

УДК 553.44

А.Л. Дергачев<sup>1</sup>, Н.И. Еремин<sup>2</sup>

## ВУЛКАНОГЕННЫЕ КОЛЧЕДАННЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ БОГАТЫХ ЗОЛОТОМ РУД

В рудах вулканогенных колчеданных месторождений содержатся не только Cu, Zn, Pb, но и Sb, Bi, Te, Se, Ag, Co и другие металлы, а также переменное количество Ag и Au. В некоторых из них запасы Au превышают 100 т, а среднее содержание может достигать десятков г/т. На основе оригинальной базы данных предложены статистические критерии для выделения месторождений с крупными запасами и (или) аномально высоким содержанием Au в рудах. Исследованы некоторые особенности месторождений богатых Au руд, в том числе распределение в геологическом времени и между важнейшими колчеданоносными провинциями, а также ассоциация с палеовулканическими структурами, геохимические и минералогические особенности руд и причины их обогащения золотом.

*Ключевые слова:* золото, вулканогенные колчеданные месторождения, цветные металлы, месторождения богатых золотом руд.

Volcanogenic massive sulfide deposits contain Cu, Zn, Pb, Sb, Bi, Te, Se, Ag, Co and variable amounts of Ag and Au. In some of them gold reserves exceed 100 t while gold grades reach several dozens ppm. Original data base was used to establish statistically meaningful criteria for identification of deposits with large gold reserves and/or anomalously enriched in gold. Some peculiar features of deposits with high Au grades were investigated including distribution in geological history and among the principal metallogenic provinces, association with volcanogenic formations and paleovolcanic structures, geochemical and mineralogical features and factors that caused enrichment in gold.

*Key words:* gold, base metals, volcanogenic massive sulfide deposits, deposits of rich gold ores.

**Введение.** Вулканогенные колчеданные месторождения (VMSD) образуют важнейший промышленный тип месторождений Cu, Pb, Zn и вносят существенный вклад в мировые запасы этих полезных ископаемых. Вместе с тем в рудах этих полиметаллических месторождений в качестве второстепенных компонентов встречаются Sb, As, Bi, Se, Te, Ni, Co и другие металлы, содержание которых делает их попутное извлечение экономически эффективным. Среди них важнейшая роль принадлежит Ag и особенно Au из-за высокой стоимости этих металлов. Золоту в рудах VMSD, в том числе в их современных аналогах на океаническом дне, посвящена обширная литература. Наибольшее внимание исследователей традиционно привлекают минералого-геохимические аспекты, в частности, минеральные формы нахождения Au; распределение его в пределах рудных тел; минералогические особенности руд, богатых золотом; геохимические причины его концентрации и т.д. (например [Sillitoe et al., 1996; Hannington et al., 1999; Huston, 2000; Еремин и др., 2000; Сергеева и др., 2010]). Многочисленны публикации, посвященные геологическому строению конкретных месторождений с крупными запасами золота и (или) с рудами, богатыми Au [Arnold, Sillitoe, 1989;

Weihed et al., 1996; Haley, Roberts, 1997; Sherlock et al., 1999; Callaghan, 2001; Dube et al., 2007].

Парадоксально, но обобщающие работы, в которых рассматривались бы геологические особенности таких месторождений, относительно редки и либо основаны на данных о единичных месторождениях, либо рассматривают группы месторождений какой-то отдельной колчеданоносной провинции или страны, например Канады [Dube et al., 2007], либо концентрируются в большей мере на формально-статистических аспектах анализа их крупных выборок [Mercier-Langevin et al., 2011].

Между тем важное, в том числе прикладное, значение имеет обобщение данных о геотектонических обстановках образования VMSD, крупных по запасам и богатым золотом, о распределении их по подтипам колчеданных месторождений, связи их с теми или иными вулканогенными формациями, фациями вулканитов, глобальными эпохами колчеданообразования, месте таких месторождений в истории развития вулканизма в соответствующих рудных районах. Обобщению данных такого рода должно предшествовать составление базы данных колчеданных месторождений мира, а также разработка на ее основе статистически обоснованных критериев выделения месторождений, характе-

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых, докт. геол.-минерал. н., профессор; *e-mail:* alderg@geol.msu.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых, докт. геол.-минерал. н., профессор, чл.-корр. РАН; *e-mail:* eremin@geol.msu.ru

ризующихся высоким содержанием Au в рудах. Такая база данных была составлена на основе публикаций, а также результатов личных исследований авторов в колчеданосных рудных районах России и Казахстана (Рудный Алтай), а также в зеленокаменном поясе Абитибид (Канада) и районе Хокуроку в Поясе Зеленых Туфов (Япония) и на Южном Урале.

**Критерии выделения VMSD с высоким содержанием Au в рудах.** Из 1280 месторождений, учтенных в базе данных, сведения о запасах и среднем содержании золота имеются для 807 колчеданных месторождений с суммарными запасами 11,16 млрд т руд, содержащих свыше 11 тыс. т Au. Распределение месторождений между типами куроко, уральским, кипрским и бесси [Еремин и др., 2000] примерно отвечает распределению между ними VMSD вообще: тип куроко представлен в базе данных «VMSD-Au» 358 месторождениями, уральский — 329, бесси — 68, кипрский — 51. Таким образом, на результаты анализа базы данных не могла повлиять, например, слишком высокая концентрация в ней месторождений какого-то одного типа. Для 50% месторождений в базе данных запасы не превышают 2 т, а для 80% — 13 т Au. Среднее содержание металла в рудах 50% VMSD не достигает даже 0,8 г/т, а для 80% не превышает 2 г/т. Таким образом, по сравнению с собственно золоторудными месторождениями VMSD обычно намного меньше по запасам и намного беднее. Это означает, что для их классификации по масштабам запасов и среднему содержанию Au необходимы особые статистически обоснованные критерии.

Среднее содержание золота в рудах отдельных VMSD ( $C_{Au}$ , г/т) колеблется от 0,01 до 45,97 г/т, а запасы Au ( $Q_{Au}$ , т) — от нескольких десятков килограммов до 562 т. Установлено, что и содержание, и запасы подчиняются логнормальному распределению, поэтому для более точной характеристики выборки использовались не средние арифметические, а их средние геометрические значения (0,71 г/т и 1,88 т Au) и стандартные отклонения среднего геометрического значения (+2,79 г/т и +42,93 т Au). К месторождениям с богатыми рудами были отнесены те, в которых содержание Au превышало среднее геометрическое значение на величину стандартного отклонения ( $C_{Au} \geq 3,5$  г/т). Этот критерий выполняется для 70 месторождений (менее 9% от их числа в базе данных), они вносят лишь 5,6% в суммарные запасы колчеданных руд, но 20,7% в запасы Au. Аналогичным образом крупными по запасам металла считаются месторождения, для которых  $Q_{Au} \geq 44,8$  т. Таких месторождений насчитывается 58 (7%), в них содержится 47,9% суммарных запасов колчеданных руд, но при этом 63,8% запасов золота.

На основе предложенных критериев диаграмма  $Q_{Au}-C_{Au}$  разделяется на четыре поля, которым отвечают особые группы месторождений. Около

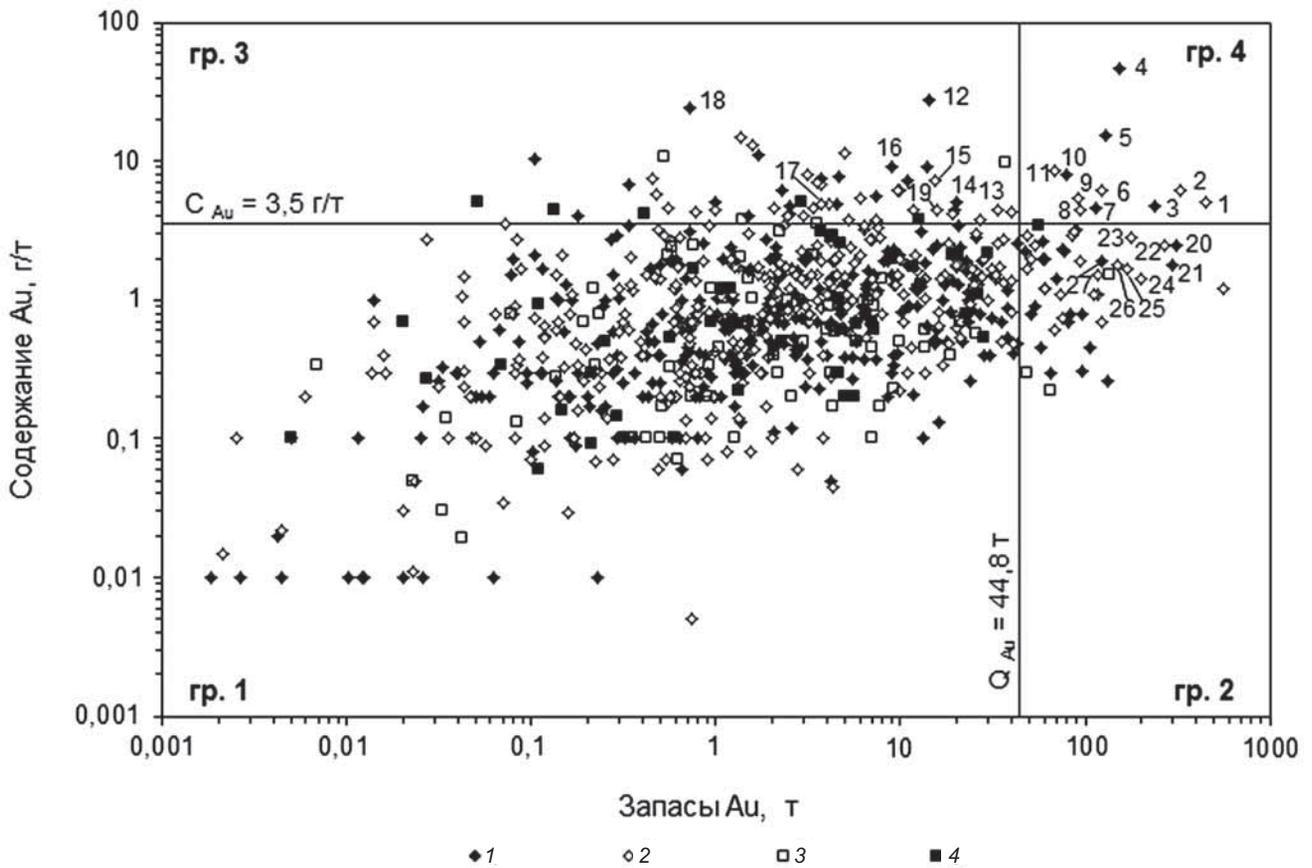
85% (689 из 807) месторождений с 51% запасов руды и 32% запасов Au попадают в поле 1 ( $Q_{Au} < 44,8$  т,  $C_{Au} < 3,5$  г/т); они обладают малыми запасами металла и рядовым содержанием Au и не представляют особого интереса для дальнейшего анализа.

Группу 2 ( $Q_{Au} \geq 44,8$  т,  $C_{Au} < 3,5$  г/т) образуют 47 месторождений (5,8%), которые обладают крупными или очень крупными запасами руды (от 16 до 513 млн т), в том числе 20 из 24 месторождений с запасами свыше 100 млн т руды (Рио-Тинто, Ла Зарза, Тарсис, Алжустрел и Маса-Вальверде в Иберийском Колчеданном поясе, Гайское, Сибайское, Юбилейное (Башкортостан), Учалинское и др. на Южном Урале, Маунт Лайель в Австралии, Риддер-Сокольное на Рудном Алтае и др.) (рисунок).

**Особенности VMSD с рудами, обогащенными Au.** Наибольший интерес для дальнейшего анализа представляют 70 месторождений группы 3 ( $Q_{Au} < 44,8$  т,  $C_{Au} \geq 3,5$  г/т) и 4 ( $Q_{Au} \geq 44,8$  т,  $C_{Au} \geq 3,5$  г/т), руды которых обогащены Au. Их примеры встречаются практически во всех наиболее крупных колчеданосных провинциях, но особенно многочисленны они в неогархейской провинции Абитибид (11 месторождений), палеопротерозойских Трансгудзонском (4 месторождения в районе Флин-Флон — Сноу Лейк) и Свекофеннском поясах (6 месторождений, в том числе 4 в рудном районе Шеллефте), а также в палеозойских провинциях: Аппалачской (5), Иберийском Колчеданном поясе (3), на Южном Урале (4) и Рудном Алтае (2).

Месторождения обогащенных Au руд не входят в число крупнейших по запасам руды (на 32 из них они не достигают даже 1 млн т), цветных металлов (исключение составляют месторождения Хорн Н-Г в провинции Абитибид и Гринз Крик в Северных Кордильерах) и отличаются крайне малыми запасами Au. По-видимому, условия, благоприятствовавшие концентрированию золота, возникали в пределах относительно небольших геологических структур и (или) в течение относительно непродолжительных периодов времени.

Группу 4 образуют 11 месторождений, в том числе 5 неогархейских в рудных районах Норанда (в том числе Хорн Н-Г; 328 т, 6,1 г/т Au) и Буске (в том числе Ла Ронд-Пенна; 445 т, 5,1 г/т Au) в провинции Абитибид, неогархейские месторождения Фарлей Лейк (123 т, 6,1 г/т Au) в зеленокаменном поясе Линн Лейк Трансгудзонского пояса и Болиден (129 т, 15,5 г/т Au) в рудном районе Шеллефте Свекофеннского пояса (Северная Швеция), а также палеозойские месторождения Салгадиньо (80 т, 8 г/т Au) в Иберийском колчеданном поясе и Маунт Морган в Австралии (238 т, 4,8 г/т Au), мезозойские месторождения Эски Крик в поясе Интермонтана в Британской Колумбии (уникальное по качеству руд, 154 т, 46 г/т Au) и Гринз Крик в террейне Александра на Аляске (113 т, 4,7 г/т Au).



Вулканогенные колчеданные месторождения групп 1–4 на диаграмме  $Q_{Au}-C_{Au}$ . Типы месторождений: 1 — куроко, 2 — уральский, 3 — бесси, 4 — кипрский. Цифрами обозначены месторождения, упомянутые в тексте: 1 — Ла Ронд–Пенна, 2 — Хорн Н-Г, 3 — Маунт Морган, 4 — Эски Крик, 5 — Болиден, 6 — Фарлей Лейк, 7 — Гринз Крик, 8 — Буске № 1, 9 — Кемон, 10 — Салгадиньо, 11 — Буске № 2, 12 — Генти–Маунт Джулия, 13 — Первомайское, 14 — Змеиногорское, 15 — Думагами, 16 — Зареченское, 17 — Ла Плата, 18 — Камиисо, 19 — Балта-Тау, 20 — Риддер-Сокольное, 21 — Ла Зарза, 22 — Юбилейное, 23 — Флин-Флон, 24 — Хорн № 5, 25 — Подольское, 26 — Узельгинское, 27 — Карибу

Наиболее значительные и хорошо изученные фанерозойские VMSD богатых золотом руд формировались в пределах энсиалических или энсиматических вулканических дуг или задуговых бассейнов различного возраста. С поправкой на изменяющееся соотношение процессов плюм-тектоники и плейт-тектоники при формировании зеленокаменных поясов и специфику тектонических процессов в раннем докембрии можно предполагать, что в сходных обстановках формировались и обогащенные золотом колчеданные архейские и палеопротерозойские месторождения.

подавляющее большинство колчеданных месторождений с рудами, богатыми Au, возникло на ранних стадиях рифтогенеза в пределах вулканических дуг или в задуговых прогибах, связано с контрастными или непрерывными вулканогенными формациями и залегает среди пород известково-щелочных или промежуточных между толеитовыми и известково-щелочными и представлено типами уральским (36 месторождений) и куроко (26 месторождений), включая их докембрийские аналоги. Именно к этим типам относятся месторождения групп 3 и 4, демон-

стрирующие наивысшее для VMSD обогащение золотом, в частности (г/т) Таллапуса (15), Болиден (15,5), Камиисо (24,0), Генти–Маунт Джулия (27,6), Эски Крик (46,0).

Лишь около 11% месторождений богатых Au руд ассоциирует с недифференцированными базальтоидными формациями (типы бесси и кипрский представлены соответственно 3-мя и 5-ю месторождениями). Они вообще отсутствуют в группе 4, а в поле группы 3 расположены вдоль нижней границы, поскольку все они содержат лишь немногим более 3,5 г/т Au. В то же время с учетом различной численности месторождений разных подтипов в базе данных оказывается, что среди месторождений уральского типа обогащены Au 10,9% месторождений, кипрского — 11,1%, куроко — 7,3%, бесси — 5,9%. Таким образом, при поисковых работах в районах распространения колчеданных месторождений основных типов (кроме бесси) вероятность появления среди открываемых месторождений рудных объектов, обогащенных Au, приблизительно одинакова.

Месторождения богатых золотом руд возникли практически в каждую главную эпоху

колчеданообразования [Еремин и др., 2002]. С архейско-палеопротерозойской эпохой связаны 12 месторождений — аналогов уральского типа, отвечающих неоархейскому максимуму образования VMSD (2730–2690 млн лет) и расположенных в зеленокаменных поясах Абитиби (11 месторождений, в том числе Хорн Н-Г, Кемон, Делдона, Инмонт в рудном районе Норанда, Ла Ронд-Пенна, Буске № 1, Думагами в рудном районе Буске и др.) и Вава в провинции Сьюперитор Канадского щита. Крупнейшие по запасам в этой группе древнейших месторождений с рудами, обогащенными Au, — Ла Ронд-Пенна и Хорн Н-Г.

В палео-мезопротерозойскую эпоху (2200–1350 млн лет) крупному палеопротерозойскому пику колчеданообразования (1890–1850 млн лет) отвечали 8 месторождений — аналогов уральского типа в зеленокаменных поясах Флин-Флон–Сноу Лейк, Линн Лейк и Ла Ронж Трансгудзонского пояса и в районе Джером (Аризона), а также 6 месторождений — аналогов типа куроко в рудных районах Бергслаген и Шеллефте и поясе Эйяля–Ориярви Свекофеннского пояса. Крупнейшие по запасам богатых золотом руд, образовавшихся в эту эпоху, — месторождения Болиден в районе Шеллефте и Фарлей Лейк в поясе Линн Лейк.

Всплеск колчеданного рудообразования в неопротерозойско-раннемезозойскую эпоху (900–200 млн лет) пришелся на кембрий–ордовик (570–472 млн лет) и девон–средний карбон (416–330 млн лет), когда возникло 21 месторождение богатых золотом руд, из которых 8 относятся к уральскому типу (например, Балта-Тау, Майское, Первомайское, Восточно-Семеновское на Урале) и 13 — к типу куроко (в том числе Змеиногорское, Зареченское на Рудном Алтае, Рамблер-Мейн в Аппалачах, Вуэльта-Фалса, Ломеро-Поятос, Салгадиньо в Иберийском Колчеданном поясе, Генти–Маунт Джулия на Тасмании). Позднее, в пермское время, сформировалось месторождение Маунт Морган (237 т, 4,75 г/т Au) в Австралии, а в позднем триасе — Гринз Крик (113 т, 4,7 г/т Au) в Северных Кордильерах.

В незавершенную мезозойско-кайнозойскую эпоху рудообразования (после 200 млн лет назад) возникли 20 месторождений 3 и 4 групп, относящихся к типам кипрскому (4 месторождения в Северных Кордильерах, в том числе Тернер-Албрайт в горах Кламат), уральскому (8 месторождений в Северных и Южных Кордильерах и Филиппинской дуге, в том числе Ла Плата в Эквадоре и др.), куроко (6 месторождений, расположенных в основном в Северных Кордильерах и в Поясе Зеленых Туфов на о. Хоккайдо, а также в пределах Филиппинской и Карибских дуг) и бесси (по одному месторождению на Кубе и в Папуа–Новой Гвинее). Крупнейшее по запасам для этого периода — месторождение Эски Крик в Британской Колумбии (154 т, 46,0 г/т Au).

#### *Позиция в палеовулканических структурах.*

В пределах разновозрастных рудных районов VMSD с богатыми золотом рудами обнаруживают пространственную связь с локальными центрами кислого подводного вулканизма, наиболее очевидную на более молодых слабометаморфизованных месторождениях.

Так, месторождение Эски Крик, аномально богатое Au и одно из крупнейших в семействе VMSD по его запасам, залегает в раннеюрском вулканогенном разрезе и расположено в пределах крупного вулканического центра, в состав которого входит несколько экструзивно-лавовых риолитовых куполов, прорванных субвулканическими телами многочисленных генераций [Monecke et al., 2005]. Его стратиформная залежь богатых Au сульфидно-сульфосольных руд обломочного строения залегает непосредственно над массивными, брекчиевыми и флюидалными риолитами и глыбовыми риолитовыми брекчиями — продуктами фреатических взрывов при взаимодействии горячей твердевшей корки на поверхности потоков риолитовых лав или экструзивных тел с морской водой или под воздействием находившихся под высоким давлением гидротермальных растворов. В верхней части разреза брекчии риолитов подверглись метасоматическим изменениям (окварцеванию, серицитизации, хлоритизации) и несут прожилково-вкрапленную рудную минерализацию, а на отдельных участках разреза они цементируются аргиллитами.

Надрудная толща представлена горизонтом аргиллитов мощностью от 5 до 20 м, выше которого по разрезу залегает мощная (>70 м) пачка переслаивания аргиллитов (мощность отдельных прослоев до 5–7 м) и массивных (реже брекчиевых) базальтовых лав с полимиктовыми брекчиями в кровле потоков (мощность отдельных потоков достигает 10 м и более) и продуктами их разрушения (нестратифицированными брекчиями базальтов с осадочным цементом).

Судя по наличию обломков руды в составе фреато-гидротермальных брекчий риолитов, позиции стратиформных рудных тел непосредственно в их кровле и признакам внедрения встречающихся местами риолитовых силлов, позднее подвергшихся гидротермальным изменениям, в еще неконсолидированные и водонасыщенные брекчии на контакте их с аргиллитами, процессы рудообразования были тесно связаны с извержениями кислой магмы не только пространственно, но и во времени. Признаки гидротермальных изменений надрудных базальтов свидетельствуют о том, что гидротермальный процесс продолжался и после смены характера вулканических извержений.

Сходная структурная позиция согласных пластообразных рудных тел в разрезе палеовулканических структур, аналогичные пространственно-временные соотношения процессов кислого

вулканизма и рудообразования, характерная смена кислого вулканизма основным или накоплением горизонтов осадочных пород описаны для ряда рудных провинций и множества типичных VMSD, как богатых золотом (например, Болиден, Ла Ронд-Пенна, Эски Крик, Ла Плата [Allen et al., 1997; Dube et al., 2007; Chiaradia et al., 2008]), так и рядовых по содержанию этого металла (в частности [Палеовулканический анализ..., 1984]).

**Зоны гидротермальных изменений околорудных пород.** Большинство VMSD, обогащенных Au, относится к проксимальным и расположено непосредственно над рудоподводящими каналами, которые выражены ореолами гидротермально-метасоматических изменений пород и дискордантными зонами кварц-сульфидных прожилков и вкрапленности в лежащем боку пластовых рудных тел. Однако они различаются по характеру гидротермально-метасоматических изменений пород.

Так, на месторождении Ла Ронд-Пенна подрудные субсогласные и секущие зоны развития ассоциаций кварц — биотит — Mn-гранат (в проксимальной зоне) или кварц — Mn-гранат — Zn-ставролит — хлоритоид — биотит — мусковит — хлорит (внешняя зона) с прожилками и густой вкрапленностью пирита и халькопирита рассматриваются как метаморфизованные аналоги зон интенсивной аргиллизации [Dube et al., 2007]. Аналогичную природу могут иметь андалузит-серицит-кварцевые изменения известково-щелочных дацитов и риодацитов на месторождении Болиден и андалузит-кианит-пирофиллитовые изменения рудовмещающих пород месторождений Буске-1, Буске-2 и Думагами в провинции Абитибби.

Такие изменения могли быть вызваны выщелачиванием из кислых вулканогенных пород всех компонентов ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ), кроме наиболее инертных в химическом отношении  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ , под влиянием агрессивных кислых (имевших низкие величины pH), относительно окисленных растворов, иногда содержащих серу, которые имели магматическое происхождение или образовывались при вскипании растворов в условиях мелководья. Такие вулканогенные колчеданные месторождения, обогащенные Au, напоминают высокосульфидные эпитеральные месторождения золота.

Для месторождения Эски Крик, напротив, характерны субсогласные зоны интенсивной хлоритизации и мусковитизации, а в глубоких частях штокверковой зоны — калишпатизация и умеренное окварцевание подрудных пород [Roth et al., 1999].

**Геохимия и минералогия руд.** Группы 3 и 4 включают как медноколчеданные (например, Хорн Н-Г, Болиден, Салгадиньо, Камиисо), так и медно-цинковые (Ла Ронд-Пенна, Фото Лейк, Кемон и др.) и колчеданно-полиметаллические месторождения (Змеиногорское, Зареченское, Ну-

рукава и др.). Между составом руд и содержанием Au отсутствует четкая корреляционная связь.

На многих VMSD, относящихся к группам 3 и 4, колчеданные руды, обогащенные Au, содержат необычно много Hg, Sb, As, Bi, Te, Se, Ag. Содержание Ag может достигать 2224 г/т (например, на месторождении Эски Крик). Лишь в исключительных случаях руды содержат меньше Ag, чем Au, и величина отношения Ag/Au не достигает 1 (Маунт Морган, Думагами, Генти—Маунт Джулия); обычно этот показатель изменяется от 2 до 128, а в среднем составляет 16.

К главным минералам руд месторождений групп 3 и 4 относятся широко распространенные пирит, сульфиды цветных металлов (халькопирит, сфалерит, галенит); реже в них встречаются пирротин, теллуриды, арсенопирит, борнит, самородные элементы и другие минералы. Сравнительно простым минеральным составом отличаются относящиеся к группе 3 богатые Au месторождения типов кипрского и бесси. Но большинство месторождений групп 3 и 4 относятся к куроко и уральскому типам и характеризуется намного более сложным минеральным парагенезисом (в рудах месторождения Болиден, например, установлено около 50 рудных минералов). Однако не исключено, что относительная сложность минерального состава обогащенных Au руд (в частности, [Hannington et al., 1999]) — просто результат более глубокого изучения минералогии руд, обогащенных благородными металлами.

Характерные минералы руд таких месторождений представлены арсенопиритом, As-содержащим пиритом, борнитом, теннантит-тетраэдритом, сложными сульфосолями (бурнонит, буланжерит, фрейбергит, фрейеслебенит, миаргирит, полибазит, пираргирит, прустит, стефанит, физелиит, джемсонит, ленгебахит), теллуридами Pb, Ag, Bi, Hg (алтаит, гессит, теллуровисмутит, колорадоит), Cu-Sn сульфидами (моусонит, станнин), нередко антимонит, реальгар, киноварь, барит,  $\text{Te}_{\text{сам}}$ ,  $\text{Ag}_{\text{сам}}$ ,  $\text{Bi}_{\text{сам}}$ . Золото представлено  $\text{Au}_{\text{сам}}$ , электрумом, который часто обогащен Ag, Au или Hg [Huston et al., 1992], аурустибитом, широко распространенными теллуридами Au или Au-Ag (калаверит, сивьянит, петцит, креннерит) и «невидимым» золотом в пирите, арсенопирите, As-содержащем пирите. Лишь некоторые минералы из этого парагенезиса могут в небольшом количестве встречаться в относительно бедных золотом ( $C_{\text{Au}} < 3,5$  г/т) рудах некоторых месторождений групп 1 и 2. Так, теллуриды Au установлены, например, на 2% месторождениях группы 1 и на 20% месторождений группы 2, но по-настоящему типичны они именно для месторождений группы 4 (>50% месторождений).

Характерны в этом отношении месторождения по существу сульфидно-сульфосольных руд Эски Крик в Британской Колумбии и Зареченское на Рудном Алтае. Руды последнего в качестве главных

минералов наряду с борнитом и халькозином содержат блеклую руду (теннантит); другие сульфосоли (тетраэдрит, стефанит, энаргит), теллуриды (алтаит), а также сульфиды (пирит, марказит, арсенопирит, аргентит, штроемейерит) и электрум входят в число второстепенных минералов; к редким, кроме ялпаита, относятся сульфосоли (бурнонит, полибазит, ленгенбахит), теллуриды Ag и Au (гессит, сильванит), самородные Au, Ag, Te. На месторождении Эски Крик в составе стратиформной рудной залежи наряду с обычными сульфидами (пиритом, галенитом, сфалеритом) широко распространены антимонит, реальгар, киноварь и арсенопирит с переменным количеством барита и сульфосолей (тетраэдрита, джемсонита, бурнонита, буланжерита, фрейбергита), а золоторудная минерализация представлена электрумом и Au<sub>сам</sub>.

На некоторых хорошо изученных в минералогическом отношении месторождениях богатых Au руд установлено доминирование одной или двух главных минеральных форм нахождения Au среди прочих. Так, на месторождении Ла Ронд–Пенна 90% золота сосредоточено в электруме; на Зареченском месторождении этот же минерал входит в число второстепенных, тогда как Au<sub>сам</sub> и теллуриды Au относятся к редким; на месторождении Болиден большая часть золота представлена электрум-амальгамой. Вместе с тем анализ выборки из 70 месторождений 3-й и 4-й групп не подтверждает вывод [Hannington et al., 1999] о преимущественном нахождении Au<sub>сам</sub> и теллуридов Au в рудах существенно медного состава и электрума — в Cu-Zn и Cu-Zn-Pb рудах.

**Причины обогащения руд золотом.** В отношении природы золоторудной минерализации в рудах VMSD альтернативные позиции представлены предположениями о ее первичном происхождении или о ее связи с поздними метаморфическими преобразованиями руд и вмещающих пород. Действительно, некоторые месторождения обогащенных Au руд находятся в зонах крупных разломов среди пород, подвергшихся интенсивным деформациям и глубокому метаморфизму. Поэтому одно из возможных объяснений высокого содержания золота в рудах VMSD заключается в наложении золоторудной минерализации на обычные по содержанию Au колчеданные руды в процессе региональных деформаций и метаморфизма высоких фаций. Это предположение находит подтверждение, например, на месторождении Болиден в районе Шеллефте [Weihed et al., 1996], где вмещающие породы метаморфизованы до амфиболитовой фации, а золотом обогащены в основном сульфидные руды вблизи зон пострудных разломов, по которым смещены отдельные участки рудных тел.

На ряде других месторождений к свидетельствам возможного наложенного характера золоторудной минерализации относятся приуроченность ее к зонам интенсивного динамометаморфизма (в

частности, к региональным разломам), наличие сульфидных жил, косо ориентированных по отношению к региональному расщеплению, а также рудных тел, залегающих согласно по отношению к нему. Однако многие VMSD, относящиеся к группам 3 и 4, испытали очень слабый региональный метаморфизм. Среди многочисленных примеров — эоценовые месторождения Западной Кордильеры в Эквадоре (в том числе Ла Плата), залегающие среди вулканогенных пород риолит-базальтовой формации, которые подверглись региональному метаморфизму цеолитовой фации [Chiaradia et al., 2008], позднедевонско-раннемеловое месторождение Ломеро-Пойтос в Иберийском Колчеданном поясе и юрские месторождения Тернер-Албрайт в Северных Кордильерах (горы Клатат), а также уникальное по содержанию золота месторождение Эски Крик в поясе Интермонтана в Британской Колумбии среди пород пренит-пумпеллиитовой фации регионального метаморфизма [Sherlock et al., 1999; Monecke et al., 2005].

На месторождении Эски Крик основная часть запасов сосредоточена в стратиформных рудных телах на контакте углистых аргиллитов и нижележащих риолитов. Зона 21А включает стратифицированные линзы нередко сплошных сульфидных руд, содержащих большое количество антимонита, реальгара и киновари. Зона 21В представлена обломочными Zn-Pb-Au-Ag сульфидно-сульфосольными (антимонит, арсенопирит, пирит, сфалерит, галенит, тетраэдрит) рудами с градиционной слоистостью, стратиграфически ниже которых установлена прожилковая и вкрапленная минерализация в хлоритизированных, окварцованных и серицитизированных кислых вулканогенных породах. При формировании этих руд, очевидно, происходило переотложение обломков руд, уже содержащих богатую первичную золоторудную минерализацию.

На неорархейском месторождении Хорн Н-С в районе Норанда признаком первичного происхождения богатой золоторудной минерализации в составе залежи сплошных богатых Cu-Au колчеданных руд мощностью несколько десятков метров является, в частности, наличие крупных глыб сплошных сульфидных руд, обогащенных Au, в перекрывающих залежь пирокластических образованиях, лишенных иной рудной минерализации. Рудокласты богатых золотом руд (до 6 г/т Au) установлены и в надрудной толще месторождения Ла Ронд-Пенна. Таким образом, на многих и, возможно даже на большинстве VMSD, обогащение колчеданных руд золотом имеет первичную природу и происходило на синвулканическом этапе в процессе колчеданообразования.

На тех из упомянутых месторождений, которые подверглись глубокому региональному метаморфизму и деформациям, имели место искажения первичной морфологии рудных тел, локальная

ремобилизация и переотложение цветных металлов и золота на узких участках (например, на месторождении Ла Ронд-Пенна, относящемся к группе 4 [Dube et al., 2007], а также на находящихся в том же рудном районе месторождениях Буске № 2 и Думагами). Сообщается, например, о синдеформационных золотосодержащих халькопиритовых жилах, которые близки по минеральному составу первичным рудам месторождений и залегают среди них, а также об отчетливых структурных признаках переотложенной природы минералов Ag, Pb, Bi, Sb и Au в халькопиритовых прожилках, где зерна этих минералов окружают крупные порфиробласты пирита. Однако нет никаких свидетельств переноса ремобилизованных компонентов первичных руд на значительное расстояние за пределы рудных тел.

Более того, процессы деформации и региональный метаморфизм даже не нарушили свойственное слабометаморфизованным VMSD зональное распределение Cu, Zn, Pb, Au, Ag в разрезе рудных тел. Так, на подвергшемся сильным деформациям месторождении Генти–Маунт Джулия в Тасмании [Halley, Roberts, 1997], как и на многих слабометаморфизованных месторождениях, наиболее высокое содержание Au установлено в стратиграфически лежащем боку эксгальционно-осадочных образований (серноколчеданных и колчеданно-полиметаллических руд, карбонатных пород и красных яшм, хлорит-кальцитовых пород) в проксимальной (ближайшей к рудоподводящему каналу) зоне, хотя минералы золота вместе с пиритом, халькопиритом и галенитом выполняют поздние трещинные структуры. Неравномерное распределение Au в пределах рудных тел некоторых месторождений — результат не только первичной рудной зональности, но и более поздних наложенных процессов (например, на месторождении Генти–Маунт Джулия), но нет оснований предполагать привнос Au, а также ассоциирующих с ним Bi, As, Te, Se, Hg, Sb в состав колчеданных рудных тел в процессе деформаций и регионального метаморфизма.

Колчеданные месторождения групп 3 и 4 практически не отличаются от обычных VMSD по многим наиболее существенным характеристикам (геотектонические обстановки формирования, связь с вулканогенными формациями, положение в палеовулканических структурах, морфология рудных тел и т.д.). К наиболее важным отличиям относятся обогащение руд As, Sb, Hg, Se, Te, Bi, Au и Ag, широкое распространение в рудах теллуридов и сложных сульфосолей, а для некоторых месторождений еще и специфические ассоциации вторичных минералов в зонально построенных подрудных ореолах гидротермальных изменений пород.

Причиной формирования VMSD, аномально обогащенных Au, может быть специфический состав рудообразующих растворов или особые

условия рудоотложения. Одним из объяснений обогащения золотом руд этих месторождений может быть повышенное содержание Au в подрудных толщах вулканогенных пород, подвергавшихся выщелачиванию, и (или) привнос металла гидротермальными растворами непосредственно из периферических магматических очагов, в процессе эволюции которых остаточные расплавы могли обогащаться Au. Подобная тенденция проявлена в палеопротерозойских рудных районах Флин-Флон и Сноу Лейк в Трансгудзонском поясе, в палеозойских рудных районах Южного Урала и ряде других провинций с большим числом месторождений и большой продолжительностью процессов вулканизма и рудообразования. Примеры месторождений Фото Лейк в районе Сноу Лейк, Восточно-Семеновского, Майского, Балта-Тау на Южном Урале показывают, что этот фактор мог приводить к формированию на завершающих этапах развития вулканизма месторождений колчеданных руд, содержавших до 4–6 г/т Au. В то же время примерами обратных соотношений являются месторождения Хорн Н-Г и Кемон, древнейшие в неоархейском рудном районе Норанда [Gibson, Galley, 2007], но отличающиеся наивысшим содержанием Au.

Важная роль привноса из магматического очага более вероятна для месторождений с высоким содержанием Bi и Te, для которых обычно предполагается глубинный источник. Причиной концентрирования Au в этом случае могло быть смешивание агрессивных кислых (с низкими значениями pH), иногда содержавших серу из магматического источника, относительно окисленных растворов с морской водой (как это предполагается для высокосульфидных эпитеpmальных месторождений золота). Другой возможной причиной необычного обогащения руд VMSD золотом может быть вскипание гидротермальных растворов в мелководных условиях.

Важно отметить, что во многих колчеданосных районах богатые золотом месторождения непосредственно соседствуют с месторождениями руд, бедных Au. Кроме того, в ряде провинций с большим числом VMSD (в частности, район Шеллефте, пояс Абитиб) распределение содержания Au приближается к бимодальному. Это может означать, что какой-то процесс протекал при образовании одних месторождений, но не проявлялся на других, или что какие-то условия рудообразования воспроизводились на одних месторождениях, но не воспроизводились на других, и, значит, причины, приводившие к обогащению Au руд некоторых из них, могли носить локальный характер. Одним из таких локально проявлявшихся факторов мог быть сложный, сильнорасчлененный рельеф вулканических дуг, в пределах которых вершинные части вулканических построек могли быть выражены относительно мелководными участками или возвышаться в виде островов над уровнем моря в

обрамлении более обширных умеренно глубинных областей.

После классических работ о месторождениях района Хокуроку в Японии [Ohmoto, Skinner, 1983] широко распространилось мнение о формировании субмаринных вулканогенных колчеданных месторождений в интервале глубины моря от 1000 до 4000 м. Такие представления нельзя применить по крайней мере к некоторым VMSD, обогащенным Au. Признаки формирования в мелководных обстановках — повторяющаяся особенность многих VMSD групп 3 и 4. Такие обстановки рудообразования предполагаются, в частности, для месторождения Нурукава, отличающегося от остальных месторождений района Хокуроку в Поясе Зеленых Туфов повышенным содержанием Au (6,8 г/т). На основе фациального анализа установлено, что в рудном районе Шеллефте большинство колчеданных месторождений образовывалось ниже базы штормовых волн, возможно, на глубине свыше 100 м. Однако они расположены вблизи стратиграфических интервалов, которые сложены породами, накапливавшимися выше базы волн, а некоторые из них, в том числе месторождения Болиден и Холмтьярн (а также Ренстрем и Петикнес-Саут, содержащие Au в повышенном количестве (2,3–2,8 г/т), но формально относящиеся к группе 1), обогащенные Au, связаны с мелководными и даже субаэральными ассоциациями. В районе Шеллефте об этом свидетельствуют эрозионные поверхности, косая слоистость в грубозернистых песчаниках, линзовидная слоистость в осадочных породах и т.д. [Allen, Weihed, Svenson, 1997], а на некоторых других месторождениях — осадочные породы с большим количеством окаменелостей, спекшиеся туфы и игнимбриты в рудовмещающих толщах (например, на месторождении Генти–Маунт Джулия [Callaghan, 2001]), краснокаменные изменения пород, развитие карбонатных рифовых построек на вершинах палеовулканических сооружений, к которым приурочены VMSD, и т.д.

В некоторых колчеданоносных провинциях, особенно в мезозойских и кайнозойских, нередки случаи, когда VMSD, как аномально богатые Au, так и рядовые по содержанию этого металла, тесно ассоциируют с субаэральными эпиптермальными месторождениями Au. Так, в Канадских Кордильерах, в колчеданоносном районе Искут Ривер колчеданные месторождения, как рядовые (Биг Миссури — 2,5 т, 2,9 г/т Au), так и богатые Au (Эски Крик), соседствуют с субаэральным малосульфидным золоторудным месторождением Силбак-Премьер (65 т Au) и жильным Au-Cu месторождением Слип (32 т Au). Действительно, месторождения обеих этих групп связаны с известково-щелочными или переходными к известково-щелочным вулканогенными породами андезитового, дацитового, риодацитового и особенно риолитового состава, формировались на

конвергентных окраинах плит, в пределах вулканических дуг, внутридуговых и задуговых рифтов [Simmons et al., 2005].

Эта ассоциация в сочетании с рассмотренными выше важными геохимическими (обогащение As, Sb, Hg, Se, Te, Bi, Au, Ag) и минералогическими особенностями руд (широкое распространение сульфосолей и теллуридов), а также сходством характера подрудных гидротермальных изменений пород позволяет предполагать, что в непрерывном ряду различных типов месторождений золото-содержащих руд колчеданные месторождения, возникавшие в мелководных обстановках и обогащенные Au, могли занимать промежуточную позицию между типичными глубоководными VMSD с рядовым содержанием Au в рудах и субаэральными эпиптермальными золоторудными месторождениями. В этом случае аномальное обогащение руд VMSD золотом могло быть связано со вскипанием гидротермальных флюидов в условиях относительного мелководья, которое является эффективным механизмом быстрого осаждения Au и Ag (по аналогии с малосульфидными эпиптермальными месторождениями). Поскольку в сложнопостроенных вулканических дугах локальные мелководные участки были окружены более глубоководными областями, находит объяснение и соседство в пределах одних и тех же районов месторождений, обогащенных и относительно бедных Au.

Возникавшие на мелководье субмаринные богатые золотом VMSD относительно редки, поскольку они уничтожались при последующем воздымании и денудации вулканических дуг, если не происходило их быстрое захоронение под толщами вулканогенных и осадочных пород в результате структурной перестройки и погружения. Кроме того, возможности сохранения таких месторождений, как и эпиптермальных золоторудных месторождений, сильно зависят от степени денудации палеовулканических дуг и, значит, от их возраста. Единичные эпиптермальные золоторудные месторождения известны начиная с неоархея, но большинство из них расположено в относительно слабоденудированных мезокайнозойских поясах, где их относительная численность достигает максимума (15% от числа месторождений с возрастом менее 200 млн лет). По тем же причинам в поясах этого возраста обогащенные Au VMSD встречаются в 1,3–2,7 раза чаще, чем в провинциях, отвечающих важнейшим эпохам массового образования вулканогенных колчеданных месторождений (2730–2690, 1890–1850, 570–330 млн лет).

**Заключение.** Обогащение руд VMSD золотом во всех рассмотренных случаях происходило на синвулканическом этапе. Региональный метаморфизм высоких фаций мог приводить лишь к частичной ремобилизации и переотложению золота. Вулканогенные колчеданные месторождения, аномально обогащенные золотом, образуют пере-

ходную группу между обычными VMSD цветных металлов с рядовым содержанием Au и богатыми собственно золоторудными эпitherмальными месторождениями и обладают рядом признаков обеих этих групп. Причины их образования заключаются в эволюции магматических очагов и как следствие в изменении состава гидротермальных растворов и (или) особые (в частности, мелководные) условия

рудоотложения, приводившие к вскипанию растворов и эффективной концентрации Au.

С прогнозно-поисковой точки зрения важно, что открытие VMSD, обогащенных Au, более вероятно в относительно молодых и слабоденудированных энсиалических и энсиматических вулканических дугах, рудных районах, где распространены месторождения типов куроко и уральского.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Дергачев А.Л., Еремин Н.И., Сергеева Н.Е.* Разномасштабные тенденции в эволюции состава руд вулканогенных колчеданных месторождений // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2013. № 5. С. 31–40.

*Еремин Н.И., Дергачев А.Л., Позднякова Н.В., Сергеева Н.Е.* Эпохи вулканогенного колчеданного рудообразования в истории Земли // Геология рудных месторождений. 2002. Т. 42, № 4. С. 259–275.

*Еремин Н.И., Дергачев А.Л., Сергеева Н.Е., Позднякова Н.В.* Типы колчеданных месторождений вулканической ассоциации // Геология рудных месторождений. 2000. Т. 42, № 2. С. 177–190.

*Еремин Н.И., Сергеева Н.Е., Дергачев А.Л., Позднякова Н.В.* Благородные металлы в рудах вулканогенных колчеданных месторождений // Геология, генезис и вопросы освоения комплексных месторождений благородных металлов. М.: ИГЕМ РАН, 2002. С. 150–154.

Палеовулканический анализ колчеданоносных провинций (на примере Рудного Алтая) / Под ред. Г.Ф. Яковлева. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984.

*Allen R.L., Weihed P., Svenson S.-A.* Setting of Zn-Cu-Au-Ag massive sulfide deposits in the evolution and facies architecture of a 1,9 Ga marine volcanic arc, Skellefte district, Sweden // Econ. Geol. 1997. Vol. 91. P. 1022–1053.

*Arnold J.O., Sillitoe R.H.* Mount Morgan gold-copper deposit, Queensland, Australia: Evidence for an intrusion-related replacement origin // Econ. Geol. 1989. Vol. 84. P. 1805–1816.

*Callaghan T.* Geology and host-rock alteration of the Henty and Mount Julia gold deposits, Western Tasmania // Econ. Geol. 2001. Vol. 96. P. 1073–1088.

*Chiaradia M., Tripodi D., Fontboté L., Reza B.* Geologic setting, mineralogy, and geochemistry of the Early Tertiary Au-rich volcanic-hosted massive sulfide deposit of La Plata, Western Cordillera, Ecuador // Econ. Geol. 2008. Vol. 103. P. 161–183.

*Dube D., Mercier-Langevin P., Hannington M.* et al. La Ronde Penna world-class massive sulfide deposit, Abitibi, Quebec: mineralogy and geochemistry of alteration and implications for genesis and exploration // Econ. Geol. 2007. Vol. 102. P. 633–666.

*Gibson H.L., Galley A.G.* Volcanogenic massive sulfide deposits of the Archean, Noranda district, Quebec // Geol.

Assoc. of Canada, Mineral Depos. Division, Spec. Publ. 5. 2007. P. 533–552.

*Halley S.W., Roberts R.H.* Henty; a shallow-water gold-rich volcanogenic massive sulfide deposit in Western Tasmania // Econ. Geol. 1997. Vol. 92. P. 438–447.

*Hannington M.D., Poulsen K.H., Thompson J.F.H., Sillitoe R.H.* Volcanogenic gold in the massive sulfide environment // Rev. Econ. Geol. 1999. Vol. 8. P. 325–356.

*Huston D.L., Bottril R.S., Creelman R.A.* et al. Geologic and geochemical controls on the mineralogy and grain size of gold-bearing phases in eastern Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits // Econ. Geol. 1992. Vol. 87. P. 542–563.

*Mercier-Langevin P., Hannington M.D., Dube B., Becu V.* The gold content of volcanogenic massive sulfide deposits // Miner. Deposita. 2011. Vol. 46. P. 509–539.

*Monecke T., Gale D., Roth T., Hannington V.D.* The submarine volcanic succession hosting the massive sulfide and sulfosalt Eskay Creek deposit, Canada // Mineral Depos. Res. Meeting the global challenge. Berlin: Springer, 2005. P. 655–659.

*Ohmoto H., Skinner B.J.* The kuroko and related volcanogenic massive sulfide deposits: Introduction and summary of new findings // Econ. Geol. Mon. 5. 1983. P. 1–8.

*Roth T., Thompson J.F.H., Barrett T.J.* The precious metal-rich Eskay Creek deposit, northwestern British Columbia // Rev. Econ. Geol. 1999. Vol. 8. P. 357–373.

*Sherlock R.L., Roth T., Spooner E.T.C., Bray C.J.* Origin of the Eskay Creek precious metal-rich volcanogenic massive sulfide deposit: Fluid inclusion and stable isotope evidence // Econ. Geol. 1999. Vol. 94. P. 803–824.

*Simmons S.F., White N.C., John D.A.* Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits // Econ. Geol. One Hundredth Anniversary Vol.: 1905–2005. Littleton: Soc. of Economic Geologists, 2005. P. 485–522.

*Singer D.A.* World class base and precious metal deposits: A quantitative analysis // Econ. Geol. 1995. Vol. 90. P. 88–104.

*Weihed J.B., Bergstrom U., Billstrom K., Weihed P.* Geology, tectonic setting, and origin of the Paleoproterozoic Boliden Au-Cu-As deposit, Skellefte district, Northern Sweden // Econ. Geol. 1996. Vol. 91. P. 1073–1097.

Поступила в редакцию  
05.05.2017