

УДК 553.44

А.Л. Дергачев, Н.И. Еремин, Н.Е. Сергеева

ДОКЕМБРИЙСКИЕ КОЛЧЕДАННЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ АССОЦИАЦИИ

Фанерозойские колчеданные месторождения вулканической ассоциации можно подразделить на типы кипрский, бесси, уральский и куроко, которые различаются по химическому и минеральному составу руд, характеру вулканогенных формаций и соотношению кислых и основных разностей вулканогенных пород и осадочных образований в разрезах рудоносных формаций. Наиболее ранние из месторождений, с высокой степенью достоверности относимые к этим типам, образовались в PR_3 в ходе суперконтинентального цикла Пангеи. Архейские и раннепротерозойские месторождения, во многих отношениях близкие к ним, хотя и отличающиеся по ряду признаков, можно рассматривать в качестве древних аналогов этих типов. История формирования месторождений кипрского типа прослеживается до PR_1 , когда на ранних стадиях развития Пангеи 1 сформировались месторождения района Оутокумпу с возрастом 1970 млн лет. Древнейшие месторождения типа бесси возникли на стадии распада этого суперконтинента около 1440 млн лет назад. Большинство позднеархейских и раннепротерозойских колчеданных месторождений вулканической ассоциации представляет древнейшие аналоги типов уральского и куроко. Месторождения этих типов и их древние аналоги эволюционировали на протяжении последних 2800 млн лет и демонстрировали однонаправленные изменения состава колчеданных руд.

Ключевые слова: колчеданные месторождения вулканической ассоциации, типы месторождений, докембрий.

Phanerozoic volcanic-associated massive sulfide deposits (VMSD) can be subdivided into the Kuroko-, Besshi-, Cyprus- and Ural-type that differ in ore geochemistry and mineralogy, composition of volcanic host formations, proportion of felsic and basaltic volcanics and sedimentary rocks in volcanic pile. The earliest deposits that can be reliably attributed to the above types formed in the Late Proterozoic during the Pangea supercontinental cycle. The Archean and Early Proterozoic VMSD can be considered analogues of the types and resemble them in many respects although differ from classic deposits of the types in some characteristics. Formation history of the Cyprus-type VMSD can be traced to the Early Proterozoic when deposits of the Outocumpu district with the age of about 1970 Ma formed at the early stage of Pangea I formation while the most ancient Besshi-type deposits with the age of 1440 Ma formed during the break-up of this supercontinent. Most of the Late Archean and Early Proterozoic VMSD in some their principal features are similar to the Ural and Kuroko types. Deposits of both types combined with their ancient analogues have evolved in the Earth's history and demonstrated unidirectional changes of ore composition.

Key words: volcanic-associated massive sulfide deposits, deposit types, Precambrian.

Основные типы колчеданных месторождений фанерозойского возраста. Семейство колчеданных месторождений вулканической ассоциации насчитывает несколько тысяч объектов, встречающихся во многих странах, на всех континентах и образовавшихся практически во все эпохи геологического развития Земли. Попытки упорядочения этого множества и подразделения колчеданных месторождений на типы совершались неоднократно. Основы современной классификации колчеданных месторождений вулканической ассоциации заложены в работах В.И. Смирнова, Г.Ф. Яковлева, Д.И. Горжевского, М.Б. Бородаевской, Р. Хатчинсона, Т. Саго, Дж. Франклина, В.А. Прокина, Н.И. Еремина и других исследователей.

Авторами для целей типизации ранее было предложено использовать в качестве основополагающих классификационных признаков состав

вулканогенных рудоносных формаций и состав руд месторождений, т.е. характеристики месторождений, объективно наблюдаемые и поддающиеся качественной и количественной оценке [Еремин и др., 2000]. В соответствии с таким подходом выделяются две группы колчеданных месторождений: 1) медно- и медно-цинково-колчеданные месторождения в недифференцированных базальтоидных (офиолитовых) формациях и 2) медно-цинково-колчеданные и колчеданно-полиметаллические месторождения в бимодальных базальт-риолитовых и последовательно дифференцированных базальт-андезит-дацит-риолитовых формациях (табл. 1).

Дальнейшее подразделение месторождений основано не только на особенностях минерального состава руд, содержания и соотношения цветных и благородных металлов в них, характере и составе

Таблица 1

Характеристики фанерозойских типов колчеданных месторождений вулканической ассоциации и их древних аналогов

Типы месторождений	Число месторождений в базе данных	Запасы руды месторождений, тыс. т		Среднее содержание металлов					Соотношения металлов			
		средние	медианные	Cu, %	Zn, %	Pb, %	Au, г/т	Ag, г/т	Cu/Zn	Pb/Zn	Au/Ag	Ag/Pb
Медные и медно-цинковые месторождения в недифференцированных базальтоидных формациях												
Кипрский	59	3943	1700	2,2	0,7	<0,01	0,6	14,0	3,1 : 1		0,040	
Бесси	38	21 200	2700	1,3	0,5	<0,01	0,1	5,5	2,8 : 1		0,037	
Медно-цинковые и свинец-медно-цинковые месторождения в контрастных и последовательно дифференцированных вулканогенных формациях												
Уральский докембрийски аналоги: PR ₁ AR	106	16143	3420	1,5	1,6	0,06	0,7	17,8	1 : 1	1 : 28	0,034	68
	68	5048	1100	1,7	3,4	0,1	2,05	31,3	1 : 2	1 : 33	0,065	87,4
	137	8013	1300	1,1	3,3	0,07	0,9	33,9	1 : 3	1 : 44	0,025	224
Куроко докембрийские аналоги: PR ₁ AR	185	16 904	3000	1,5	3,7	1,3	1,3	62,8	1 : 2,5	1 : 2,9	0,020	36,5
	37	8674	6500	0,7	4,5	0,9	1,2	41	1 : 6,0	1 : 5,1	0,038	48
	10	4382	3000	0,6	6,6	0,96	0,48	152	1 : 10,3	1 : 6,9	0,003	158

рудовмещающих вулканогенных толщ, но и на относительной роли вулканогенно-осадочных пород в рудовмещающем разрезе, специфике рудоконтролирующих вулканогенных структур, геодинамических обстановках рудообразования и других признаках. С учетом этого месторождения первой из названных групп могут быть подразделены на типы кипрский и бесси, а второй — на типы уральский и куроко.

Эта типизация, как и большинство предлагавшихся ранее, разработана в основном для фанерозойских месторождений. Между тем в фанерозое имели место только две из четырех крупных вспышек колчеданообразования, известных в геологической истории планеты [Еремин и др., 2002]. Две другие относятся к раннему протерозою и позднему архею, когда сформировалось суммарно более 40% от общего числа колчеданных месторождений в составленной авторами базе данных и свыше 25% учтенных в ней запасов колчеданных руд.

Месторождения докембрия некоторые авторы относят к так называемому примитивному, архейскому типу. Между тем на границе протерозоя и фанерозоя не произошло каких-то радикальных изменений, которые позволяли бы говорить о дифференциации колчеданных месторождений на типы именно с этого момента.

Ряд исследователей классификацию, принятую для фанерозойских месторождений, распространяют на месторождения архейского, ранне- и среднепротерозойского возраста, как если бы, появившись однажды, эти типы не претерпевали в дальнейшем никаких заметных изменений важнейших признаков (в частности, см. работу [Контарь, 1997]).

Оба этих подхода представляются не вполне корректными. В связи с этим возникают два вопроса: 1) насколько глубоко в геологическое прошлое может

быть прослежена история формирования месторождений типов кипрского, бесси, уральского и куроко; 2) если она может быть прослежена в ранний докембрий, то оставались ли важнейшие признаки этих типов неизменными или они эволюционировали и какова была направленность этой эволюции?

Докембрийские аналоги колчеданных месторождений типов кипрского и бесси. Ранее отмечалось, что месторождения каждого из четырех типов в позднем протерозое—фанерозое появлялись в определенные стадии суперконтинентального цикла [Еремин и др., 2002]. Месторождения кипрского типа формировались на его ранних стадиях, когда рифтогенез в пределах суперконтинентов переходил в спрединг и возникали офиолиты (например, некоторые месторождения Ньюфаундленда), или на более поздних стадиях, когда позади островных дуг образовывались задуговые зоны спрединга (месторождения Кипра и других провинций). Можно предположить, что аналогичные месторождения могли образовываться неоднократно в ходе развития ранее существовавших суперконтинентов: Пангеи 0, Пангеи 1 и Родинии [Хаин, 2000].

Реально к возможным докембрийским аналогам месторождений кипрского типа можно отнести лишь немногочисленные раннепротерозойские месторождения рудного района Оутокумпу (Финляндия) в пределах Свекофеннского пояса на Балтийском щите — Оутокумпу, Вуонос, Луйконлахти с возрастом около 1970 млн лет. Они демонстрируют как признаки сходства, так и отличия от классических месторождений кипрского типа, облик которого окончательно оформился в раннем палеозое.

Значительная часть свекофеннид образовалась на коре океанического типа, а элементами офиолитовой ассоциации здесь являются выходы ультрабазитов,

габброидов, базальтовых пиллоу-лав и кремнистых пород. Рудовмещающая ассоциация Оутокумпу включает подрудные серпентиниты по дунитам, которые не являются жильными, имеют согласные контакты с вышележащими породами и не несут никаких признаков дифференциации или псевдостратификации. Месторождения рудного района Оутокумпу ассоциируют с массивными дунитами, что нетипично для месторождений кипрского типа, обычно залегающих в средней и верхней частях разреза офиолитовых комплексов.

Рудные тела рассматриваемых месторождений, как и многих более молодых месторождений кипрского типа, залегают в пределах небольших депрессионных структур (депрессии Оутокумпу и Вуонос), среди черных сланцев, скарнов (измененных карбонатных пород метасоматического или гидротермально-осадочного генезиса). Имеется ряд отличий этих месторождений от типичных месторождений кипрского типа, что, вероятно, связано со специфическим для раннего протерозоя уровнем оксигенизации атмосферы и гидросферы. В частности, в составе руд нет гематита, а в рудовмещающем разрезе отсутствуют яшмы, кремнистые эксгальционно-осадочные породы, содержащие оксиды железа и марганца, а их роль играют кварциты с убогой вкрапленностью пирита, пирротина, пентландита, рассматриваемые как эксгальционно-осадочные образования.

На всех трех месторождениях рудного района руды содержат довольно высокую концентрацию селена, а также никеля (0,12–0,2%) и кобальта (0,10–0,24%), которые входят в состав пирита, Сопентландита, зигенита, кобальтина-герсдорфита, виоларита, пирротина, сфалерита и халькопирита. Хотя величины отношения Co/Ni для этих месторождений колеблются от 1,2 (Вуонос) до 2,0 (Оутокумпу), что существенно ниже, чем на многих фанерозойских месторождениях кипрского типа (до 7–8), по другим геохимическим характеристикам эти месторождения очень напоминают кипрский тип. Руды крупнейшего месторождения Оутокумпу, по существу, не содержат свинца (~0,005%), бедны серебром и золотом (~9 и 0,8 г/т соответственно) и характеризуются значениями отношения Au/Ag , соответствующими диапазону изменения этого показателя для месторождений кипрского типа (0,089). В суммарных запасах руды трех месторождений соотношение $Cu:Zn$ составляет 3,2:1 (практически совпадает с установленным для месторождений кипрского типа). В силу перечисленных причин месторождения рудного района Оутокумпу можно рассматривать как древнейшие аналоги месторождений кипрского типа.

Поскольку настоящие офиолиты появились лишь в раннем протерозое [Хаин, Божко, 1988], выявление более древних месторождений — аналогов кипрского типа представляется маловероятным. Применительно к позднеархейским зеленокаменным поясам можно говорить лишь о протоофиолитах, которые отлича-

ются отсутствием комплексов параллельных даек и закономерной смены полосчатых габбро массивными, а главное, широким развитием коматиитовых лав, с которыми не связаны колчеданные месторождения.

Месторождения типа бесси отличаются крайне неравномерным распределением во времени. Они формировались, во-первых, при рифтогенезе в пределах суперконтинентов; во-вторых, в пределах срединно-океанических хребтов вблизи континентальной окраины; в-третьих, в задуговых бассейнах над зонами субдукции. В цикле палеозойской Пангеи месторождения начали образовываться 860–760 млн л.н. при распаде Родинии (месторождение Бом-Жардим в Бразилии, Дактаун и другие месторождения Аппалачей), а пик рудообразования этого типа пришелся на пермское–триасовое время и отвечал деструкции Пангеи.

Образование месторождений типа бесси могло иметь место и при рифтогенезе в пределах Пангеи 0 и Пангеи 1. В действительности древнейшие месторождения — аналоги типа бесси встречаются в прогибе Белт-Пурсел на северо-западе США. Прогиб заложился при деструкции Пангеи 1 и относится к числу древнейших в системе взаимосвязанных среднепротерозойских рифтов, образовавшихся при раскрытии Гренвиллского океана [Gower, Tucker, 1994]. Рифт выполнен преимущественно турбидитовыми отложениями, на фоне накопления которых в период 1485–1320 млн лет имели место спорадические вспышки толеитового и щелочного базальтового вулканизма. В осадочном выполнении интраконтинентального рифта в связи с инициальным базальтовым магматизмом, представленным многочисленными силлами, встречаются небольшие по запасам колчеданные месторождения медного пояса Айдахо с возрастом 1440 млн лет (Блэкберд, Блэк-Пайн, Айрон-Крик, Рам-Саншайн, Сальмон-Каньон и ряд более мелких). Для них характерны резко уплощенная, пластообразная форма рудных тел при их большой латеральной протяженности и малой мощности, ассоциация с осадочными породами и подчиненная роль основных вулканитов (месторождения расположены в тех частях прогиба, где суммарная мощность базальтовых силлов достигает максимума).

Как и на большинстве фанерозойских месторождений типа бесси, руды указанных объектов преимущественно медноколчеданные и характеризуются высоким содержанием кобальта и никеля. В их составе доминируют кобальтоносный пирит и халькопирит, встречаются пирротин, арсенопирит (кобальтоносный), сфалерит, кобальтин, Со-маккинавит [Nold, 1990]. Руды содержат 0,6–6 г/т Au. Эти и ряд других признаков позволяют говорить о сходстве этих месторождений с известными фанерозойскими месторождениями типа бесси.

Таким образом, первые колчеданные месторождения с признаками типа бесси появились, видимо, уже около 1,5 млрд л.н., начиная с деструкции

Пангеи 1. Более древние месторождения-аналоги могли формироваться при рифтогенезе в пределах Пангеи 0, а также при сборе Пангеи 1, однако достоверно такие месторождения не установлены. Тем более маловероятным представляется их выявление в позднеархейских зеленокаменных поясах, которые характеризуются отсутствием внешних ограничений и наложенной природой их современных границ, относительно малой ролью осадочных пород в разрезе. Последние чаще всего представлены граувакками, имеющими местный источник обломочного материала. Отсутствие внешних ограничений означает, что не было условий для накопления мощных толщ турбидитов, которые являются важнейшей составной частью рудоносных формаций и одним из главных классификационных признаков для типа бесси.

Докембрийские аналоги колчеданных месторождений типов уральского и куроко. Анализ базы данных показал, что большинство месторождений раннепротерозойского возраста (с возрастом от 1900 до 1750 млн лет) образует две отчетливые группы. Первая из них включает 68 месторождений зеленокаменных поясов южной части провинции Черчилл (пояса Флин-Флон — Сноу-Лейк, Расти-Лейк, Линн-Лейк, комплекс Кисенью), Лабрадорского трога, провинции Южной и района Джером Канадского щита (табл. 2). В этих районах колчеданные месторождения формировались в энсиматических обстановках, как следствие рудоносные бимодальные базальт-риолитовые формации отличались резким преобладанием базальтовых лав и пирокластических пород (90–95% объема формации) над риолитовыми при известково-щелочном характере вулканизма. Вулканы кислого состава распространены не повсеместно, играют в разрезе рудоносной формации резко подчиненную

роль, однако именно с их проявлениями, как правило, и связаны колчеданные месторождения.

Не только по составу рудоносной бимодальной формации, но и в геохимическом отношении эти месторождения по многим позициям близки к фанерозойским месторождениям уральского типа. Их сближает, в частности, очень низкое содержание свинца (0,1 против 0,06% для фанерозойских месторождений уральского типа) и значения отношения Pb/Zn в суммарных запасах (1:33 по сравнению с 1:27,8 соответственно), широкий спектр отношений Cu/(Cu+Zn), близкое содержание Au и Ag и высокое отношение Au/Ag, схожее среднее отношение Ag/Pb (87,4 против 68 для фанерозойских месторождений уральского типа). Установленные отличия от фанерозойских месторождений уральского типа носят систематический характер: по среднему содержанию Cu, Zn, Pb и Ag в рудах, значениям отношений Cu/Zn и Ag/Pb в суммарных запасах эти раннепротерозойские месторождения являются промежуточными между фанерозойскими месторождениями уральского типа и архейскими месторождениями.

Вторая группа объединяет 37 месторождений рудных районов Бергслеген (Зинкгруван, Фалун, Гарпенберг и др.) и Шеллефте Свекофеннского пояса Балтийского щита (Кристенберг, Раккеяур, Лонгселе и др.), а также их возможных продолжений на территории Финляндии (пояса Эйяля—Ориярви и Виханти—Пюхясалми с одноименными месторождениями соответственно) (табл. 3). Рудные районы Свекофеннского пояса формировались в энсиалических обстановках, в режиме растяжения на активных континентальных окраинах и сложены известково-щелочными вулканогенными породами бимодальной базальт-риолитовой формации, с которыми местами

Таблица 2

Колчеданные месторождения — аналоги уральского типа, включенные в базу данных

Страна	Рудная провинция	Месторождения
Раннепротерозойские		
Канада	Черчилл	<i>Лабрадорский трог:</i> Прудом № 1, Суси № 1, Бойлен, Фредериксон-Лейк. <i>Трансгудзонский ороген:</i> Дикстоун, Квандт-Проперти, Фокс, Лар, Макбридж-Лейк, Копер-Риф, FL&DH Группс, Шерридон, Джангл-Лейк, Боб-Лейк, Руттан, Флин-Флон, Трипл-Северн, Траут-Лейк, Чисел-Лейк, Стал-Лейк, Осборн-Лейк, Андерсон-Лейк, Каллинан, Чисел-Норт, Спрус-Пойнт, Шист-Лейк, Уэст-Арм, Сентенниал, Рид-Лейк, Пайнбей, Коронейшн, Уим, Уайт-Лейк, Вамп-Лейк, Бомбер, Род, Фото-Лейк, Хост-Лейк, Купрус, Джоанни, Флексар, Рейл-Лейк, Соургуф-Бей, Берч-Лейк, Морган-Лейк, Фреуэлл-Лейк, Норт-Стар, Копер-Мен, Биг-Айленд-Лейк, Гудинаф, Пот-Лейк, Манди-2, Дон-Джон, Лост-Лейк, Z-Депозит, Манди-1
США	Южная	Крандон
	Район Джером	Юнайтед-Верде (UVX), Айрон-Кинг
Архейские		
Канада	Сьюпериор	<i>Абитиб:</i> Гонзаге-Ланглуа, Гривет М, Норметмар, Могадор, Эстрадес, Барвали, Белфорд. Уауа: Геко, Уинстон-Лейк, Уиллрой, Уиллеко, Зенит, Норд-Голдстрим, Нама-Крик. Учи: Саут-Бей, Коппер-Лоуд-А, Коппер-Лоуд-Е, Траут-Бей-Коппер, Хайерс-Айленд
	Слейв	<i>Хай-Лейк:</i> Хай-Лейк. <i>Ранкин-Эннадаи:</i> Хенинга-Лейк Изок, Гондор, Кеннеди-Лейк, Санрайз, Индиан-Маунтин, Деб, Крик-Зон-Мат, Худ-Ривер, Беар, № 41, Сусу-Лейк
Австралия	Йилгарн	Тьютоник-Бор

Таблица 3

Колчеданные месторождения — аналоги типа куроко, включенные в базу данных

Страна	Рудная провинция	Месторождения
Раннепротерозойские		
Финляндия	Пояс Виханти–Пюхя-салми	Виханти, Пюхясалми
	Пояс Эйяля–Ориярви	Эйяля, Ориярви
Швеция	Бергслеген	Зинкгруван, Фалун, Гарпенберг, Саксберг, Столлберг, Сала, Кальвбеккен, Левос, Уте, Эстер-Силвберг
	Шеллефте	Кристенеберг, Раккеяур, Лонгселе, Ренстрем, Болиден, Равлидмиран, Маурлиден Западный, Удден, Петикнес Южный, Рудтьбеккен, Неслиден, Лонгдаль, Норрлинден, Сванселе, Кедтреск, Канкберг, Петикнес Сев., Окулла-Вестра, Осен, Холмтьярн
Норвегия		Бидьовагге
Архейские		
Канада	Сьюперитор	<i>Вабигун</i> : Маттаби, Лайон-Лейк, Стерджен-Лейк, Группа F
	Слейв	<i>Хакетт-Ривер</i> : Батерст-Норсмайнс, Бут-Лейк, Хакетт-Ривер А-зон, Ист-Кливер-Лейк, Ява, Муск

ассоциируют турбидиты и конгломераты. В составе формации резко доминируют кислые вулканиты, доля которых в ее разрезе изменяется от 70 (район Шеллефте) до 90% (район Бергслеген). Отложения этого типа формировались, очевидно, в обстановке островных дуг, между которыми находился сланцево-граувакковый Ботнический прогиб, представлявший собой окраинное или внутреннее море [Хаин, Божко, 1988].

Не только по геотектоническим обстановкам рудообразования и составу рудоносных вулканогенных формаций, но и по важнейшим геохимическим признакам руд месторождения этой группы напоминают фанерозойские месторождения типа куроко (табл. 1). Их сближают выраженный полиметаллический состав, преобладание количества цинка над медью и свинцом, высокое содержание серебра (до 350 г/т), золота (в исключительных случаях до 15 г/т), сурьмы (0,06–0,23%), ртути (до 0,034%) и некоторых других металлов, сходный спектр отношений Au/Ag. В то же время, в отличие от фанерозойских месторождений типа куроко, они характеризуются более низким средним содержанием меди, свинца, а на соответствующих им гистограммах крупнейшие пики смещены в сторону более низких значений $100Cu/(Cu+Zn)$ и $100Pb/(Pb+Zn)$. Хотя содержание серебра в рудах раннепротерозойских аналогов типа куроко выше, чем в одновозрастных месторождениях других типов, в среднем оно ниже, чем в фанерозойских месторождениях типа куроко (41 против 62,8 г/т), поэтому месторождения рудных районов Бергслеген и Шеллефте характеризуются более высоким отношением Au/Ag.

В целом для месторождений этой группы величина золото-серебряного отношения составляет 0,038, а средние отношения Cu/Zn и Pb/Zn в суммарных запасах металлов — 1:6,0 и 1:5,1 соответственно. Все эти показатели на месторождениях — аналогах типа куроко оказываются существенно ниже, чем на фанерозойских месторождениях, и в этом отношении

они занимают промежуточное положение между ними и архейскими месторождениями. На диаграмме $100Cu/(Cu+Zn) — Ag/Pb$ точки, отвечающие рассматриваемым раннепротерозойским месторождениям, попадают в поле фанерозойских месторождений типа куроко, однако позиция месторождений рудного района Шеллефте смещена в сторону высоких величин Ag/Pb при низких величинах медно-цинкового отношения (<20). Как станет понятно из дальнейшего, это также сближает их с архейскими месторождениями.

Руды месторождений, установленных в раннепротерозойских зеленокаменных поясах Канадского щита, отличаются от близких им по возрасту месторождений Балтийского щита медно-цинковым составом руд при очень низком содержании свинца, более равномерным распределением как месторождений, так и запасов руд по величине $100Cu/(Cu+Zn)$, повышенным средним содержанием меди (1,7 по сравнению с 0,7%), относительно высоким отноше-

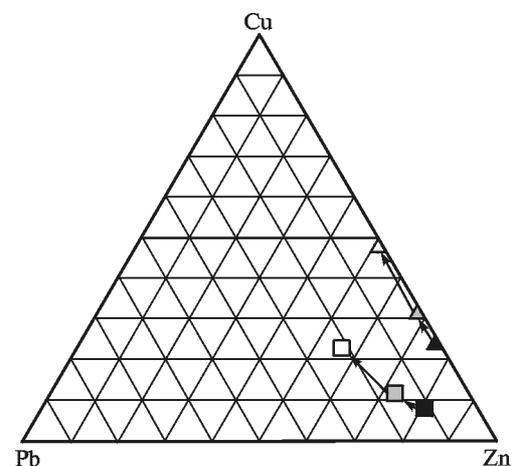


Рис. 1. Треугольная диаграмма состава руд фанерозойских месторождений типов уральского и куроко (треугольники и квадратики соответственно) и их раннепротерозойских и позднеархейских аналогов (те же значки серые и черные соответственно)

нием Cu/Zn в суммарных запасах (1:2 против 1:6), практически полным отсутствием свинца (среднее содержание около 0,1 по сравнению с 0,9%), сравнительно низким средним содержанием серебра (31 против 41 г/т) и значительно более высокими величинами золото-серебряного отношения (0,065 против 0,038) (табл. 1). Таким образом, соотношения между месторождениями — аналогами типов уральского и куроко в геохимическом отношении уже в раннем протерозое были такими же, как и между собственно месторождениями этих типов в фанерозойское время.

В раннем протерозое образование колчеданных месторождений в рудных районах Балтийского щита и зеленокаменных поясах Канадского щита по времени совпало со сбором суперконтинента, а также с пиком активности мантийных суперплюмов. Иными словами, процессы колчеданообразования на этих месторождениях занимали точно такое же место в суперконтинентальном цикле Пангеи 1, как и колчеданные месторождения типов уральского и куроко при сборе мегаконтинента Гондвана и палеозойской Пангеи.

Анализ пополненной в последнее время базы данных показал, что выборка позднеархейских (2950–2690 млн лет) колчеданных месторождений не является однородной, их также можно подразделить на две не равные по численности группы, которые по ряду признаков сопоставимы с типами уральским и куроко. С другой стороны, по ряду важных особенностей они отличаются от известных фанерозойских типов, и отнесение их к типам куроко (Стерджен-Лейк и другие месторождения) и уральскому (большинство месторождений архейских зеленокаменных поясов Канадского щита, в том числе Кидд-Крик) [Контарь, 1997] не вполне корректно. Правильнее рассматривать их, как и раннепротерозойские месторождения, в качестве древних аналогов фанерозойских типов.

Первая группа, намного более многочисленная, включает 145 месторождений, расположенных в провинции Сьюпериор (зеленокаменные пояса Вава, Абитиби, Учи) и Слейв (зеленокаменные пояса Хай-Лейк и др.), а также в блоках Йилгарн и Пилбара (табл. 2). В этих районах состав рудовмещающей формации характеризуется сменой снизу вверх по разрезу толеитовых пород известково-щелочными, а также резко подчиненной ролью кислых вулканитов. В этом отношении, в частности, классические для этой группы месторождения рудных районов пояса Абитиби (Норанда, Тимминс, Валь-д-Ор и др.) в провинции Сьюпериор напоминают более поздние месторождения уральского типа.

По геохимическим особенностям руд эти месторождения также можно рассматривать в качестве древнейших аналогов уральского типа. Они характеризуются медно-цинковым составом руд, существенным преобладанием количества цинка над медью при их среднем содержании 3,3 и 1,1% соответственно и

очень низком содержании свинца (табл. 1), которое достигает промышленного уровня лишь на некоторых очень небольших (с запасами не более 2 млн т руды) месторождениях провинции Слейв. Только среди позднеархейских аналогов уральского типа встречены месторождения, которые правильнее было бы называть цинково-колчеданными в связи с отсутствием в их рудах промышленных количеств не только свинца, но и меди (7 небольших по запасам месторождений в поясе Абитиби).

Эти месторождения и соответствующие запасы руды характеризуются относительно равномерным распределением по величине $100\text{Cu}/(\text{Cu}+\text{Zn})$ и в то же время крайне незначительными вариациями величины $100\text{Pb}/(\text{Pb}+\text{Zn})$, которая в подавляющем большинстве случаев не превышает 10. По этим характеристикам позднеархейские аналоги месторождений уральского типа практически неотличимы от раннепротерозойских и от собственно фанерозойских месторождений уральского типа.

Содержание серебра на позднеархейских аналогах уральского типа лишь изредка (на 20% месторождений) превышает 60 г/т, а в среднем составляет около 34 г/т, т.е. существенно превышает соответствующие показатели для месторождений собственно уральского типа и их раннепротерозойских аналогов. Интересно, что необычное обогащение серебром обнаружено даже в пирите из сланцев надрудного горизонта на относящемся к этой группе месторождении Кидд-Крик.

Содержание золота превышает 0,7 г/т только на 1/3 месторождений этой группы, в суммарных запасах оно составляет около 0,9 г/т, но на ряде объектов в поясе Абитиби возрастает в 5–7 раз против среднего, достигая 6,4 г/т.

Средние значения отношений Cu/Zn и Pb/Zn в суммарных запасах для рассматриваемых месторождений составляют 1:3 и 1:44 соответственно, т.е. оказываются намного ниже, а величина серебро-свинцового отношения — намного выше, чем для раннепротерозойских аналогов и тем более фанерозойских месторождений уральского типа (табл. 1).

На диаграмме $100\text{Cu}/(\text{Cu}+\text{Zn})-\text{Ag}/\text{Pb}$ месторождения этой группы в целом группируются ниже и правее основного поля месторождений уральского типа, что при сопоставимом содержании свинца означает их большее обогащение серебром и цинком.

Позднеархейские месторождения — аналоги уральского типа обладают довольно крупными средними и медианными запасами руды, хотя по этому показателю они, безусловно, уступают фанерозойским месторождениям (табл. 1). Крупнейшими среди них являются месторождения Хорн, Кидд-Крик, Геко, на каждом из которых запасы превышают 50 млн т руды.

Вторая группа позднеархейских месторождений включает 10 месторождений, очень компактно размещенных в пределах зеленокаменных поясов Вабигун провинции Сьюпериор (в том числе Матта-

би) и Хакетт-Ривер провинции Слейв (в том числе Батерст-Норсмайнс) (табл. 3). Важнейшим признаком месторождений этой группы, сближающим их с более поздними месторождениями типа куроко, является значительное преобладание кислых вулканогенных пород над основными в разрезе рудоносной формации.

Руды месторождений этой группы характеризуются колчеданно-полиметаллическим составом и, как и на многих фанерозойских месторождениях типа куроко, содержат разнообразные сульфосоли (в частности в рудном районе Маттаби).

Среди трех важнейших цветных металлов резко доминирует цинк (в среднем вносит свыше 80% в сумму металлов). Как и на раннепротерозойских месторождениях — аналогах типа куроко, среднее содержание свинца (0,96%) превышает содержание меди (0,6%).

По сравнению с одновозрастными месторождениями — аналогами уральского типа эти месторождения беднее медью и золотом, но богаче цинком, свинцом и серебром. Для них характерно неравномерное распределение месторождений и соответствующих запасов руды по величинам $100\text{Cu}/(\text{Cu}+\text{Zn})$, а также несколько более широкий спектр значений $100\text{Pb}/(\text{Pb}+\text{Zn})$. Иными словами, по этим показателям соотношения между аналогами месторождений типов уральского и куроко в позднем архее оказываются точно такими же, как и в раннем протерозое и фанерозое.

Содержание серебра на этих месторождениях заметно повышено относительно одновозрастных месторождений — аналогов уральского типа. На 20% объектов этой группы они превышают 200 г/т, а в среднем составляют около 150 г/т. Серебро не всегда имеет заметную корреляцию со свинцом, так как довольно часто входит в состав тетраэдрита (например, на месторождениях района Стерджен-Лейк в зеленокаменном поясе Вабигун). Примечательно, что на некоторых месторождениях этой группы серебром обогащены и сульфиды в сланцах, сменяющих рудные тела по латерали (месторождение Маттаби) [Franklin, 1992].

Содержание золота в суммарных запасах составляет лишь около 0,5 г/т, т.е. почти в 2 раза ниже, чем на одновозрастных месторождениях — аналогах уральского типа.

Среди всех типов колчеданных месторождений вулканической ассоциации и их разновозрастных аналогов позднеархейские месторождения — аналогичные типу куроко отличаются наивысшей степенью обогащения цинком относительно меди ($\text{Cu}/\text{Zn} = 1:10,3$) и серебром относительно золота ($\text{Au}/\text{Ag} = 0,003$) (табл. 1).

На диаграмме $100\text{Cu}/(\text{Cu}+\text{Zn})-\text{Ag}/\text{Pb}$ позднеархейские месторождения — аналогичные типу куроко в целом группируются в поле, отвечающем фанерозойским месторождениям этого типа, в то же время явно отличаясь от большинства из них как относительно пониженной величиной медно-цинкового

отношения, так и более высоким серебро-свинцовым отношением.

Среди позднеархейских месторождений — аналогов типа куроко крупные по запасам объекты практически не встречаются (крупнейшее месторождение Батерст-Норсмайнс в провинции Слейв имеет запасы около 19,1 млн т руды). Как по медианным (3000 тыс. т), так и по средним запасам (около 4400 тыс. т), они значительно уступают не только фанерозойским месторождениям типов куроко и уральского, но и их аналогам раннепротерозойского возраста (табл. 1).

Подразделение позднеархейских месторождений на две группы согласуется с представлениями о двух типах позднеархейских зеленокаменных поясов [Хаин, Божко, 1988]. Различия между ними в итоге сводятся к масштабам растяжения сиалического протоконтинентального основания поясов. Зеленокаменные пояса Вабигун в провинции Сьюперитор и Хакетт-Ривер в провинции Слейв, где компактно размещены месторождения — аналогичные типу куроко, характеризуются бимодальным характером вулканизма при преобладании кислых вулканитов в разрезе формации, что свидетельствует о сохранении под всем поясом сплошности сиалического основания, хотя и менее мощного и пронизанного внедрениями основной—ультраосновной магмы (пояса неполного развития). Месторождения — аналогичные уральского типа тяготеют к поясам полного развития, которым был свойствен переход от рифтинга начальных стадий развития к ограниченному спредингу с образованием «протоофиолитовой» коры и, вероятно, субдукции, ответственной за смену толеитового вулканизма известково-щелочным, напоминающим современный островодужный.

В позднем архее формирование зеленокаменных поясов и в их пределах колчеданноносных рудных районов с месторождениями — аналогами типов уральского и куроко совпало с крупнейшим пиком активности мантийных суперплюмов, непосредственно предшествовало становлению Пангеи 0 и прекратилось после сбора суперконтинента.

Таким образом, хотя в современном виде дифференциация колчеданных месторождений на типы проявилась уже в конце протерозоя—палеозое в ходе суперконтинентального цикла палеозойской Пангеи, однако история формирования месторождений кипрского типа может быть прослежена до раннего протерозоя, вплоть до начала сбора Пангеи 1, а типа бесси — по крайней мере до начала раскола этого суперконтинента в среднем протерозое. В то же время аналогичные фанерозойским месторождениям типов уральского и куроко идентифицируются уже среди месторождений позднеархейского возраста. В дальнейшем каждый тип претерпевал эволюцию признаков в соответствии с развитием литосферы и внешних геосфер Земли. Один из важнейших аспектов этой эволюции — постепенное изменение состава руд месторождений разных типов при сохранении общих соотношений между ними.

Эволюция состава руд месторождений разных типов и их аналогов. Поскольку не установлены месторождения — аналоги кипрского типа древнее 1970 млн лет и месторождения, аналогичные относимым к типу бесси, древнее 1,4 млрд лет, то в наиболее полном виде эту эволюцию можно проследить на примере месторождений типов уральского и куроко и их древних аналогов.

Треугольная диаграмма состава руд этих месторождений демонстрирует закономерное обогащение со временем их руд медью и свинцом относительно цинка (рис. 1). Как следует из табл. 1, при переходе от позднеархейских месторождений типа куроко к их раннепротерозойским и далее к фанерозойским аналогам отношение Cu/Zn увеличивается в 4 раза, а Pb/Zn — в 2,4 раза. Это достигается за счет повышения среднего содержания меди (в 2,5 раза) и свинца (в 1,4 раза), а также снижения среднего содержания цинка (в 1,8 раза). В этом же ряду в целом закономерно изменяются и другие геохимические показатели (рис. 2), в частности уменьшается серебро-свинцовое отношение (в 4,3 раза). Это также является результатом снижения среднего содержания серебра (в 2,5 раза) и увеличения содержания свинца.

Сходным образом изменяются и соответствующие показатели месторождений уральского типа и их аналогов. От древнейших, позднеархейских, аналогов к раннепротерозойским и наконец к классическим фанерозойским месторождениям уральского типа происходит увеличение значений отношения Cu/Zn в 3 раза. Это результат увеличения среднего содержания меди в 1,5 раза при одновременном снижении содержания цинка в 2 раза. Хотя месторождений с промышленно значимым содержанием свинца среди этих месторождений мало, тем не менее можно говорить об увеличении в том же ряду отношения Pb/Zn в 1,6 раза (достигается главным образом за

счет снижения среднего содержания Zn), а также о снижении величины Ag/Pb в 3,3 раза (в основном за счет уменьшения содержания серебра в рудах). Таким образом, можно говорить об однонаправленности эволюции состава руд месторождений разных типов и их докембрийских аналогов.

Причиной изменений такого рода является эволюция планеты, в частности, дифференциация вещества Земли, ее остывание и связанные с этим изменения тектонических режимов и механизмов магмообразования.

Средне-позднеархейские колчеданные месторождения находятся в пределах зеленокаменных поясов, средний состав которых отвечает коматиитам. Выплавление таких высокотемпературных (до 1800 °С) лав стало возможным благодаря зонной дифференциации земного вещества, связанному с ней выделению гравитационной энергии и разогреву верхней мантии. Периоды ее максимального перегрева (3,8–3,4 и 3,0–2,6 млрд лет) совпадают с эпохами массового выплавления коматиитов [Коваленко и др., 1987; Старостин, Сорохтин, 2002].

Ученые продолжают оживленно обсуждать механизмы образования континентальной коры в архее. К крайним позициям относится актуалистическая точка зрения, согласно которой в архее образование континентальной коры происходило в основном за счет аккреции вулканических дуг, как это происходит в настоящее время [Kusky, Pollat, 1999; Lowe, 1994]. Однако по ряду признаков (в частности по отсутствию офиолитов и зон метаморфитов высокого давления [Condie, 1997]) современные конвергентные окраины плит отличаются от архейских. Полярным является представление о том, что в раннем докембрии процессы, протекавшие на окраинах плит, играли крайне незначительную роль [Hamilton, 1998].

В настоящее время большинство исследователей исходят из того, что первые признаки горизонтальных перемещений литосферных плит проявились уже при формировании зеленокаменных поясов архея [Сорохтин и др., 2001; Сорохтин, Ушаков, 2002; Хаин, 2000; Хаин, Божко, 1988; De Wit, 1998; Smithies et al., 2003]. Практически общим является мнение, что в архее верхняя мантия имела более высокую температуру и на обширных участках могла подвергаться плавлению с образованием коры океанического типа. Последняя в архее отличалась повышенной мощностью (в среднем 20–25 км против 6–7 км в настоящее время), была более горячей (из-за перегрева верхней мантии), а скорость раздвижения океанической коры в рифтовых зонах того времени (результат пластичного рифтогенеза, по [Хаин, Божко, 1988]) была исключительно высокой, поскольку скорость конвективных потоков в перегретой мантии была намного выше, чем в последующие эпохи [Сорохтин и др., 2001].

По мнению ряда исследователей, все эти явления приводили к тому, что даже и в позднем архее горячая океаническая кора длительное время (вероятно,

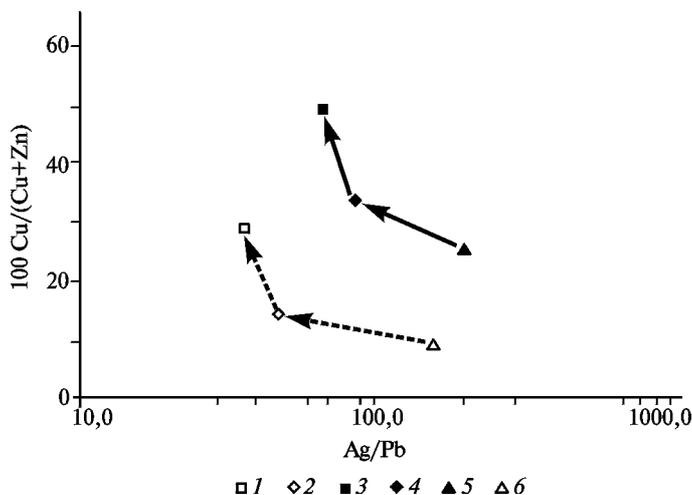


Рис. 2. Эволюция состава руд колчеданных месторождений в позднем архее—фанерозое: фанерозойские месторождения куроко (1), их раннепротерозойские (2) и позднеархейские (6) аналоги, фанерозойские месторождения уральского типа (3), их раннепротерозойские (4) и позднеархейские (5) аналоги

до 80 млн лет [Groves et al., 2005]) сохраняла свою плавучесть. Возможность ее участия в процессах субдукции из-за этого была существенно ограничена. По этой причине в архее не могли существовать зоны поддвига, и компенсация спрединга океанического дна происходила в зонах торшения плит и скупивания океанической коры с обдукцией базальтовых пластин одна на другую над нисходящими потоками в конвектирующей мантии [Сорохтин и др., 2001; Сорохтин, Ушаков, 2002; De Wit, 1998]. Последующее вторичное переплавление этих гидратированных базальтовых плит, происходившее на подошве зон их торшения, приводило к выплавлению более легких континентальных магматических пород, состав которых отвечал тоналит-гранодиоритовой ассоциации (ассоциации ТТГ). Они, будучи более легкими, всплывали в виде диапиров и куполов в верхние этажи растущей континентальной коры.

В то же время большинство авторов, признавая возможность ограниченной субдукции в позднеархейское время, указывают на отличие этих процессов от современных. Повышенная плавучесть горячих базальтовых плит, высокая скорость субдукции, большая мощность океанической коры делали возможной только очень пологую субдукцию, приближающуюся к горизонтальной [Abbott et al., 1994]. Петрологические свидетельства пологой субдукции, устанавливаемые на современных активных окраинах плит (адакиты — породы, обогащенные кремнеземом, натрием и литофильными элементами с крупным ионным радиусом; высокомагнезиальные базальты типа бонинитов; высокомагнезиальные андезиты; базальты, обогащенные ниобием), проявлены и в позднеархейских зеленокаменных поясах, в частности в поясе Абитиби. Однако в условиях пологой субдукции процессы магмообразования протекают практически без участия мантийного клина, за счет плавления самой коматиитовой коры [Smithies et al., 2003].

Таким образом, все авторы практически едины во мнении, что в архее континентальная кора развивалась преимущественно за счет плавления мощной протоокеанической коматиитовой коры. Вулканические процессы при этом могли сопровождаться образованием колчеданных месторождений тех металлов, которые претерпели предварительное обогащение при выплавке коматиитов.

Коматиитовые лавы, в частности, в районе месторождения Кидд-Крик в зеленокаменном поясе Абитиби сильно обогащены сидерофильными элементами: Ni (0,03–0,13%), Co (0,008–0,01%), Cr (0,17–0,28%), V (0,12–0,20%) (см. табл. 1 в [Robinson, Hutchinson, 1982]). Известна связь с архейскими коматиитами или ультраосновными интрузивными породами того же возраста месторождений никеля, способного замещать магний в минералах (например, месторождения типа Камбалда в коматиитовых лавах в Австралии, аналогичные месторождения Лангмюр, Редстоун, Марбридж и другие в поясе Абитиби в

Канаде). Архейские магматические медно-никелевые месторождения по сравнению с более поздними протерозойскими и фанерозойскими месторождениями в расслоенных габбро-норитовых комплексах характеризуются намного более низким содержанием меди и очень высокими значениями отношения Ni/Cu, изменяющимися от 10 до 20.

Из халькофильных элементов в заметном количестве в коматиитах присутствовал лишь цинк (0,003–0,007%), также обладающий способностью замещать магний, а содержание меди было в 10–20 раз ниже. Таким образом, коматиитовые магмы, очевидно, были обеднены медью относительно цинка. При переплавлении их с образованием базальтовых, андезитовых и риолитовых лав, состав которых изменялся от толеитового до известково-щелочного в верхней части разреза вулканогенных формаций, руды формирующихся позднеархейских вулканогенных колчеданных месторождений — аналогов уральского типа наследовали обогащение цинком и низкое отношение Cu/Zn. Аналогичные причины действовали и в отношении месторождений — аналогов типа куроко.

Однако к 2,6 млрд лет назад завершилось обособление жидкого ядра Земли, уменьшились тектоническая активность Земли, температура в верхней мантии и тепловой поток планеты. В результате стала снижаться скорость субдукции, увеличились углы погружения слэба и возросла роль частичного плавления пород мантийного клина в процессах магмообразования на активных окраинах плит. Выплавка коматиитов в раннем протерозое стала исключительно редким явлением, а в последующем прекратилась. Ювенильная океаническая кора стала образовываться за счет выплавки легкоплавких базальтов, характеризовавшихся более высокими содержанием меди и отношением Cu/Zn. Это повлекло соответствующие изменения состава руд колчеданных месторождений типов уральского и куроко, а также их протерозойских аналогов. В дальнейшем этот процесс непрерывно продолжался.

Примечательно, что среднее содержание свинца в рудах возрастает только на месторождениях, образующихся в энциалической обстановке, тогда как на месторождениях уральского типа и их древних аналогах они остаются почти неизменными в течение последних почти 2,8 млрд лет. Это указывает на эволюцию состава образующейся континентальной коры, как на возможную причину обогащения свинцом руд месторождений типа куроко и их аналогов. При их формировании важную роль играли кислые магмы, связанные с частичным плавлением вещества сиалической коры.

Наиболее древние из месторождений — аналогов типа куроко формировались в пределах позднеархейских зеленокаменных поясов неполного развития, где протосиалическая кора возникла в результате частичного плавления нижней части базальт-коматиитовой коры и отвечала по составу натровым гранитоидам

ассоциации ТТГ, бедным литофильными элементами с большим ионным радиусом, в том числе свинцом. Колчеданные месторождения, образовывавшиеся в энсиалических обстановках, стали, по существу, первыми в истории Земли месторождениями свинец-содержащих руд. Однако содержание свинца в них было очень низким, как и отношение Pb/Zn.

В дальнейшем континентальная кора разрасталась за счет присоединения к кратонам островных дуг, сложенных известково-щелочными вулканитами. Последние возникли в результате частичного плавления метасоматизированной мантии при участии летучих, отделявшихся при дегидратации погружающегося слэ-

ба. Известково-щелочным магмам было свойственно повышенное содержание элементов с крупными ионными радиусами, в том числе K, Rb, Cs, Pb, Ba, U, Th. Таким образом, со временем состав континентальной коры постепенно менялся, и в ходе каждого следующего суперконтинентального цикла в процессах магмообразования участвовала континентальная кора, сильнее обогащенная свинцом по сравнению с предыдущим циклом. Это обусловило увеличение как среднего содержания свинца, так и свинцово-цинкового отношения в рудах месторождений, при образовании которых кора континентального типа служила одним из источников рудного вещества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Еремин Н.И., Дергачев А.Л., Сергеева Н.Е., Позднякова Н.В. Типы колчеданных месторождений вулканической ассоциации // Геология руд. месторождений. 2000. № 2. С. 177–190.
- Еремин Н.И., Дергачев А.Л., Позднякова Н.В., Сергеева Нат.Е. Эпохи вулканогенного колчеданного рудообразования в истории Земли // Там же. 2002. № 4. С. 259–275.
- Коваленко В.И., Богатилов О.А., Дмитриев Ю.И., Кононова В.А. Общие закономерности эволюции магматизма в истории Земли // Магматические горные породы. М.: Наука, 1987. Т. 6. С. 332–348.
- Контарь Е.С. Колчеданные руды в геологической истории Земли // Геология и минерагения подвижных поясов. Екатеринбург, 1997. С. 79–96.
- Сорохтин О.Г., Старостин В.И., Сорохтин Н.О. Эволюция Земли и происхождение полезных ископаемых // Изв. секции наук о Земле РАЕН. 2001. № 6. С. 5–25.
- Сорохтин О.Г., Ушаков С.А. Развитие Земли. М.: Изд-во МГУ, 2002.
- Старостин В.И., Сорохтин О.Г. Эволюция Земли и металлогения // Изв. секции наук о Земле РАЕН. 2002. № 8. С. 64–76.
- Хаин В.Е. Проблемы тектоники раннего докембрия // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2000. № 4. С. 13–24.
- Хаин В.Е., Божко Н.А. Историческая геотектоника. Докембрий. М.: Недра, 1988.
- Abbott D.H., Drury R., Smith W.H.F. A flat to steep transition in subduction style // Geology. 1994. Vol. 22. P. 937–940.
- Condie K.C. Contrasting sources for upper, and lower continental crust: the greenstone connection // J. Geol. 1997. Vol. 105. P. 729–736.
- De Wit M.J. On Archean granites, greenstones, cratons and tectonics: does the evidence demand a verdict // Precamb. Res. 1998. Vol. 91. P. 181–226.
- Franklin J.M. Volcanic-associated massive sulfide deposits // Gold and base-metal mineralization in the Abitibi subprovince, Canada, with emphasis on the Quebec segment. Perth, 1992. P. 211–241.
- Gower C.F., Tucker R.D. Distribution of pre-1400 Ma crust in the Grenville Province: Implications for rifting in Laurentia-Baltica during Geon 14 // Geology. 1994. Vol. 22. P. 827–830.
- Groves D.I., Condie K.C., Goldfarb R.J. et al. Secular changes in global tectonic processes and their influence on the temporal distribution of gold-bearing mineral deposits // Econ. Geol. 2005. Vol. 100. P. 203–224.
- Hamilton W.B. Archean magmatism and deformation were not products of plate tectonics // Precamb. Res. 1998. Vol. 91. P. 143–179.
- Hutchinson R.W. Volcanogenic sulfide deposits and their metallogenic significance // Econ. Geol. 1973. Vol. 68. P. 1223–1246.
- Kusky T.M., Pollat A. Growth of granite-greenstone terranes at convergent margins, and stabilization of Archean cratons // Tectonophysics. 1999. Vol. 305. P. 45–73.
- Lowe D.R. Accretionary history of the Archean Barberton greenstone belt (3,55–3,22 Ga), Southern Africa // Geology. 1994. Vol. 22. P. 1099–1102.
- Nold J.L. The Idaho cobalt belt, northwestern United States — a metamorphosed Proterozoic exhalative ore district // Mineral. Deposita. 1990. Vol. 25. P. 163–168.
- Robinson D.J., Hutchinson R.W. Evidence for a volcanic-exhalative origin of a nickel sulfide deposit at Redstone, Timmins, Ontario // Precambrian sulfide deposits. Geol. Assoc. of Canada Spec. Pap. 25. 1982. P. 211–254.
- Smithies R.H., Champion D.C., Cassidy K.F. Formation of Earth's early Archean continental crust // Precamb. Res. 2003. Vol. 127. P. 89–101.

Поступила в редакцию

07.10.2008

Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова,
кафедра геологии и геохимии полезных ископаемых,
А.Л. Дергачев — доцент,
e-mail: alderg@geol.msu.ru;
Н.И. Еремин — чл.-корр. РАН, профессор,
e-mail: eremin@geol.msu.ru;
Н.Е. Сергеева — ст. науч. сотр.,
e-mail: nat45326@yandex.ru