

УДК 553.2 (553.411.071)

© Ю.И.Бакулин, 2014

ОСОБЕННОСТИ КРУПНООБЪЕМНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА**Ю.И.Бакулин (ГОУ ВПО «Тихоокеанский государственный университет»)**

Золотоносные черные сланцы формируются при геологических процессах, включающих мобилизацию и перераспределение рудных элементов. В результате этих процессов возможно возникновение крупнообъемных месторождений. Главные промышленные месторождения — урана, золота, металлов платиновой группы. Рудообразование многостадийное и полигенное. Назрела целесообразность научного определения рудоносной формации черных сланцев. Месторождения формации имеют характерные диагностические свойства, такие как углеродистость, геологические условия локализации, масштабность, особенности вещественного состава.

Ключевые слова: рудоносная формация черных сланцев, золото, углеродистость, полигенетическое рудообразование, регенерация, платиноносность, масштабность оруденения, обогащенность руд.

Бакулин Юрий Ильич, y-1936@yandex.ru

SOME SPECIAL FEATURES OF LARGE-SCALE GOLD DEPOSITS**Yu.I.Bakulin**

Gold-bearing black shales were formed as a result of geological processes, including mobilization and relocation of the wide list of ore elements. The certain industrial metal large-scale deposits appear, among main metals are uranium, gold, metals of platinum group. Mineralization is developing within many phases in time aspect and polygenetic according to the character of mineralization. This fact gives appropriateness of scientific definition of ore-bearing formation of black shales: to fix a required bulk of genetic attributes of formation, range of changes of diagnostic features and other important factors. For working out the formation attributes of black shales mineralization, gold is the acceptable object due to its high mobility and various information about mineralization. Deposits of formation have typical diagnostic characteristics, such as carbonaceous, geological conditions of localization, large scale, peculiarities of material analysis.

Key words: ore-bearing formation of black shales, gold, carbonaceous, polygenetic mineralization, regeneration, platinum, large scale of mineralization, ore washability.

Высказывание В.И.Смирнова о том, что месторождения полезных ископаемых формируются в процессе дифференциации минеральных масс при их кругообороте в осадочном, магматическом и метаморфическом циклах образования горных пород и геологических структур [7], позволяет составить предварительное представление о масштабах месторождения по совокупности геологических процессов мобилизации металлов. При такой самой общей оценке в разряд перспективных металлов и благоприятных процессов можно включить золото и рудообразование, относимое к углеродистому, или черносланцевому, типу.

Золото характеризуется набором контрастных свойств. Это один из самых тяжелых металлов ($19,3 \text{ г/см}^3$) и в тоже время один из самых рыхлых (структурная рыхлость Ω равна 10,21 против 3,42 у алмаза — структурно самого плотного минерала). Будучи химически инертным атомом, золото распространяется по всему спектру геологических процессов экзогенного и эндогенного происхождения [3, 4], обладает признаками магматогенного и седиментогенного накопления, которые наблюдаются в золотоносных черных сланцах. Еще одна контрастность выражается в низких кларке и кон-

центрациях его в руде, с одной стороны, и способности формировать большие массы руды, с другой. Термин «золотоносные (и рудоносные вообще) черные сланцы» широко применяется, хотя в научном отношении он не «оформлен»: не зафиксирован необходимый объем генетических признаков формации, диапазон изменения диагностических признаков, других важных показателей. Для разработки формационных признаков черносланцевого оруденения золото — приемлемый объект в силу широкой подвижности и наличия разнообразной информации о рудообразовании.

Отдельные аспекты рассматриваемого рудообразования характеризовались автором [2, 9], более обстоятельно — М.М.Константиновым [5] и другими исследователями. Термин рудоносные «черные сланцы» используется при описании геологических процессов, связанных с мобилизацией, перераспределением рудных элементов и образованием промышленных месторождений урана, золота, металлов платиновой группы. Рудообразование развивается многостадийно во временном аспекте и полигенетически по характеру рудообразующих процессов. Можно утверждать, что руды этого формационного ряда связаны как с миграцией и накоплением

Типизация золотоносных черносланцевых бассейнов

Типы бассейнов	Стадии развития	Осадочные формации	Примеры
Внутренние бассейны краевого прогиба	Завершающая	Алевритоглинистая	Бодайбинский прогиб
Шовные	Поздние	Алевритоглинистая	Джагдинская зона Амуро-Охотской системы
Приразломные осадочные бассейны	Начальные	Флишевая	Аллах-Юньская зона Яно-Колымской системы
	Поздняя	Алевритоглинистая	
Остаточные пост-инверсионные бассейны	Поздняя	Алевритоглинистая	Амгуньский синклинорий Сихотэ-Алинской системы

углеводородов (продуктов органического происхождения), так и с эндогенным рудообразованием.

Рудоносные черные сланцы отлагаются в приразломных осадочных бассейнах, отличающихся линейностью, большой амплитудой прогибания и участием в седиментации продуктов эндогенного происхождения. Состав осадков свидетельствует о зрелой стадии эрозии прилегающих континентальных блоков — их пенеппенизации. Важная особенность прогибов — слабая степень орогенеза и завершающего магматизма. Углеродистость осадков, представленная рассеянным органическим веществом (РОВ), в зависимости от степени метаморфизма диагностируется черной окраской или шелковистым блеском, а в слабометаморфизованных породах можно отметить запах при ударе молотком, пачканье рук.

Контролирующие разломы имеют глубокое заложение и обеспечивают поступление глубинных флюидов, обогащенных углеводородами и металлами, прежде всего золотом и металлами платиновой группы (МПГ). Рудообразование начинается в стадию осадконакопления, продолжается на стадиях диагенеза, катагенеза, метаморфизма и наложенных регенерационных процессов, связанных с новыми тектономагматическими этапами развития.

Отличительные геологические особенности золотоносных площадей. Типы осадочных бассейнов. Осадочные бассейны принадлежат к шовным, пограничным (краевым), остаточным типам. Анализ фациальной обстановки и роли серы в осадконакоплении свидетельствует об образовании черных сланцев в изолированных, разобщенных бассейнах, обеспечивающих закрытый геохимический режим при отложении осадков. Образование таких бассейнов обычно происходит после промежуточной частичной инверсии, слабого орогенеза. Их особенности и примеры приведены в таблице.

Эндогенные продукты осадконакопления. Эндогенная активность разломов выражается присут-

ствием в осадках туфогенного материала, редкими дайками и силлами магматических пород среднего и основного составов, а также привнесом из глубин в зону осадконакопления рудных элементов и углеводородов, образуемых при распаде гидридов, карбидов и других глубинных образований в зоне разлома. Ювенильные неравновесные флюидные системы, содержащие биофильные элементы, служат благоприятной средой для зарождения первичных органических соединений, которые в силу трофического принципа организации биосферы могут быть источником жизни. Органические соединения, пройдя непродолжительный путь развития, отмирают, обогащая осадки РОВ. Устанавливаемое аналитически в осадочных породах РОВ — лишь незначительная часть первоначальной массы органики, захороненной в породе при осадконакоплении. Это нафтоидный остаток процесса дистилляции органического вещества. При метаморфизме он преобразуется в антракосолиты. Поэтому, говоря об углеродистости черных сланцев, следует иметь в виду органику вообще [8]. Связь металлоносности с органическим веществом показана на следующих примерах. Работами ДВИМС [1] выявлена повышенная металлоносность (золото, металлы платиновой группы) бурых углей ряда месторождений Дальнего Востока (ранее В.В.Середин определил золото в углях Приморья) и их золошлаковых материалов. В 2000 г. А.А.Черепановым выделены металлы платиновой группы из растений (березы); золото и платина обнаружены в продуктах переработки нефтей о. Сахалин. Однако пока речь может идти лишь об эмпирической связи золота и МПГ с органическим веществом, поскольку научные исследования о формах такого сонахождения не проводились. О видах металлоорганических соединений можно только высказывать предположения. Одним из возможных видов могут быть металлоорганические (или протоорганические) соединения, названные итальянскими учеными Бруно

Д.Ардженио и Джузеппе Джераци «кримсами, или кристаллическими микробами». Для метаморфизованных разностей «черных сланцев» не исключается участие металлов в фуллеренах.

Стадии рудообразования. Первая стадия генерации и образования рассеянного оруденения связана с седиментационным процессом. На примере золота видно, что на начальных стадиях седиментационного цикла и эрозии образуются золотоносные конгломераты, с колебательными процессами средних стадий связан золотоносный флиш (типа Аллахьюнь, Россия; Бендиго, Австралия), на поздних — золото накапливается в фациях удаленного сноса (Майское, Сухой Лог и др., Россия). В фациях удаленного сноса происходит смешение седиментогенных и эндогенных продуктов, находящихся в растворенном состоянии, с образованием сложных соединений, хотя и рассеянных, но в более концентрированном состоянии.

Вторая стадия — диагенез — катагенез — метаморфизм — главная рудообразующая. В это время элементы дифференцируются в пространстве в соответствии с рядом подвижности элементов при метаморфизме Д.С.Коржинского: H_2O , CO_2 , S, SO_2 , Cl, K_2O , Na_2O , F, CaO, O_2 , Fe, P_2O_5 , BaO, MgO, SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 . Полнота геохимической колонны зависит от интенсивности и длительности воздействия, а время инверсии тектонического режима определяет отложение подвижной части элементов.

Углеводороды почти полностью отделяются на стадии метаморфизма, соответствующей углефикации типа Д, но часть углерода (до 0,5% по массе) остается, обуславливая характерную особенность пород. Это так называемое нерастворимое углеродистое вещество (НУВ). Изучение последнего на месторождении Сухой Лог [8] показало, что методами фракционирования его можно разделять на свободное (отделяемое водой), карбонатное, силикатное, сульфидное (отделяемое соответственно соляной, фтористо-водородной и азотной кислотами) и остаточное, не выделяемое в этих средах. Трудности извлечения НУВ объясняются нахождением его в форме фрамбоидов, покрытых сульфидами. Золотом наиболее обогащено свободное и сульфидное НУВ. Исследователи приходят к выводу, что НУВ имеет два источника — детритный (приповерхностный) и сорбированный (из глубинных, эндогенных источников).

Уран приобретает подвижность в том же диапазоне динамотермального воздействия, но на его вынос из системы влияет образование кристаллических минеральных соединений, позволяющих сохраняться урану в породе и при более высоких *РТ*-параметрах. Например, в зоне диагенеза и ран-

него катагенеза часть урана удерживается в виде водного фосфата уранила, образующего с вивианитом изоструктурные соединения. Но при более высоком метаморфизме и замещении вивианита апатитом уран переходит в подвижную фазу. Аналогично уран удерживается кертитом в виде твердых растворов водного триоксида урана. При метаморфизме углеводорода до графита уран также переходит в подвижную фазу (Н.А.Созинов, Н.П.Ермолаев). Всего, по данным этих авторов, из 1 м³ черных сланцев в подвижную фазу переходит до 9–11 г урана.

Основная масса халькофильных элементов отделяется до филлитовой фации метаморфизма. Они изоморфно присутствуют в породообразующих минералах, а основные их носители — плагиоклазы — на уровне *РТ*-условий филлитов полностью освобождаются от халькофилов.

Золото в черных сланцах, как и углеводороды, имеет поверхностное и глубинное происхождение. Глубинное золото поступает, по-видимому, в составе хлоридных комплексов, разрушение которых ведет к образованию ультратонкого золота и на его основе коллоидных соединений и кластеров в лигандной с углеродом и безлигандной формах. При метаморфизме оно укрупняется. На месторождении Сухой Лог >30% золотин имеют размер 3–5 мкм, ~20% — 15–25 мкм [7]. При фракционировании в остатке остается неизвлекаемое золото размером <9 мкм. На стадии метаморфизма золотины растут как при химических, так и физико-химических процессах, слипаясь за счет поверхностных сил в результате низкой температуры Дебая (170°К), при которой атомы золота в узлах кристаллической решетки находятся в активированном состоянии. Золотины «слипаются» даже при сибирских морозах. Более интенсивно они увеличиваются при наложенных тектономагматических процессах, составляющих следующую стадию рудообразования — регенерационную.

Третья стадия — регенерация рассеянного оруденения — происходит под воздействием магматизма. Она заключается (в порядке возрастающей интенсивности воздействия) в перекристаллизации, образовании родственных минеральных обособлений в пределах прежних геологических тел, апофиз в соответствии с изменившимся полем напряжений, секущих жил ограниченной протяженности. Неоднородность рудного поля, возникшая на ранних стадиях развития, влияет на формирование наложенных новообразований — минерализованных зон, жил, штокверков. При этом сингенетические рудоносные образования затушевываются, но их связь с черными сланцами сохраняется.

Металлы платиновой группы аналитически в существенных количествах устанавливаются в зонах регенерации. В зонах рассеянного оруденения массовыми методами анализа их можно установить крайне редко и в незначительных количествах. Заметим, что лаборатории, не применяющие специальные методы пробоподготовки, МПГ не определяют. По-видимому, платина все еще находится в соединениях типа фуллеренов, трудно диагностируемых аналитическими методами. В результате регенерации фуллерены, вероятно, разрушаются и МПГ переходят в минеральные формы. Пробы, взятые в экзоконтакте новообразованных жил, показывают содержание платины.

В связи с длительностью и многоэтапностью формирования месторождений фиксируется большое разнообразие их минеральных, текстурных, структурных и вещественных особенностей. Но главные, руководящие особенности (узнаваемость), позволяющие рассматривать их в составе единой генетической группы, сохраняются. К ним относятся алевритопелитовый состав вмещающих осадочных пород, их углеродистость, сложные формы структурного и тектонического контроля минерализации, слабая степень контрастности руд по сравнению с вмещающими породами и ряд других. Как правило, руды труднообогатимые.

В зависимости от степени метаморфизма изменяется состав вмещающих пород, с ним связана одна из главных стадий рудообразования. Режим метаморфизма сказывается и на качестве руд. В интенсивном скоротечном процессе участвуют многие компоненты и качество руд не улучшается. Длительное воздействие, в частности региональный метаморфизм, ведет к дифференциации компонентов по их подвижности и качество руд улучшается. Также облагораживает руду смена режима метаморфизма: прогрессивного на регрессивный (типа диафтореза). Смена режима нередко сопровождается разрывом сплошности, жилобразованием, ростом структурно рыхлых кристаллов золота.

Одна из основных особенностей рассматриваемой группы месторождений — их масштабность. А некоторые представители являются лидерами золотодобывающей отрасли: Сухой Лог (Россия), Мурнтау (Узбекистан), Хомстейк (США). Это определяется масштабностью ранних стадий рудообразования (седimentации, диагенеза, метаморфизма). Руды таких объектов в основном труднообогатимые, но специальные методы обогащения для них разработаны. Как уже говорилось, в ходе метаморфического воздействия может происходить облагораживание (улучшение обогатимости) руд. Неслучайно лучшие показатели обогащения имеют руды из метаморфи-

зованных вмещающих пород, чем из неметаморфизованных черных сланцев. Проиллюстрируем это на примерах.

Майское месторождение отличается слабой степенью регенерации золото-сульфидной минерализации и изменения рудоносных вмещающих углистых алевропелитовых пород, хотя исследователями (М.М.Константинов, А.В.Волков и др.) оно относится к экзоконтактной зоне Кукенейского массива гранитоидов, характеризующегося олововольфрамовой и полиметаллической минерализацией. При такой интерпретации взаимоотношений регенерация должна бы иметь массовый характер. Но А.В.Волковым выделения более молодого и более крупного золота отмечались эпизодически. Во всяком случае, руды месторождения являются упорными, требуют применения специальных методов обогащения, поэтому гравитационные и флотационные не дают удовлетворительных результатов.

Агние-Афанасьевское и Покровско-Троицкое месторождения (Пильда-Лимурский золотоносный район Хабаровского края) также залегают в слабометаморфизованных черных сланцах, но структурно представлены надынtrizивными куполами с широко развитыми трещинами отрыва, по которым развиты крустификационные жилы с хорошо извлекаемым гравитационными методами золотом. Качество руд улучшается.

Наталкинское месторождение (Центрально-Колымский район) характеризуется четкой приуроченностью к верхнепермской атканской свите, сложенной углеродистыми диамиктитами с существенной долей вулканогенного материала. Послойное прожилково-вкрапленное оруденение «вызревало» в ходе диагенеза и метаморфизма осадков, сопровождавшегося высвобождением золота из пиритов разных генераций и фосфатоносных конкреций. В результате образовались руды, пригодные для переработки с применением технологий обогащения 50-х годов прошлого века.

В соседнем рудном узле на месторождении Дегдекан детальными минералого-геохимическими работами ДВГИ ДВО РАН [8] доказаны стадийность формирования месторождения и улучшение качества руды.

Разнообразные примеры седиментогенного накопления золота (Юрско-Брендакитское, Нежданское месторождения и др.) в пределах Южно-Верхоянского синклинория охарактеризованы в работах М.М.Константинова [5].

Золотое оруденение в интенсивно метаморфизованных углеродистых алевропелитах представлено широко известными объектами Хомстейк, Мурун-

тау, а также месторождениями Приамурья — Токур, Маломыр и др.

На месторождении Хомстейк тонкослоистые углеродистые алевропелитовые осадки с биотитовой и амфибол-биотитовой изоградой метаморфизма на регрессивной стадии вдоль поперечных зон подверглись дополнительной складчатости, рассланцеванию, филлитизации, окварцеванию, сопровождавшимся образованием даек риолитов. Рудные тела залегают в горизонте тонкополосчатых хлорит-кварцевых, карбонат-кварцевых сланцев [10]. В результате наложенных процессов сульфиды перекристаллизовывались и золото высвобождалось.

Месторождение Маломыр локализовано вдоль субогласной (на границе кристаллических сланцев и их углистой разновидности) тектонической зоны, имеющей серию оперений типа конского хвоста. В метасоматических зонах до 70% золота находится в сростках с сульфидами, а в области сочленений тектонических зон, где развиты крустификационные жилы, содержание свободного (тонкого) золота возрастает до 80%.

На Токурском месторождении признаками релаксации сжимающих напряжений, сопровождающихся обогащением руд, являются адуляризация и крустификационные кварцевые жилы.

Таким образом, проблема рудоносности черных сланцев заслуживает специального изучения на базе современных технических средств для обоснования промышленного и генетического типов руд, рудной формации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакулин Ю.И., Черепанов А.А. Золото и платина в золотослаковых отходах ТЭЦ г. Хабаровска // Руды и металлы. 2003. № 1. С. 60–67.
2. Бакулин Ю.И. О природе превращений золота в рудогенезе // Отечественная геология. 2010. № 1. С. 67–69.
3. Бакулин Ю.И. О причинах широкой подвижности золота и разнообразия формационных типов месторождений // Тез. докл. конференции «Тектоника, магматизм и геодинамика Востока Азии». Хабаровск, 2011. С. 157–158.
4. Буряк В.А., Бакулин Ю.И. Металлогения золота. — Владивосток: Дальнаука, 1998.
5. Константинов М.М. Золото в осадочных формациях. — М.: МЭЙЛЕР, 2009.
6. Распределение благородных металлов в черных сланцах золоторудного месторождения Дегдекан (Северо-Восток России) / А.И.Ханчук, Л.П.Плюснина, Е.М.Никитенко и др. // Тихоокеанская геология. 2011. Т. 10. № 2. С. 3–11.
7. Смирнов В.И. Геология полезных ископаемых. 4-е изд. перераб. и доп. — М.: Недра, 1982.
8. Тонкодисперсное золото и углерод в рудах Сухого Лога (геохимический аспект) / Э.А.Развозжаева, А.М.Спиридонова, Н.В.Вилор и др. // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 9. С. 1324–1330.
9. Geological conditions of «black shale» ore-content. 32 IGC, G-14-01.
10. <http://ic-gold.ru>