ палеопротерозойского возраста (кевактинская серия), по сути, являющихся единой углеродистотерригенной формацией, возникшей в условиях эпикратонного рифтогенного морского бассейна. Рудная специализация отложений кевактинской серии вероятно обусловлена как унаследованностью химизма древних зеленокаменных поясов, являющихся фундаментом для заложения рифтогенных бассейнов, так и синхронным осадконакоплением рифтогенным вулканизмом основного состава

2) Высокоуглеродистые породы кодарской серии, относимые авторами к единому черносланцевому горизонту кевактинской серии, кроме золото-урановой нагрузки, также обладают повышенной платиноносностью, с содержаниями ЭПГ в единичных пробах, достигающими 0.0n г/т. Такая первичная обогащенность черносланцевых отложений позволяет говорить о перспективности обнаружения в пределах изучаемой территории, на месторождениях Au и U еще и повышенных содержаний Pt и особенно Pd. Данный вывод подтверждает работы предшественников, выделявших углеродистые породы удоканского комплекса как один из платиноносных уровней Урага-Холболокского рудного узла (Макарьев, 1994). Однако, по мнению авторов, в настоящий момент изучение ЭПГ в пределах Верхнесюльбанского рудного узла представляет больше научный, нежели практический интерес.

3) Изложенные в работе факты дают основание предполагать полигенный и полихронный генезис Au–U месторождения Хадатканда. Золотая минерализация, вероятнее всего, связана с заложением глубинного Сюльбанского разлома. Урановая же минерализация формировалась в результате внедрения позднепалеозойского интрузивного Сакуканского комплекса с формированием оперяющих разломов более низкого ранга (Кучеренко, 2006). Источником радиоактивных и сопутствующих урановому оруденению элементов вероятнее всего служили нижежащие отложения кодарской серии, которые, как было показано в ряде работ (Немеров и др., 2009; Паршин и др., 2013), имеют радиоактивную специализацию.

4) Участие палеопротерозойской углеродистотерригенной формации, обладающей характерной геохимической специализацией, в эволюционном развитии региона с широко проявленными на разных этапах процессами мобилизации и перераспределения рудных элементов позволяет рассматривать ее в качестве источника Au, U, Tr, ЭПГ, Cu и других компонентов как на территории Кодаро-Удоканской СФЗ, так и в пределах Тонодского и Нечерского поднятий.

5) Полученные данные позволяют отнести золотоурановые месторождения исследуемой территории к типу “несогласия”, что дает основание

считать их аналогом детально изученных Au–U месторождений Австралии и Канады. В связи с этим вероятность обнаружения месторождений Au и U на территории БГО значительно возрастает.

Авторы благодарны за творческое сотрудничество Н.К. Коробейникову и Л.Б. Макарьеву.

Часть измерений выполнялось на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7700 x фирмы Agilent Technologies в Цунтре коллективного пользования “Байкальский Центр Нанотехнологий” в технопарке при Иркутском Государственном Университете (БЦНТ ФГБОУ ВО ИРНИТУ г. Иркутск).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ № 15-05-00172-а и № 15-05-00584-а, а также гранта президента РФ МК-3747.2015.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреева О.В. (2012) Катагенез терригенных пород в осадочных внутрикратонных прогибах позднего протерозоя и его влияние на формирование U-оруденения типа “несогласия”. *Геология рудных месторождений* **54** (1), 49-70.
- Будяк А.Е., Брюханова Н.Н. (2012) Селен, висмут и ртуть месторождений золота различных генетических типов в черносланцевых формациях. *Геохимия* (9), 881-888.
- Варшалл Г.М., Велюханова Т.К., Кошечева И.Я. (1994) О концентрировании благородных металлов углеродистым веществом пород. *Геохимия* (6), 814-824.
- Гонгальский Б.И. (2010) Особенности основного магматизма Удокан-Чинейского рудного района (Северное Забайкалье). *Литосфера* (3), 87-94.
- Гончаренко О.П. (1993) Температурные условия развития геотермальной системы вулкана Баранского (о. Итуруп) *Геохимия* (2), 237-243.
- Гребенкин Н.А. (2013) Эволюция гидротермально-метасоматических ураноносных процессов в истории геологического развития Чарского района. *Современные проблемы науки и образования* (1) URL:www.science-education.ru/pdf/2013/1/77.pdf
- Драйвер Дж. (1985) *Геохимия природных вод*. М.: Мир, 440 с.
- Ермолаев Н.П., Созинов Н.А., Флициян Е.С. (1992) *Новые типы руд благородных и редких элементов в углеродистых сланцах*. М.: Наука, 188 с.
- Колмаков Ю.В., Сазонов А.М., Врублевский В.В., Потехина Е.В., Боярко Г.Ю. (2010) Вариации фугитивности серы в рудообразующем растворе: фактор магнитной зональности золотосульфидных месторождений. *Известия ТПУ* **317** (1), 87-91.
- Кучеренко И.В. (2006) Минералого-петрохимические и геохимические черты околорудного метасоматизма в кислых породах золотопродуцирующих флюидно-магматических комплексов. *Известия ТПУ*, **309** (1), 24-32.
- Макарьев Л.Б., Вояковский С.К., Илькевич И.В. (2009) Золотоносность урановых объектов в Кодаро-Удоканском прогибе. *Руды и металлы* (6), 56-64.
- Макарьев Л.Б. (1994) Платиноносность докембрийских углеродистых формаций Северо-Восточного Забайкалья. *Платина России*. М.: АОЗТ “Геоинформ-марк”, 155-159.
- Макарьев Л.Б., Миронов Ю.Б., Вояковский С.К. (2010) О перспективах выявления новых типов промышленных комплексных урановых месторождений в Кодаро-Удоканской зоне (Забайкальский край, Россия). *Геология рудных месторождений* **52** (5), 428-438.
- Мигута А.К., Модников И.С. (1999) Методические рекомендации по выделению и оценке районов, перспективных на выявление высокопродуктивного эндогенного уранового оруденения. М.: Изд. ВИМС, 78 с.
- Немеров В.К., Станевич А.М. (2001) Эволюция рифей-вендских обстановок биолитогенеза Байкальской горной области. *Геология и геофизика*. **42** (3), 456-470.
- Паршин А.В., Абрамова В.А., Мельников В.А., Развозжаева Э.А., Будяк А.Е. (2013) Перспективы благородно и редкометалльного оруденения нижнепротерозойских отложений на территории Байкальской горной области. *Вестник ИрГТУ* (3), 53-59.
- Немеров В.К., Будяк А.Е., Развозжаева Э.А., Макрыгина В.А., Спиридонов А.М. (2009) Новый взгляд на происхождение медистых песчаников месторождения Удокан. *Известия СО РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений* (2), 4-17.
- Терлеев А.А., Постников А.А., Кочнев Б.Б., Наговицин К.Е., Гражданкин Д.В., Станевич А.М. (2006) Раннепротерозойская биота из удоканской серии западной части Алданского щита (Россия). *Эволюция биосферы и биоразнообразия. К 70-летию А.Ю. Розанова*. М.: Т-во научных изданий КМК, 271-281.
- Федоровский В.С. (1972) Стратиграфия нижнего протерозоя хребтов Кодар и Удокан. М.: Наука, 130 с.
- Cuney M., Brouand M., Cathelineau M. (2003) What parameters control the high grade-large tonnage of the Proterozoic unconformity related uranium deposits. *Proceed. internat. conf. “Uranium Geochemistry”*. Nancy, France, 123-126.
- Gromet L.P., Dymek R.F., Haskin L.A. (1984) The “North American Shale Composite”: its compilation, major and trace element characteristics. *Geochim. Cosmochim. Acta* **48**, 2469-2482.
- Petrov L.L., Kornakov Yu.N., Korotaeva I.Ia. (2004) Multi-Element Reference Samples of Black Shale. *Geo-standards and geoanalytical research* **28** (1), 89-102.
- Wakita H., Rey P., Schmitt R.A. (1971) Abundances of the 14 rare-earth elements and 12 other trace elements in Apollo 12 samples: five igneous and one breccia rocks and four soils. *Pros. 2nd Lunar Sci Conf.* Pergamon Press, Oxford, 1319-1329.