

## ПОИСКОВАЯ МОДЕЛЬ ЗОЛОТО-СУЛЬФИДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВКРАПЛЕННЫХ РУД АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИИ

А. В. Волков, А. А. Сидоров

ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 9 января 2017 г.

*Представлена поисковая модель, обобщающая наиболее важные характеристики месторождений золото-сульфидных вкрапленных руд (ЗСМВР). Модель основана главным образом на результатах изучения ЗСМВР в Майском (центральная Чукотка) и других районах России. На первый план геолого-генетической модели выдвинуты наиболее важные индикаторные факторы формирования ЗСМВР. Во многих странах ЗСМВР с упорными свойствами, обладающие большими запасами, — основной потенциальный источник производства золота. Вовлечение в эксплуатацию новых месторождений золото-сульфидного типа с упорным «невидимым» золотом позволит, по мнению авторов, увеличить и стабилизировать уровень золотодобычи в арктических регионах России, так как на каждом месторождении можно добывать ежегодно 5–10 и более тонн золота на протяжении десятков лет.*

**Ключевые слова:** Арктическая зона, месторождения, вкрапленные сульфидные руды, невидимое золото, упорные руды, поисковая модель.

### Введение

В последние годы из упорных руд добывается 12—15% Au от общего объема добычи в России (Олимпиадинское, Майское и Албазинское месторождения). В мире доля Au, полученного из упорных руд, составляет более 10%, главным образом из месторождений карлинского типа в Неваде и Южном Китае [1]. В 2013 г. в Арктической зоне России (центральная Чукотка) введено в эксплуатацию крупное месторождение золото-сульфидных вкрапленных руд (ЗСМВР) Майское, из руд которого к настоящему времени уже добыто более 15 т золота. В Арктической зоне известно еще несколько ЗСМВР: месторождение Кючус (Северная Якутия) разведано и подготовлено к освоению, а месторождения Эльвинейское, Туманное, Сильное, Сыпучее и Случайное (западная, центральная и восточная Чукотка) законсервированы на различных стадиях геолого-разведочных работ [2; 3]. Перспективы открытия новых объектов как в перечисленных выше, так и в других регионах (Таймыр, Кольский полуостров) Арктической зоны России достаточно велики.

С момента открытия перед исследователями стоит проблема генезиса золото-сульфидных

вкрапленных руд и соотношения вкрапленных упорных руд с жильными рудами. Некоторые исследователи традиционно считают, что вкрапленные руды образуют околожильные метасоматические ореолы [4; 5]. По нашему мнению, эта минерализация образуется в самостоятельный дожилый этап рудообразования [2; 3; 6]. Появляется все больше данных, позволяющих связать вкрапленное золото-сульфидное оруденение с месторождениями карлинского типа [7].

### Типизация месторождений ЗСМВР

Крупные ЗСМВР распространены глобально (рис. 1), известны в различных по возрасту металлогенических провинциях (от докембрия до плиоцена). Большим сходством с ЗСМВР обладают дистальные вкрапленные месторождения, ассоциирующие с порфировыми Cu-Mo-Au системами, такие как Лонг Три и Мариголд (Невада), Мелко и Барни Каньон (Юта), Бау (Малазия), Месел (Индонезия), Зачуран (Иран) и др. Очень похожи на ЗСМВР месторождения карлинского типа (МЗКТ), а также эпизональные месторождения, связанные с интрузивами гранитоидов (Бэд Мунтан, Невада, Брюверы Крик, Канада, и Донлин Крик, Аляска, и др.) и вкрапленные

© Волков А. В., Сидоров А. А., 2017

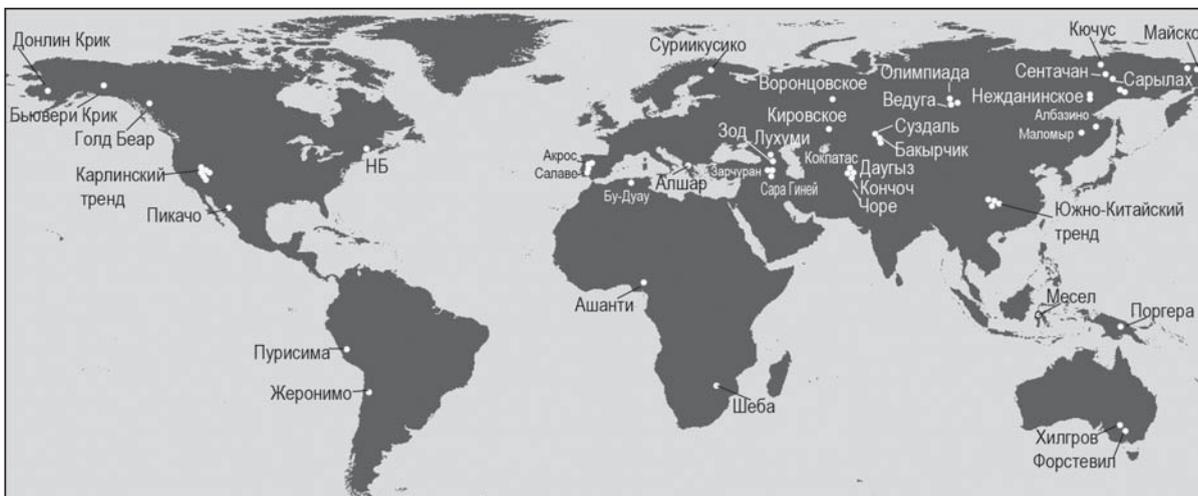


Рис.1. Размещение крупных ЗСМВР на карте мира

орогенные месторождения (Форстевил, Австралия, Ашанти, Гана, и др.). Они располагаются преимущественно в терригенных и терригенно-карбонатных углеродсодержащих толщах, в зонах глубинных

разломов, на флангах сателлитных интрузивно-купольных структур, менее распространены в магматических породах. Большое значение в модели их формирования имеют надвиги и системы дуплексов

Таблица 1. Классификационные признаки ЗСМВР

№ п/п	Признаки
1	Тектонические обстановки: орогенная, связанная с коллизией террейнов и последующей тектоно-магматической активизацией (ТМА); островодужная — надсубдукционные вулканоплутонические пояса; тыловые, задуговые (перивулканические) зоны активизации вулканоплутонических поясов
2	Глубинное строение во многом обусловлено последовательным развитием магматических очагов нескольких уровней размещения
3	Рудовмещающие породы представлены флишевой, преимущественно алевритовой, пластичной углеродистой толщей с небольшим количеством слоев и линз мелкозернистых песчаников. Типичны пиритовые конкреции и вкрапленность диагенетического пирита
4	Тесная пространственная и парагенетическая связь оруденения с дайками и субвулканическими штоками гранит-порфиров, лампрофиров, риолит-порфиров, а в ряде случаев с эксплозивными брекчиями. Гранитоиды относятся к типу пород, несколько пересыщенных глиноземом и щелочами, содержание натрия резко преобладает над натрием
5	ЗСМВР формируются в купольно-блоковых структурах, занимающих отчетливую надинтрузивную позицию, и в «амагматичных» тектонических блоках продольных разломов зон ТМА (зонах продольных дислокаций). Большое значение имеют надвиги и системы дуплексов
6	Рудные тела представляют собой импрегнированные золотоносными сульфидами линейные зоны дробления и рассланцевания, которые отчетливо фиксируются в геохимических аномалиях золота и мышьяка
7	Руды сильно обогащены As, Sb, Au, умеренно — Ag, Pb, Zn, W, Hg и низко — В, Li, Bi, Cu, Se, Te, Mo, F, Co, и Ni
8	На ряде объектов развиты промышленно значимые линейные коры химического выветривания с тонким золотом
9	Первичные руды — упорные, представлены тонкой вкрапленностью золотоносных сульфидов (пирита и арсенопирита). Характерно высокое содержание сульфидов (5—10%), невидимое, тонкодисперсное золото. Постоянно присутствуют кварц-антимонитовые жилы. Обычна беризитизация и аргиллизация вмещающих пород
10	Россыпи золота отсутствуют

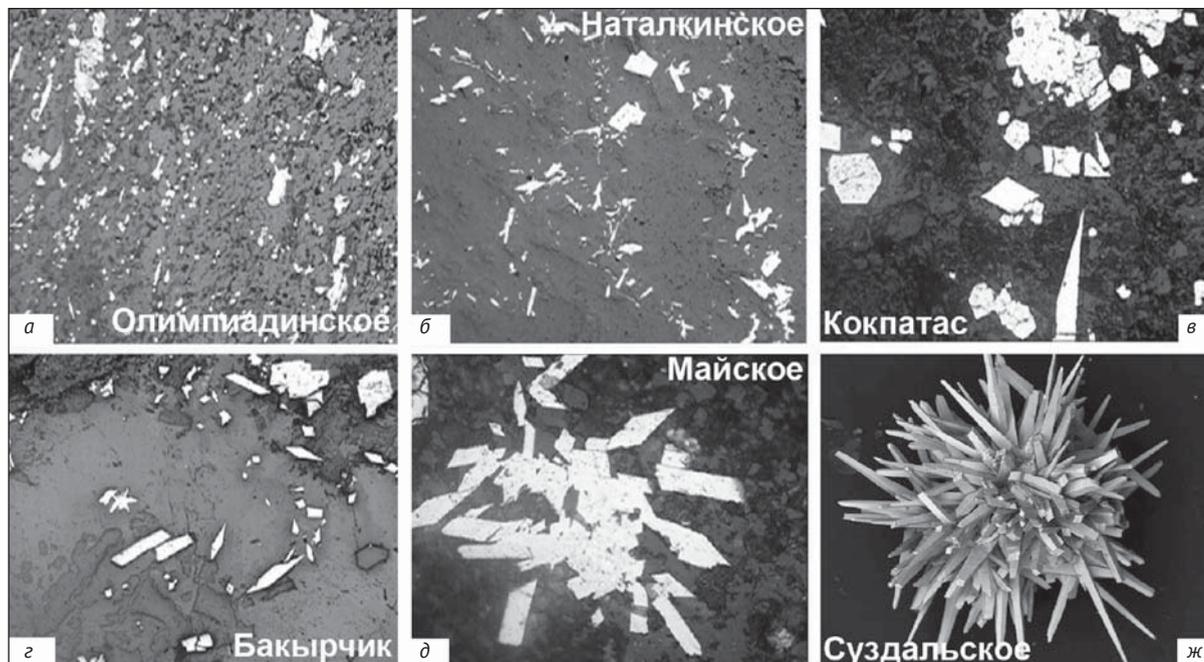


Рис. 2. Золото-сульфидные вкрапленные руды ЗСМВР (игольчатый арсенопирит и пирит, содержащие тонкодисперсное золото): а–б – ЗСМВР: а – главное рудное тело, Олимпиада (Красноярский край), аншлиф, увеличение 50; б – Наталкинское (Магаданская область), аншлиф, увеличение 200; в – Кокпатас (Узбекистан), аншлиф, увеличение 200; з – Бакырчик (Казахстан), аншлиф, увеличение 200; д – рудное тело № 1, Майское (Чукотка), аншлиф, увеличение 400; ж – агрегат игольчатого арсенопирита Суздальское (Казахстан), увеличение 50

[8]. Классификационные признаки ЗСМВР сведены в табл. 1.

ЗСМВР обнаруживают геолого-структурные и тесные минералого-геохимические связи с золото-серебряным, золото-кварцевым, золото-сурьмяным и золото-редкометалльным жильным оруденением [3; 7; 9; 10]. Вкрапленные сульфидные руды ЗСМВР Северо-Востока России (рис. 2) не имеют принципиальных отличий от сходных руд Казахстана (Бакырчик), Енисейского края (Олимпиада, Ведуга, Удерейское), Узбекистана (Даугызтау, Кокпатас), Таджикистана (Чоре, Кончоч), Финляндии (Суриикунико), Австралии (Форстевил), США (Донлин Крик), Ганы (Ашанти) и др.

### Тектоно-металлогенические обстановки формирования

Новый фактический материал, существенно расширяющий наши представления о генетическом разнообразии и конвергенции вкрапленного Au-сульфидного оруденения, был получен в результате изучения металлогении рудных районов Северо-Востока и других регионов России, стран СНГ и мира. Выполненные исследования показали, что ЗСМВР формируется в разных тектоно-металлогенических обстановках (ТМО) (рис. 3).

ЗСМВР Чукотки (Майское, Туманное и др.) обладают признаками месторождений Au, связанных с интрузивами гранитоидов [11]. Чукотские ЗСМВР образуются близко одновременно на границе раннего

и позднего мела (около 100 млн лет) в интрузивно-купольных структурах внешнего перивулканического обрамления позднеорогенного Охотско-Чукотского вулканогенного пояса [10]. Рудовмещающие флишевые углеродистые толщи содержат слабо-золотоносную вкрапленность и конкреции диагенетических сульфидов (пирита и марказита). Сателлитные месторождения представлены Sn-Ag мезотермальным, Au-Ag и Hg-Sb эпитермальными типами. Изометричные рудные поля золото-сульфидных месторождений (площадью 5–8 км<sup>2</sup>) сопровождаются свитами даек, взрывными брекчиями и субвулканическими штоками. Количество упорного (невидимого) Au в рудах составляет 90% [7]. Несколько позднее (70 млн лет) формируются ЗСМВР Аляски и Юкона [11]. В аналогичной ТМО образовалось также Итакинское ЗСМВР (Забайкальский край) [6].

ЗСМВР Верхояно-Колымских террейнов (Наталкинское, Неждановское и др.) — производные постколлизийной орогенной ТМО. В этой обстановке месторождения контролируются глубинными региональными разломами (Тенькинским, Адыч-Тарынским и др.), фиксирующими зоны коллизии турбидитных террейнов. Подобные разломы играют важную роль как транспортные, транслитосферные каналы в земной коре для метаморфогенных рудоносных флюидов [12]. Турбидиты верхоянского комплекса, как и чукотский флиш, содержат вкрапленность и метакристаллы диагенетического пирита и марказита. Рудные поля (площадью более



Рис. 3. Минералого-геохимическая характеристика тектоно-металлогенических обстановок формирования минеральных типов ЗСМВР

15 км<sup>2</sup>) Наталкинского и Нежданинского месторождений, крупнейших на Северо-Востоке России, приурочены к тектоническим блокам в продольных зонах глубинных разломов, занимающих отчетливую надинтрузивную позицию [4; 10]. Важную роль в формировании ЗСМВР в этой ТМО играют оперяющие основной разлом взбросы, сбросы и надвиги, образующие рудовмещающие системы дуплексов [8]. В пределах рудных полей встречаются дайки пестрого состава. Количество упорного Au в рудах варьирует от 30% до 80%. В орогенной обстановке формируются ЗСМВР Монголо-Охотского (Албазино, Маломыр), Северо-Енисейского (Олимпиадинское, Ведуга и др.), Калба-Нарынского (Бакырчик, Суздальское и др.) и Кураминского (Даугызтау, Кокпатас и др.) металлогенических поясов, а также района Бендиго (Форстевил) в западной Австралии.

Непосредственно в зоне Адыча-Тарынского глубинного разлома залегают крупные золото-сурьмяные месторождения Сарылах и Сентачан, в пределах которых известны, но не разведаны и в связи с этим недостаточно изучены золото-сульфидные вкрапленные руды [10; 13]. К Адыча-Тарынской зоне приурочено большое количество Au-Sb, Sb и Hg рудопроявлений, где могут быть выявлены новые ЗСМВР [13; 14]. В зоне Янского разлома (северное продолжение Адыча-Тарынской зоны) локализовано крупное Кючуское месторождение, в котором количество упорного золота превышает 80% [6]. На

перечисленных Au-Sb и Hg объектах Адыча-Тарынской зоны магматические образования отсутствуют, поэтому предшественники считали их «амагматичными» — телетермальными. По данным В. А. Степанова и В. Г. Моисеенко [15], рассматриваемые зоны разломов имеют палеорифтогенную природу.

Наиболее детально изучена ТМО формирования месторождений Au карлинского типа, обладающих большим сходством с ЗСМВР [7].

Рифтогенной постостроводужной ТМО принадлежат ЗСМВР Малого Кавказа (Лухуми, Зодское), иранского вулканоплутонического пояса Тахаб (Зарчуран, Сара Гиней, Аг-Дах), Папуа Новой Гвинеи (Поргера). Эти месторождения характеризуются сравнительно невысокими (3—4 г/т) содержаниями Au в упорных рудах (см. рис. 3) и доминирующим развитием Au и As содержащего пирита [16]. Характерная особенность месторождений — пространственная ассоциация с основным и ультраосновным магматизмом и широкое развитие теллуридов в поздних жилах. Количество упорного Au достигает 60—70% [16].

Принадлежность ЗСМВР к той или иной ТМО подтверждается соответствующими изменениями минеральных и геохимических парагенезисов в рудах (см. рис. 3). Однако в большинстве случаев ЗСМВР разных ТМО представляются конвергентными (квантитативными) по текстурам, структуре и минеральному составу руд.



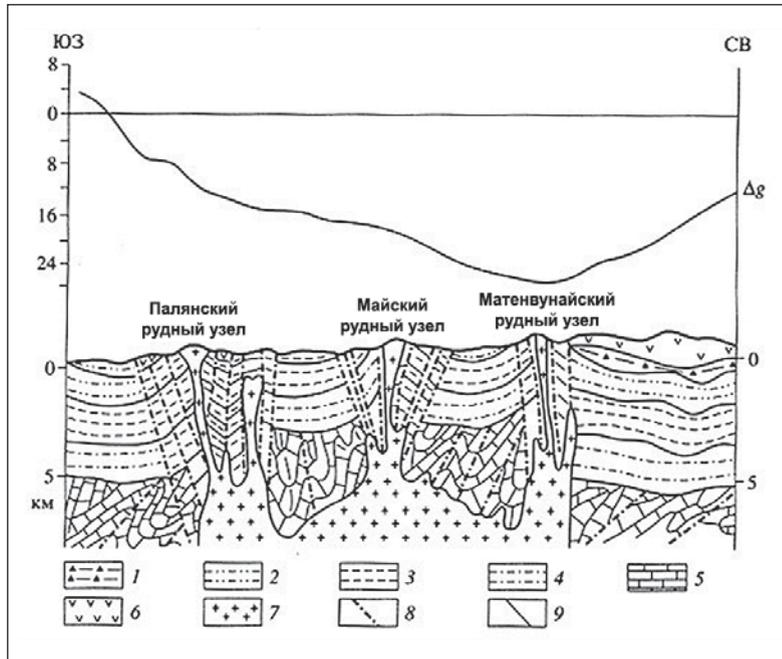


Рис. 5. Глубинное строение центральной Чукотки (схематический разрез по геолого-геофизическим данным):

- 1 — нижнемеловые песчано-сланцевые толщи, переслаивающиеся с туфопесчаниками,
- 2 — норийские песчано-сланцевые толщи,
- 3 — карнийские, флишевые алевро-сланцевые толщи,
- 4 — нижне-среднетриасовые сланцы,
- 5 — палеозойские терригенно-карбонатные отложения,
- 6 — нижнемеловые андезиты,
- 7 — ранне-позднемеловые гранитоиды,
- 8 — магмо- и рудоконтролирующие синвулканические разломы,
- 9 — геологические границы

процесс рудообразования. На ранних этапах в дайках и штоках гранит-порфиров и диоритов в ореолах серицитовых метасоматитов формируются молибденит-кварцевые и вольфрамит-кварцевые, касситерит-кварцевые жилы и прожилки. На Майском месторождении (центральная Чукотка) минерализованные зоны дробления и рассланцевания отчетливо пересекают поздне-меловые дайки лампрофиров и риолитовых порфиров (абсолютный возраст 107—97 млн лет [2]). Руды месторождений отличаются высоким содержанием золота (в среднем 12 г/т), преимущественно упорного, заключенного во вкрапленных сульфидах; количество свободно извлекаемого золота не превышает 10—20%.

ЗСМБР Верхояно-Колымских мезозойд (Наталкинское, Нежданинское) имеют линейно-вытянутые рудные поля площадью более 20 км<sup>2</sup>. Рудовмещающими являются монотонные терригенные толщи пермского возраста. Устанавливается пространственная связь оруденения с дайками лампрофиров, диоритовых порфиров, риолитов, штоками гранодиоритов и диоритов, субвулканическими телами, развитыми в зонах активизации глубинных разломов. Месторождения отличаются невысоким содержанием золота во вкрапленных рудах (от 2—6 г/т). Количество свободного золота (средняя проба 750 единиц) достигает 50—80%. В пределах Наталкинского месторождения известны ранние дайки спесартитов и порфиров (159—130 млн лет) и поздние дайки риолитов (100 млн лет) [17]. Золото-сульфидное вкрапленное и штокверковое золото-кварцевое оруденение месторождения, по наблюдениям авторов, отчетливо пересекает как ранние, так и поздние дайки. На Нежданинском месторождении минерализация отчетливо раннемеловая [4]. Раннемеловой возраст наиболее вероятен

и для месторождений Сарылах и Сентачан в Адыч-Тарынской зоне ТМА [13].

Рудные поля Au-Sb и Au-Sb-Hg типов (Сарылах и др.) имеют линейно-вытянутую форму, что обусловлено формированием рудоносных тектонических блоков в зонах продольных, глубинных разломов. Вмещающие породы представлены углеродистыми флишоидными алевролитовыми толщами. В богатых рудах ряда месторождений (Сарылах, Сентачан) содержится до 50% антимонита, характерна весьма высокая проба самородного золота (до 998 единиц). Отмечаются признаки регенерации ранних золотоносных сульфидов [9; 13]. На некоторых месторождениях (Кючуском) наряду с антимонитом в заметном количестве присутствуют киноварь и самородная ртуть. На ряде месторождений вкрапленные сульфидные руды недостаточно изучены и не оценены в промышленном отношении, хотя среднее содержание золота в них достигает 8—10 г/т и более [10]. Таким образом, весьма вероятно, что ЗСМБР на Северо-Востоке России образовались близко одновременно в позднем мелу в связи с постаккреционными процессами ТМА, сопровождающимися становлением Охотско-Чукотского и Уяндино-Ясаченского вулканогенных поясов.

Месторождение Майское находится в южном крыле разлома в литосфере пониженной плотности на не вскрытом эрозией юго-западном сателлите Кукенейского гранитного массива или в зоне его влияния [18]. По геофизическим данным [18], глубинное строение этого месторождения во многом обусловлено последовательным развитием магматических очагов нескольких уровней размещения — наиболее удаленного от поверхности мантийного, промежуточного верхнемантийного (астеносферного, подлитосферного) и периферического приповерхностного, размещенного в гранитном слое.

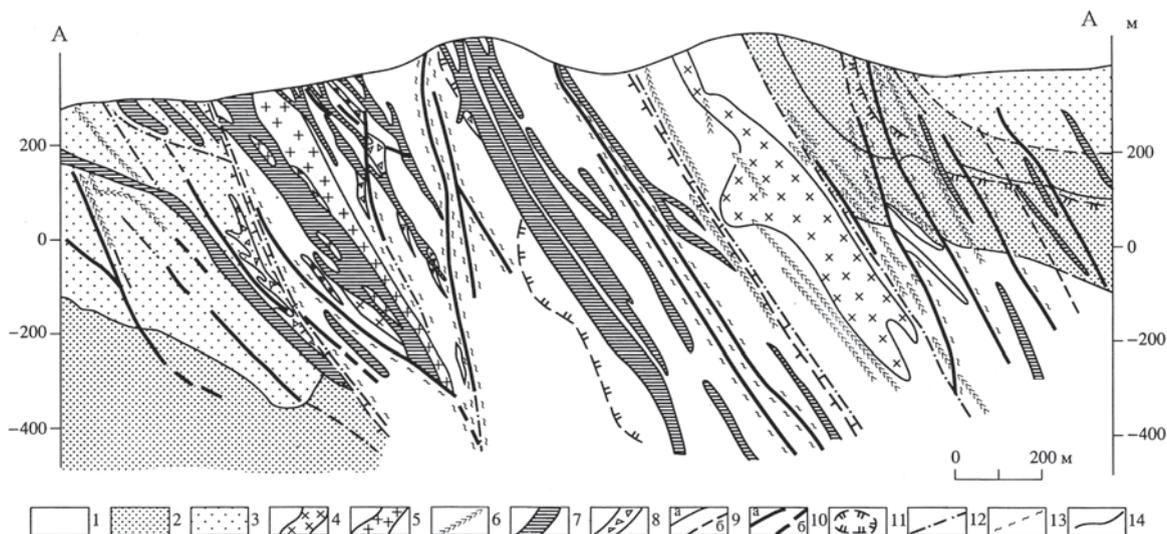


Рис. 6. Геологический разрез месторождения Майское:

1 – алевролиты, кевемская свита среднего триаса, 2 – песчаники среднего триаса, 3 – переслаивающиеся песчаники и алевролиты триаса, 4 – гранодиориты и гранит-порфиры, 5 – аплиты, 6 – лампрофиры, 7 – риолит-порфиры, 8 – взрывчатые брекчи, 9 – разломы: установленные (а) и предполагаемые (б), 10 – рудные тела, 11 – контур серицитовых метасоматитов, 12 – зоны трещиноватости, 13 – зоны дробления, рассланцевания и смятия, 14 – геологические границы

Магматические породы — дайки ранне-позднемелового комплекса занимают 25% общего объема пород Майского месторождения (рис. 6). В целом породы соответствуют калиево-натриевым гранитоидным сериям [3]. С поздними дайками ассоциируют инъекционные (взрывчатые) брекчи (рис. 7). Взрывчатые брекчи известны и в месторождениях Карлинской группы, где они называются «pre-ore collapse breccias» [19].

Рудные тела представляют собой импрегнированные золотоносными сульфидами линейные зоны дробления и рассланцевания, отчетливо фиксируются в геохимических аномалиях золота и мышьяка (рис. 8). Они размещены в виде системы эшелонированных субпараллельных тел в полосе широтного направления протяженностью почти 3,5 км, ограниченной с севера и юга зонами широтных разломов.

В этой полосе установлено более 30 рудных тел, преобладающая часть (70%) которых не выходит на поверхность. Контакты рудных тел обычно нечеткие за счет развития оруденения по мелким оперяющим трещинам и зонам кливажа во вмещающих породах. Наиболее крупные рудные тела имеют протяженность до полутора километров, длина других — первые сотни метров.

### Вещественный состав руд

Руды ЗСМВР отличаются достаточно высокими содержаниями золота (4—12 г/т), преимущественно упорного, заключенного во вкрапленных сульфидах; количество свободно извлекаемого золота не превышает 10—20%. Учитывая частое присутствие во вкрапленных сульфидных рудах углеродистого вещества, которое значительно затрудняет их обогащение, такие руды принято называть «двойными упорными рудами» (double refractory ores). Большое,

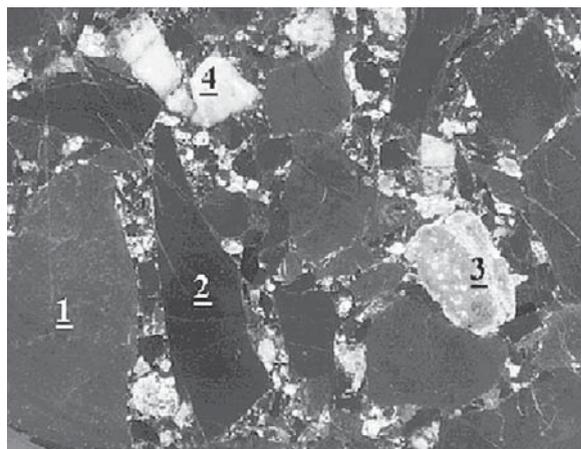


Рис. 7. Взрывчатая брекчия, месторождение Майское (фото, полированный шлиф, уменьшено в два раза). В обломках представлены основные породы, слагающие месторождение: 1 – тонкозернистые песчаники с сингенетическим пиритом, 2 – алевролиты, 3 – пропилитизированная дайка риолитовых порфиров, 4 – метамофогенный кварц. В цементе мелкие обломки этих же пород и переотложенный пирит

часто самостоятельное промышленное значение имеют руды зоны окисления (кор выветривания). Прожилково-вкрапленные руды представляют собой слабо серицитизированные и карбонатизированные песчано-алевро-глинистые породы, содержащие 6—8% сульфидов, преимущественно мелкого и тонкого (до субмикроскопического) пирита и арсенопирита при значительном преобладании (в два-три раза) первого (см. рис. 2). Некоторые рудные тела содержат также кварц-сульфидно-полиметаллические и кварц-антимонитовые жилы, прожилки и гнезда, нередко с мелкой вкрапленностью золота. Из нерудных минералов кроме

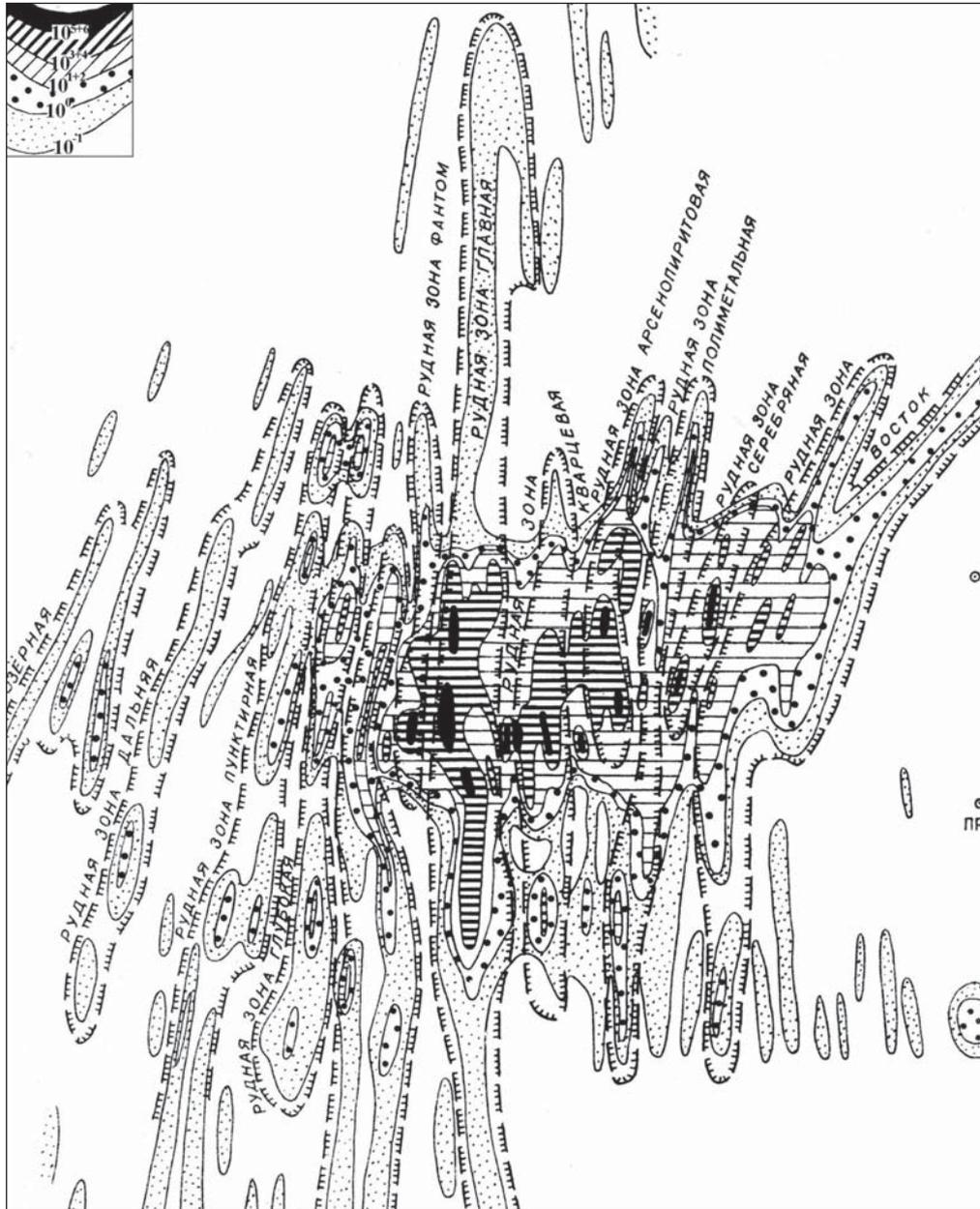


Рис. 8. Геохимические аномалии золота Майского месторождения

небольшого количества кварца отмечены карбонаты, хлорит, барит и гипс. Кроме золота определенный промышленный интерес представляют такие попутные компоненты, как сурьма, серебро и сера. Вкрапленная золотосная минерализация имеет ярко выраженный метасоматический характер и представлена вкрапленностью мельчайших (десятые-сотые-тысячные доли миллиметра) кристаллов и сростков золотосного арсенопирита и пирита (см. рис. 2) в темноокрашенных, слабо окварцованных осадочных породах. Встречаются также микропрожилки кварца, содержащего золотосные сульфиды. С метасоматическими рудами пространственно тесно ассоциируют кварц-антимонитовые жилы и прожилки, нередко занимающие в рудной

залежи осевое положение. В этих жилах отмечены редкие и небольшие гнезда мелкого высокопробного золота.

Вкрапленные руды характеризуются высоким золотосеребряным отношением (до 10:1 и выше) и относительно равномерным распределением золота (коэффициент вариации содержаний более 60%), присутствующего главным образом в виде тонкодисперсных включений в мышьяковистом пирите (As — 1—7%) и сурьмянистом арсенопирите (Sb — 0,001—0,1%). Согласно высоким значениям показателя Au/Ag пробность невидимого золота составляет более 950 и, вероятно, очень близка к 1000 [20]. Содержание сульфидов в рудах варьирует от 5% до 15% (в среднем 8—10%). Типоморфный и наиболее

золотоносный рудный минерал — игольчатый арсенипирит — содержит в среднем более 300 г/т золота, максимальные значения превышают 10 000 г/т. В составе арсенипирита по сравнению с эталонным содержится избыточное количество серы (отношение серы к мышьяку — 1,2—1,3). Однако количественно в рудах большинства месторождений преобладает золотосодержащий As-пирит, метакристаллы которого отличаются тонкозональным и блоковым внутренним строением. Среднее содержание невидимого золота в пирите составляет 30—60 г/т.

Существует несколько точек зрения на условия формирования «свободного» золота в этом типе месторождений. Одни исследователи связывают его формирование со структурными особенностями рудоотложения [6; 10], другие — с метаморфизмом упорных руд, ремобилизацией и переотложением [21]. На регенерационную природу золота указывает также округлая или овальная форма его выделений в антимоните и бертьерите, широкое развитие специфических золото-сурьмяных минералов — аурастибита, аурантимонита. Следует отметить, что количество вкрапленных сульфидов практически не изменяется в рудных зонах по простиранию и на глубину, не изменяется и пробность тонкодисперсного золота в них, что определяет сравнительно равномерное распределение позднего регенерированного золота и слабое изменение его пробности в кварц-антимонитовых рудных телах. Изучение золотоносности кварц-антимонитовых жил Майского месторождения позволило установить, что их продуктивность находится в прямой зависимости от концентрации золота в ранних вкрапленных сульфидных рудах [3]. Поэтому весьма вероятно, что кварц-антимонитовые рудные тела с высоким содержанием золота золото-сурьмяных месторождений образовались за счет сопоставимых по концентрации золота вкрапленных руд, а не слабоконцентрированной золотоносной минерализации, как предполагают другие исследователи [13; 14].

### Условия рудообразования

Самым удивительным в строении ЗСМВР является то, что с глубиной (до 1,5 км и более) в рудных телах не обнаружено зональности, свойственной гидротермальным месторождениям [7]. Это позволило выдвинуть гипотезу негидротермального накопления невидимого золота. А повышенные содержания углерода во вмещающих толщах рудных полей позволили связать эти накопления с деятельностью глубинных углеводородных флюидов. В связи с этим в 2000 г. была опубликована статья А. А. Сидорова, И. Н. Томсона «Рудоносность черносланцевых толщ: сближение альтернативных концепций» [22].

«Отсутствие» кварца, связанного с образованием вкрапленных руд (см. рис. 2), послужило основой для представлений о негидротермальном генезисе этого формационного типа оруденения [7; 22]. Однако в геологической литературе периодически появляются публикации, в которых обсуждаются условия

формирования золото-сульфидных вкрапленных руд на основе термобарогеохимических данных [23; 24]. По нашему мнению, последние могут характеризовать условия образования исключительно кварцево-жильного оруденения ЗСМВР. В результате специализированных исследований показано, что формирование золото-сульфидных вкрапленных руд метасоматическим путем в зонах рассланцевания и смятия могло происходить из существенно газовых глубинных рудообразующих флюидов [7]. Об этом также свидетельствует большой вертикальный размах вкрапленного оруденения (см. выше). Последующее образование жильного оруденения могло быть результатом смешения глубинных рудоносных флюидов с метеорными водами на верхних горизонтах [7].

Изотопный состав серы сульфидов ЗСМВР — смешанный, с преобладанием отрицательных значений — показывает, что часть серы могла быть мобилизована из вмещающих пород, а часть поступала из магматических очагов [7; 19]. Кроме того, для этих месторождений отчетливо устанавливается неоднородное распределение изотопного состава серы, отражающее, по-видимому, многоэтапную историю формирования руд. В целом для ЗСМВР характерен сходный изотопный состав серы сульфидов, что свидетельствует о близости условий их формирования.

Изотопные исследования свинца и серы подтверждают предположения, что особенности рудообразования золото-сульфидных месторождений связаны с коровыми и подкоровыми тектоно-магматическими процессами [7; 10]. Формирование золото-сульфидных вкрапленных руд метасоматическим путем в зонах рассланцевания и смятия могло происходить из глубинных рудообразующих флюидов. Об этом свидетельствует большой вертикальный размах вкрапленного оруденения. Последующее образование жильного оруденения могло быть результатом смешения глубинных рудоносных флюидов с метеорными водами на верхних горизонтах.

### Поисковая модель

В табл. 2 сведены некоторые наиболее важные вытекающие из геолого-генетической модели особенности формирования ЗСМВР, которые рекомендуется использовать в качестве прогнозно-поисковых критериев новых объектов. Эта таблица, как и табл. 1, содержит важные составляющие настоящего прогнозно-поискового алгоритма (ППА). Последний представляет собой поисковую модель ЗСМВР (рис. 9).

ППА предназначен для применения на прогнозно-поисковой стадии и заключается в последовательном наборе критериев, направленных на выбор наиболее перспективного участка для постановки геолого-разведочных работ поисковой стадии. Проведение и использование результатов фундаментальных научных исследований, предусмотренные алгоритмом, значительно повышают надежность выбора перспективных участков, сокращают время

Таблица 2. Отличительные признаки ЗСМВР

Критерий	Признак ЗСМВР
Вмещающие породы	Флишевые черносланцевые, иногда карбонатные толщи
Магматические породы	Дайки пестрого состава, субвулканические тела и штоки, взрывчатые брекчии.
Возраст магматических пород	Архей-плиоцен
Степень метаморфизма	Зеленосланцевый (пренитовая фация)
Околорудные изменения	Серицит, анкерит +/- дикит, каолинит
Площадные изменения	Серицит-дикитовые ореолы
Роль углистого вещества	Присутствует, значение не установлено
Текстуры/структуры руд	Вкрапленная, прожилково-вкрапленная, брекчиевая
Размер и пробность золота в россыпях	Россыпи отсутствуют
Пробность рудного золота	90% невидимого золота имеет пробность около 1000 единиц, 10% самородного золота пробностью 800—850 единиц
Золото-серебряное отношение	Обычно более 10:1
Содержание сульфидов	В среднем 8%
Основные сульфиды	Pu >> aspy >> stib
Второстепенные сульфиды	Gal-spl-mo-sulphosalts
Мышьяковая минерализация	Широко распространена
Сурьмяная минерализация	Широко распространена
Медная минерализация	Отсутствует
Ртутная минерализация	Спорадическая
Флюиды	CH <sub>4</sub> CO <sub>2</sub> , существенно газовые
Изотопы серы	Узкий диапазон от 2‰ до -5‰
Температура и давление	220—300°C, 0,5—4,5 кбар
Возраст оруденения	Архей-плиоцен
Геодинамическая обстановка	Орогенная, связанная с коллизией террейнов; островодужная — надсубдукционные вулcano-плутонические пояса; тыловые, задуговые (перивулканические) зоны вулcano-плутонических поясов
Морфология рудных тел	Минерализованные зоны дробления
Тектонический контроль	Тектонический режим сжатия >> растяжения
Структурный контроль	Сателлитные интрузивно-купольные структуры, тектонические блоки, надвига-взбросовые дуплексы
Проницаемость пород	Низкая
Крутопадающие разломы	Обычно взбросы
Пологопадающие разломы	Обычно второстепенные
Надвиги	Значимы на некоторых месторождениях
Глубина формирования	3—10 км
Геофизические методы — магниторазведка и электроразведка	Слабо диагностируются минерализованные зоны, крупные дайки и штоки
Геофизические методы — радиометрия	Диагностируются аномалии мышьяка методом РРА
Геофизические методы — гравиметрия	Предполагается надинтрузивная позиция
Золотодобыча	> 1500 т (в мире)
Запасы и ресурсы	Обычно более 150 т
Среднее содержание	От 3 до 12 г/т

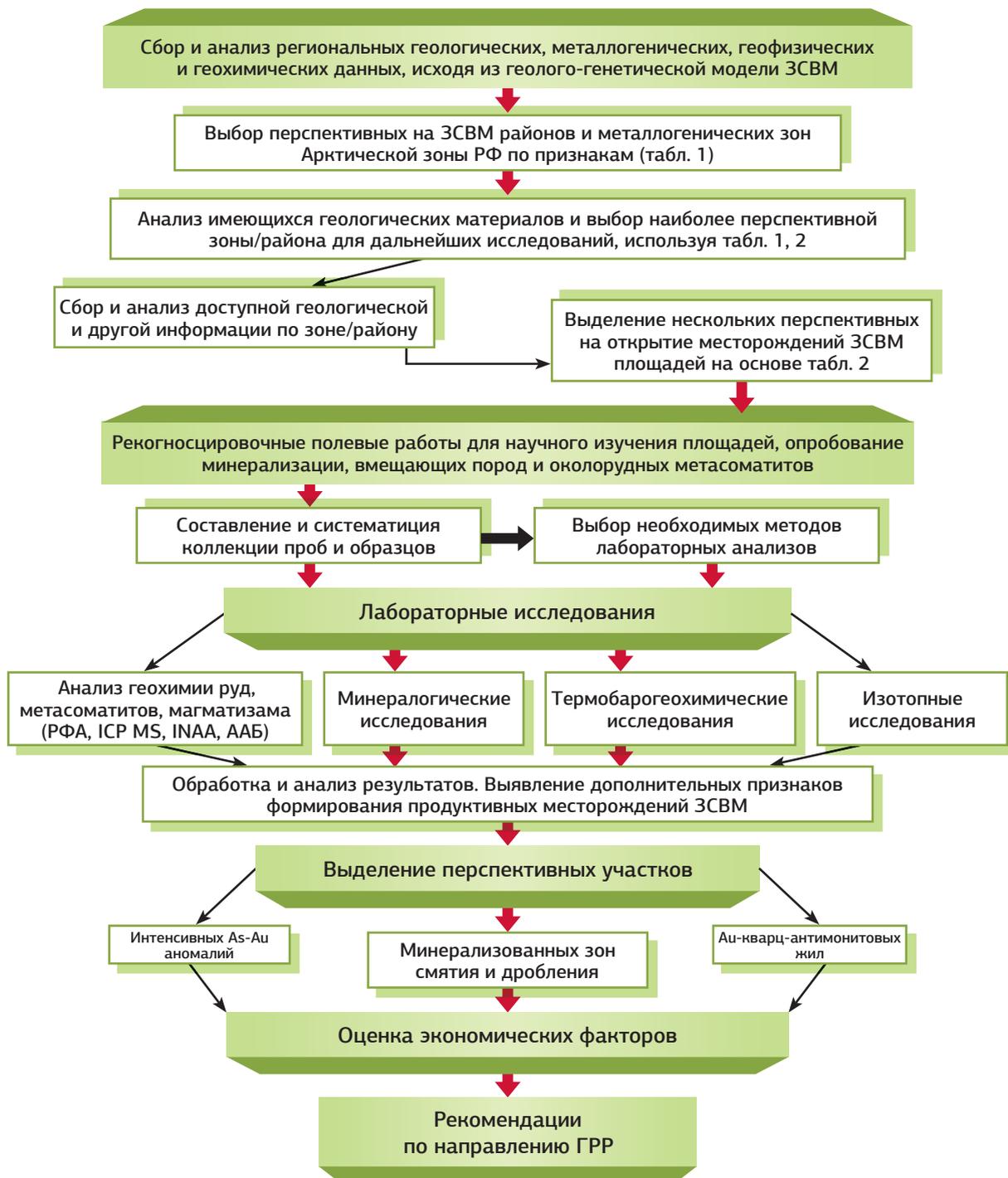


Рис. 9. Прогнозно-поисковый алгоритм ЗСМВР (ГРП – геолого-разведочные работы)

проведения и в конечном итоге уменьшают стоимость прогнозно-поисковых работ. ППА на рис. 9 представлен графически — в виде блок-схемы, как последовательность связанных между собой функциональных блоков, каждый из которых соответствует выполнению одного или нескольких действий.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Президиума РАН «Поисковые

фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации».

**Литература**

1. Berger V. I., Mosier D. L., Bliss J. D. et al. Sediment-Hosted Gold Deposits of the World–Database and Grade and Tonnage Models // Open-File Report 2014–1074, June 2014. — Virginia, Reston: U.S. Geological Survey, 2014. — 46 p.

2. Волков А. В., Сидоров А. А. Уникальный золото-рудный район Чукотки. — Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2001. — 180 с.
3. Волков А. В., Сидоров А. А. Об условиях образования золото-сульфидных вкрапленных руд // Докл. Академии наук. — 2005. — Т. 403, № 2. — С. 220—223.
4. Гамянин Г. Н., Бортников Н. С., Алпатов В. В. Нежданнинское золоторудное месторождение — уникальное месторождение Северо-Востока России. — М.: Геос, 2000. — 222 с.
5. Калинин А. И., Епифанова А. П., Орлов А. Г. Проблема соотношения разных типов золотого и серебряного оруденения в структурах активизации Верхояно-Чукотской складчатой области // Соотношение разных типов оруденения вулканоплутонических поясов Азиатско-Тихоокеанской зоны сочленения. — Владивосток: Дальнаука, 1991. — С. 61—75.
6. Новожилов Ю. И., Гаврилов А. М. Золото-сульфидные месторождения в терригенных углеродистых толщах. — М.: ЦНИГРИ, 1999. — 175 с.
7. Волков А. В. Вкрапленные золото-сульфидные месторождения Северо-Востока России: особенности поисковой геолого-генетической модели // Современные проблемы рудной геологии, петрологии, минералогии и геохимии. — М.: ИГЕМ РАН, 2010. — С. 37—59.
8. Лазарев А. Б., Волков А. В., Сидоров А. А. Рудовмещающие дуплексы золоторудного орогенного месторождения Маломыр (Приамурье) // Геология рудных месторождений. — 2012. — Т. 54, № 6. — С. 513—522.
9. Волков А. В. К генезису золото-сурьмяного оруденения // Тихоокеанская геология. — 1989. — № 6. — С. 84—87.
10. Волков А. В., Сидоров А. А., Гончаров В. И. и др. Золото-сульфидные месторождения вкрапленных руд Северо-Востока России // Геология рудных месторождений. — 2002. — Т. 44, № 3. — С. 179—197.
11. Lang J. R., Baker T., Hart C. J. et al. An exploration model for intrusion related gold systems // SEG Newsletter. — 2000. — № 40. — P. 6—15.
12. Goldfarb R. J., Baker T., Dubé B. et al. Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes // Econ. Geol. — 2005. — 100th Anniversary Vol. — P. 407—450.
13. Амузинский В. А., Анисимова Г. С., Жданов Ю. А. и др. Сарылахское и Сентачанское золото-сурьмяные месторождения. — М.: МАИК «Наука Интерпериодика», 2001. — 270 с.
14. Индолев Л. Н., Жданов Ю. А., Суплецов В. М. Сурьмяное оруденение Верхояно-Колымской провинции. — Новосибирск: Наука, 1980. — 232 с.
15. Степанов В. А., Моисеенко В. Г. Геология золота, серебра и ртути. — Владивосток: Дальнаука, 1993. — 227 с.
16. Richards J. P. Cumulative Factors in the Generation of Giant Calc-Alkaline Porphyry Cu Deposits // Super porphyry copper and gold deposits: A global perspective. — Vol. 1 / T. M. Porter, ed. — Linden Park, South Australia: PGC Publ., 2005. — P. 7—25.
17. Калинин А. И. Золото-кварцевое месторождение Наталка Центрально-Колымского района // Многофакторные прогнозно-поисковые модели месторождений золота и серебра Северо-Востока России. — Л.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 1992. — 140 с.
18. Гончаров В. И., Ващиллов Ю. Я., Сидоров А. А. и др. Глубинное строение крупных благороднометалльных месторождений Северо-Востока Азии // Крупные и суперкрупные месторождения: закономерности размещения и условия образования. — М.: ИГЕМ РАН, 2005. — С. 69—95.
19. Radke A. S., Rye R. G., Dickson P. W. Geology and stable isotope studies of the Carlin gold deposits, Nevada // Econ. Geol. — 1980. — Vol. 75, № 5. — P. 641—672.
20. Бадалов С. Т. О причинах возникновения концентрации золота в сульфидных минералах // Узбек. геол. журн. — 1972. — № 2. — С. 75—82.
21. Гарьковец В. Г. О выделении кызылкумского типа сингенетично-эпигенетических месторождений // Докл. Академии наук СССР. — 1973. — Т. 208, № 1. — С. 163—185.
22. Сидоров А. А., Томсон И. Н. Рудоносность черносланцевых толщ: сближение альтернативных концепций // Вестн. РАН. — 2000. — Т. 70, № 8. — С. 719—724.
23. Прокофьев В. Ю., Крылова Т. Л. Условия формирования разномасштабных золоторудных месторождений Олимпиада и Ведуга (Енисейский Кряж) // Тр. X международной конференции по термобарогеохимии. — Александров: ВНИИСИМС, 2001. — С. 213—248.
24. Гончаров В. И., Сидоров А. А. Термобарогеохимия вулканогенного рудообразования. — М.: Наука, 1979. — 208 с.

### Информация об авторах

Волков Александр Владимирович, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: tma2105@mail.ru.

Сидоров Анатолий Алексеевич, доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: koluma@igem.ru.

### Библиографическое описание данной статьи

Волков А. В., Сидоров А. А. Поисковая модель золото-сульфидных месторождений вкрапленных руд Арктической зоны России // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 2 (26). — С. 62—75.

## EXPLORATION MODEL DISSEMINATED GOLD-SULPHIDE DEPOSITS OF ARCTIC ZONE OF RUSSIA

Volkov A. V., Sidorov A. A.

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS (Moscow, Russian Federation)

### Abstract

In this paper, we present an exploration model, which summarizes the most important characteristics of the gold-sulphide deposits of disseminated ores (GSD). Search model is based primarily on the results of the study GSD Mayskoye (Central Chukotka) and GSD other parts of Russia. At the forefront of geological-genetic model we put the most important, in our view, the indicator factors of GSD. The GSD are formed in various tectono-metallogenic settings. The GSD are characterized by a high gold/silver ratio and a relatively even distribution of gold, present mainly as finely dispersed inclusions in arsenopyrite (As, 1–7%) and Sb-arsenopyrite (Sb, 0.001–0.1%). Gold-bearing sulfides form fine and thin impregnations in the zones of crushing and foliation. The content of these sulfides in ores varies from 5 to 15% (on average, 8–10%). The ores of GSD oxidation zones (weathering crusts) are often of great independent industrial value. Mercurial and antimonial manifestations serve as an important sign of detecting large deposits of gold-sulfide disseminated ores. Consequently, the consistent replacement of viscous plastic deformations, typical of the compression regime, with fragile extension strains occurred in GSD ore-hosting structures. This replacement of tectonic regimes reflects the geodynamic conditions of mineralization, general for all GSDs. The most amazing point in the structure of large GSD is that no zonality, typical of hydrothermal deposits, was detected at depths down to 3 km and deeper in ore bodies, suggesting the hypothesis of nonhydrothermal accumulation of invisible gold. In many countries in GSD have large reserves — the main potential source of gold production. Involvement in the exploitation of new GSD will allow, according to the authors, to increase and stabilize the level of gold production in the Arctic regions of Russia, as in every field can be extracted annually from 5-10 and more tons of gold for decades.

**Keywords:** Arctic zone, deposits, disseminated gold-sulfide ores, invisible gold, refractory ore, the exploration model.

The paper was prepared with financial support under Fundamental Research Program of RAS Presidium “Fundamental research for development of the Arctic zone of the Russian Federation”.

### References

1. Berger V. I., Mosier D. L., Bliss J. D. et al. Sediment-Hosted Gold Deposits of the World—Database and Grade and Tonnage Models. Open-File Report 2014—1074. June 2014. Virginia. Reston: U.S. Geological Survey, 2014, 46 p.
2. Volkov A. V., Sidorov A. A. Unikalnyy zolotorudnyy rayon Chukotki. [Chukotka's Unique Gold Ore Region. Magadan]. Magadan, SVKNII DVO RAN, 2001, 180 p. (In Russian).
3. Volkov A. V., Sidorov A. A. Ob usloviyakh obrazovaniya zoloto-sulfidnykh vkraplennykh rud. [Conditions of the Formation of Disseminated Gold--Sulfide Ores]. Dokl. Akademii nauk, 2005, vol. 403, no. 2, pp. 220—223. (In Russian).
4. Gamyarin G. N., Bortnikov N. S., Alpatov V. V. Nezhdaninskoye zolotorudnoye mestorozhdeniye — unikalnoye mestorozhdeniye Severo-Vostoka Rossii. [Nezhdaninskoe Gold Ore Deposit As a Unique Deposit in the Russian Northeast]. M., Geos, 2000, 222 p. (In Russian).
5. Kalinin A. I., Epifanova A. P., Orlov A. G. Problema sootnosheniya raznykh tipov zolotogo i serebryano-gorudneniya v strukturakh aktivizatsii Verkhoyano-Chukotskoy skladchatoy oblasti. [The problem of correlation of different types of gold and silver mineralization in the structures of activation of the Verkhoyansk-Chukot-ka fold region]. Sootnosheniye raznykh tipov orudneniya vulkanno-plutochnicheskikh pozasov Aziatsko-Tikhookeanskoy zony sochleneniya. Vladivostok, Dalnauka, 1991, pp. 61—75. (In Russian).
6. Novozhilov Yu. I., Gavrilov A. M. Zoloto-sulfidnyye mestorozhdeniya v terrigenykh uglerodistykh tolshchakh. [Gold-Sulfide Deposits in Terrigenous Hydrocarbon Strata]. M., TsNIGRI. 1999, 175 p. (In Russian).
7. Volkov A. V. Vkraplennyye zoloto-sulfidnyye mestorozhdeniya Severo-Vostoka Rossii: osobennosti poiskovoy geologo-geneticheskoy modeli. [Disseminated gold-sulfide deposits in the Russian Northeast: Characteristics of the prospecting geological genetic model]. Sovremennyye problemy rudnoy geologii. petrologii, mineralogii i geokhimii. M., IGEM RAN, 2010, pp. 37—59. (In Russian).
8. Lazarev A. B., Volkov A. V., Sidorov A. A. Rudovmeshchayushchiye dupleksy zolotorudnogo orogennogo mestorozhdeniya Malomyr (Priamurye). [Ore-bearing duplexes at the Malomyr orogenic gold deposit, Amur region]. Geologiya rudnykh mestorozhdeniy, 2012, vol. 54, no. 6, pp. 513—522. (In Russian).
9. Volkov A. V. K genezisu zoloto-surmyanogo orudneniya. [The genesis of gold-antimony mineralization].

- Tikhookeanskaya geologiya, 1989, no. 6, pp. 84—87. (In Russian).
10. Volkov A. V., Sidorov A. A., Goncharov V. I. et al. Zoloto-sulfidnyye mestorozhdeniya vkraplennykh rud Severo-Vostoka Rossii. [Disseminated gold-sulfide deposits in the Russian Northeast]. Geologiya rudnykh mestorozhdeniy, 2002, vol. 44, no. 3, pp. 179—197. (In Russian).
11. Lang J. R., Baker T., Hart C. J. et al. An exploration model for intrusion related gold systems. SEG Newsletter, 2000, no. 40, pp. 6—15.
12. Goldfarb R. J., Baker T., Dubé B. et al. Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes. Econ. Geol., 2005, 100th Anniversary Vol., pp. 407—450.
13. Amuzinskiy V. A., Anisimova G. S., Zhdanov Yu. A. et al. Sarylakhskoye i Sentachanskoye zoloto-surmyanyye mestorozhdeniya. [The Sarylah and Sentachan gold-antimony deposits]. M., MAIK "Nauka Interperiodika". 2001, 270 p. (In Russian).
14. Indolev L. N., Zhdanov Yu. A., Supletsov V. M. Surmyanoye orudneniye Verkhoyano-Kolymskoy provintsii. [Antimony mineralization of Verkhoyansk-Kolyma province]. Novosibirsk, Nauka, 1980, 232 p. (In Russian).
15. Stepanov V. A., Moiseyenko V. G. Geologiya zolota, serebra i rtuti. [The Geology of Gold, Silver, and Mercury]. Vladivostok, Dalnauka, 1993, 227 p. (In Russian).
16. Richards J. P. Cumulative Factors in the Generation of Giant Calc-Alkaline Porphyry Cu Deposits. Super porphyry copper and gold deposits: A global perspective. Vol. 1. T. M. Porter, ed. Linden Park, South Australia, PGC Publ., 2005, pp. 7—25.
17. Kalinin A. I. Zoloto-kvartsevoye mestorozhdeniye Natalka. Tsentralno-Kolymnskogo rayona. [Natalka gold-quartz deposit, Central Kolyma region]. Mnogofaktornyye prognozno-poiskovyye modeli mestorozhdeniy zolota i serebra Severo-Vostoka Rossii. L., Kartfabrika VSEGEI, 1992, 140 p. (In Russian).
18. Goncharov V. I., Vashchilov Yu. Ya., Sidorov A. A. et al. Glubinnoye stroyeniye krupnykh blagorodnometallicheskikh mestorozhdeniy Severo-Vostoka Azii. [Deep structure of large deposits of noble metals of Northeast Asia]. Krupnyye i superkrupnyye mestorozhdeniya: zakonornosti razmeshcheniya i usloviya obrazovaniya. M., IGEM RAN, 2005, pp. 69—95. (In Russian).
19. Radke A. S., Rye R. G., Dickson P. W. Geology and stable isotope studies of the Carlin gold deposits. Nevada. Econ. Geol., 1980, vol. 75, no 5, pp. 641—672.
20. Badalov S. T. O prichinakh vozniknoveniya kontsentratsii zolota v sulfidnykh mineralakh. [About the causes of the concentration of gold in sulphide minerals]. Uzbek. geol. zhurn., 1972, no. 2, pp. 75—82. (In Russian).
21. Garkovets V. G. O vydelenii kyzylkumskogo tipa singenetichno-epigeneticheskikh mestorozhdeniy. [On the selection of Kyzylkum-type syngenetically epigenetic deposits]. Dokl. Akademii nauk SSSR, 1973, vol. 208, no. 1, pp. 163—185. (In Russian).
22. Sidorov A. A., Tomson I. N. Rudonosnost chernoslantsevyykh tolshch: sblizheniye alternativnykh kontseptsiy. [Ore-bearing in black shale sequence: The convergence of alternative concepts]. Vestn. RAN, 2000, vol. 70, no. 8, pp. 719—724. (In Russian).
23. Prokofyev V. Yu., Krylova T. L. Usloviya formirovaniya raznomasshtabnykh zolotorudnykh mestorozhdeniy Olimpiada i Veduga (Eniseyskiy Kryazh). [The formation of gold deposits of different scales Olimpiada and Veduga (Yenisei Ridge)]. Tr. Kh. mezhduнародnoy konferentsii po termobarogeokhimi. Aleksandrov, VNIISIMS, 2001, pp. 213—248. (In Russian).
24. Goncharov V. I., Sidorov A. A. Termobarogeokhimiya vulkanogennoy rudoobrazovaniya. [Volcanogenic mineralization thermobarogeochemistry]. M., Nauka, 1979, 208 p. (In Russian).

### Information about the authors

Volkov Alexander Vladimirovich, Doctor of Geologo-Mineralogical Sciences, Chief Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS (35, Staromonetny per., Moscow, 119017, Russia), e-mail: tma2105@mail.ru.

Sidorov Anatoliy Alekseyevich, Doctor of Geologo-Mineralogical Sciences, Corresponding member RAS, Chief Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS (35, Staromonetny per., Moscow, 119017, Russia), e-mail: koluma@igem.ru.

### Bibliographic description

Volkov A. V., Sidorov A. A. Exploration model disseminated gold-sulphide deposits of Arctic zone of Russia. The Arctic: ecology and economy, 2017, no. 2 (26), pp. 62—75. (In Russian).