

УДК 553.44

А.Л. Дергачев¹

ГЛОБАЛЬНЫЕ ФАКТОРЫ СВИНЦОВО-ЦИНКОВОГО РУДООБРАЗОВАНИЯ

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», геологический факультет, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1

Moscow State University, Faculty of Geology, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1

Тектоническая эволюция Земли — ведущий фактор, обусловивший неравномерное распределение запасов свинца и цинка в геологическом времени. Циклические изменения продуктивности свинцово-цинкового рудообразования отражали периодическую амальгамацию большинства блоков континентальной коры, образование, стабилизацию и окончательный распад суперконтинентов. Многие особенности возрастных спектров запасов свинца и цинка обусловлены постепенным разрастанием коры континентального типа в результате аккреции островных дуг к кратонным ядрам, расширяющимся распространением энсиалических обстановок рудообразования и возрастающей ролью континентальной коры в процессах магмообразования.

Ключевые слова: историческая металлогения, месторождения свинца и цинка, суперконтинентальные циклы, эволюция процессов рудообразования.

Tectonic evolution of the Earth is a principle global factor responsible for uneven distribution of lead and zinc reserves in geological time. Cyclic changes in productivity of lead-zinc ore-formation processes resulted from periodical amalgamation of most blocks of continental crust, formation, stabilization and final break-up of supercontinents. Many features of age spectrums of lead and zinc reserves are caused by gradual increase of volume of continental crust resulting from accretion of island arcs to ancient cratons, widening of distribution of ensialic environments of ore-formation and increasing role of continental crust in magmatic processes.

Key words: historic metallogeny, lead and zinc deposits, supercontinental cycles, evolution of ore-formation processes.

Введение. Распределение запасов разнообразных полезных ископаемых в геологическом времени, а также причины, которые обуславливают его, представляют одну из наиболее интригующих загадок природы.

Ранее с использованием кривых функции плотности вероятности (ФПВ) была установлена крайняя неравномерность распределения месторождений Pb и Zn и современных запасов этих металлов в геологической истории [Дергачев и др., 2015]. Эти кривые характеризуются присутствием нескольких кластеров пиков, отвечающих относительно кратким эпизодам исключительно высокой продуктивности процессов свинцово-цинкового рудообразования (2750–2680, 1925–1580, 560–290, 120–0 млн л. н.), которые можно рассматривать как важнейшие металлогенические эпохи. Однако требуют объяснения как причины их повторения, так и периодичность с которой они наступают.

Не вполне ясны и причины, обусловившие другие особенности возрастных спектров запасов металлов: закономерное в целом возрастание от более ранних к более поздним эпохам свинцово-цинкового рудообразования как средней (0,01–0,30–0,63–0,85 для Pb и 0,41–0,56–1,72–1,79 для Zn, млн т/млн лет), так и максимальной про-

дуктивности процессов накопления современных запасов металлов (0,02–1,96–1,38–1,73 для Pb и 1,05–1,98–4,96–3,34 для Zn), а также увеличение с течением времени продолжительности таких эпох от 70 до 270–345 млн лет [Дергачев и др., 2015, табл. 3].

Перечисленные основные металлогенические эпохи в возрастных спектрах месторождений и запасов Pb и Zn разделены явными минимумами, которым отвечают периоды 3500–2750, 2680–1925, 1580–560, 290–120 млн л. н. В течение последних 3500 млн лет геологической истории суммарная продолжительность этих периодов составляла 2695 млн лет (77%). Однако им отвечают лишь 18 и 24% современных запасов Zn и Pb соответственно. Минимумы лучше выражены на кривых функции плотности вероятности месторождений. В возрастных спектрах запасов они осложняются локальными максимумами кривых функции плотности вероятности запасов Pb (1472, 956, 893, 742, 270, 224, 172 млн л. н.) и Zn (742, 227, 166 млн л. н.), которые заполняют промежутки между главными кластерами пиков. Таким узким, но довольно высоким пикам обычно соответствуют единичные, хотя иногда и значительные по запасам месторождения. В архее и протерозое в

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

периоды, отвечающие минимумам кривых ФПВ, продуктивность процессов накопления современных запасов металлов уменьшалась в несколько десятков раз по сравнению с главными кластерами пиков, а в периоды 3400–3250 и 2660–2250 млн л. н. сокращалась практически до нуля. Однако с течением времени средняя продуктивность накопления современных запасов металлов в периоды между главными эпохами свинцово-цинкового рудообразования постепенно возрастала (млн т/млн лет) от 0,01 до 0,55 для Zn и от менее чем 0,01 до 0,36 для Pb. Возрастание запасов металлов и численности месторождений, возникавших за рамками основных эпох свинцово-цинкового рудообразования, требует объяснения.

Свинец и цинк чаще всего встречаются совместно в рудах комплексных свинцово-цинковых месторождений различных типов. Устойчивая ассоциация Pb и Zn обуславливает высокое сходство возрастных спектров как месторождений, так и современных запасов этих металлов, а также кумулятивных кривых запасов Pb и Zn (рис. 1). Наиболее значительное различие заключается практически в отсутствии в возрастном спектре запасов Pb пика в интервале 2750–2680 млн л. н.,

отвечающем древнейшей эпохе свинцово-цинкового рудообразования. От более поздних эпох она отличается исключительно низкими значениями отношения Pb/Zn в суммарных запасах (<0,06). Хотя накопление запасов Pb и Zn началось почти одновременно (древнейшие свинцово-цинковые месторождения появились около 3460 млн л. н.), создается впечатление, что в архее и палеопротерозое накопление запасов Pb происходило более медленным темпом, и кумулятивные запасы Pb и Zn (в долях от их суммарных современных запасов) сравнялись только около 1650 млн л. н.

Факторы, обусловившие эти и другие особенности возрастных спектров месторождений и запасов Pb и Zn, не очевидны, статья и посвящена их специальному рассмотрению.

Тектонические (суперконтинентальные) циклы и эпохи свинцово-цинкового рудообразования. Исключительная неравномерность распределения различных типов месторождений полезных ископаемых в геологическом времени признана уже давно (в частности, в [Meyer, 1985, 1988]. После публикации [Barley, Groves, 1992] широкое распространение получили представления о том, что периодически повторявшиеся подъемы и спады

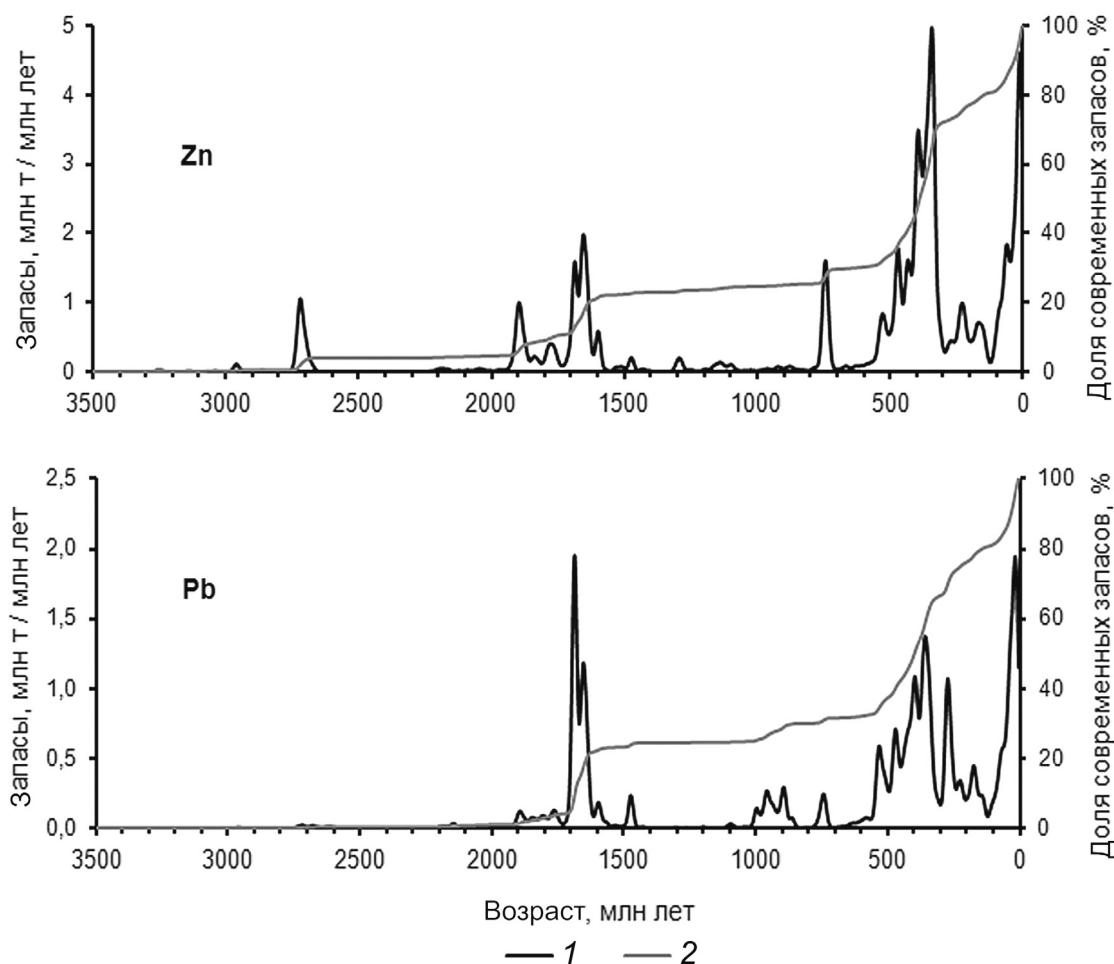
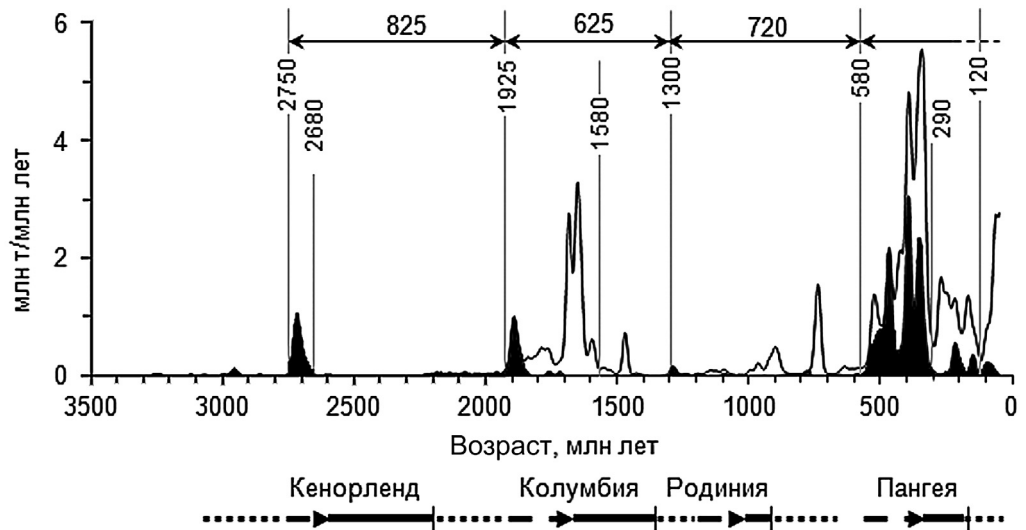


Рис. 1. Графики функции плотности вероятности (ФПВ) современных запасов Zn и Pb на месторождениях всех типов (1) и кумулятивные кривые накопления запасов металлов (2). Гауссово окно сглаживания, $d = 50$ млн лет

Рис. 2. Совмещенные графики ФПВ суммарных запасов металлов (Pb+Zn) на свинцово-цинковых месторождениях всех типов и на вулканогенных колчеданных месторождениях (тип VMSD показан черной заливкой). Гауссово окно сглаживания, $d=50$ млн лет



рудообразования некоторых типов могли быть связаны с длиннопериодными тектоническими циклами, включавшими постепенное сближение блоков континентальной коры по зонам субдукции, амальгамацию всех или большинства континентальных плит с образованием суперконтинентальных массивов, распад последних в результате рифтогенеза и раскрытие океанов.

Однако цикличность тектонических процессов, по-видимому, в значительной степени определила не только периодическое возобновление рудообразования того или иного типа (например, вулканогенного колчеданообразования [Еремин и др., 2002]), но и распределение в геологическом времени месторождений и запасов разнообразных полезных ископаемых, в том числе суммарных для всех типов месторождений запасов Pb и Zn. Действительно, как следует из анализа рис. 2, первый крупный максимум продуктивности накопления современных запасов этих металлов (2750–2680 млн л. н.) и последующие два важных кластера пиков (1925–1580 и 560–290 млн л. н.) по времени отвечают трем разным суперконтинентальным циклам. В периоды, отвечающие кластерам пиков ФПВ запасов Pb и Zn, продуктивность процессов свинцово-цинкового рудообразования многократно возрастала по сравнению с периодами их минимальной активности (таблица).

Сравнение графиков ФПВ современных суммарных запасов Pb и Zn на месторождениях всех типов и запасов металлов в месторождениях типа VMSD показывает, что в неорархее и палеопротерозое первые пики в возрастных спектрах современных запасов металлов на 2718, 1895 (1893 для Pb) млн л. н. были обусловлены максимумами продуктивности рудообразования типа VMSD.

В кенорском цикле, которому соответствует неорархейская эпоха свинцово-цинкового рудообразования (2750–2680 млн л. н.), накопление запасов металлов (преимущественно Zn) по существу ограничилось сравнительно непродолжительной

(около 70 млн лет) вспышкой рудообразования типа VMSD. В колумбийский цикл палеомезопротерозойская эпоха (1925–1580) выражена кластером пиков ФПВ запасов металлов. Первый из них также обусловлен массовым образованием месторождений типа VMSD, которое продолжалось около 90 млн лет, достигло максимума продуктивности около 1895 млн л. н. и в целом завершилось около 1840 млн л. н.

Средняя продуктивность процессов свинцово-цинкового рудообразования в различные периоды геологической истории

Пик/кластер пиков ФПВ, млн л. н.	Периоды минимальной продуктивности	Средняя (максимальная) продуктивность образования запасов металлов, млн т / млн лет		Накопленные запасы, % от современных	
		Pb	Zn	Pb	Zn
	3500–2750	0,00	0,01	0,05	0,48
2750–2680		0,01 (0,02)	0,41 (1,05)	0,20	3,37
	2680–1925	0,01	0,01	0,79	0,94
1925–1580, в том числе 1730–1620		0,30 0,77 (1,96)	0,56 1,01 (1,98)	21,73 17,60	17,24 10,00
	1580–560	0,05	0,09	9,74	8,63
560–290, в том числе 450–290		0,63 0,78 (1,38)	1,72 2,33 (4,96)	34,3 24,68	41,69 33,42
	290–120	0,36	0,55	13,65	8,33
120–0, в том числе 60–10		0,85 1,27	1,79 2,53	19,54 13,02	19,32 10,79

В пангейский цикл неопротерозойско-палеозойская (560–290 млн л. н.) эпоха свинцово-цинкового рудообразования также начиналась массовым образованием месторождений типа VMSD. В палеозое резкий подъем продуктивности свинцово-цинкового рудообразования после 560 млн л. н. также в значительной степени был

обусловлен именно всплеском вулканогенного колчеданообразования после 580 (550) млн л. н.

Первым вступлением к каждой эпохе свинцово-цинкового рудообразования была вспышка вулканогенного колчеданообразования в надсубдукционных обстановках, в пределах островных дуг и задуговых бассейнов на стадии сближения блоков континентальной коры по зонам субдукции, а значит, их появление предшествовало окончательному формированию устанавливаемых с разной степенью определенности суперконтинентов (млн л. н.) Кенорленд (около 2600), Колумбия (около 1800) и Пангея (около 330). Таким образом, циклические изменения продуктивности свинцово-цинкового рудообразования, вероятнее всего, обусловлены циклическостью тектонического развития планеты.

Тектонический фактор, по-видимому, отчасти обусловил и возрастание продолжительности эпох свинцово-цинкового рудообразования с течением времени. В кенорский цикл после стабилизации суперконтинента в течение более чем 750 млн лет возникали очень незначительные по запасам и весьма редкие месторождения Pb и Zn, а месторождения с возрастом 2680–2250 млн лет вообще отсутствуют в базе данных, включающей свыше 2000 Pb-Zn месторождений.

В колумбийский цикл палеомезопротерозойская эпоха рудообразования также началась формированием многочисленных и крупных месторождений типа VMSD, которое продолжалось около 90 млн лет. Однако после амальгамации около 30 малых плит, практически повсеместного прекращения вулканических процессов и стабилизации суперконтинента в его пределах установился специфический тектонический режим обширных, удлиненных, медленно прогибавшихся рифтогенных бассейнов, где накапливались мощные толщи осадочных пород. В изменяющихся тектонических обстановках после завершения вспышки рудообразования типа VMSD появились месторождения новых типов. Вулканогенное колчеданообразование сменилось формированием эксгальационно-осадочных месторождений Pb и Zn в терригенных или карбонатно-терригенных породах (тип SEDEX), и палеомезопротерозойская эпоха свинцово-цинкового рудообразования (1925–1580 млн л. н.) оказалась намного продолжительнее неогаргейской.

Аналогичным образом в пангейский цикл начало неопротерозойско-палеозойской эпохи рудообразования (560–290 млн л. н.) ознаменовалось не только формированием многочисленных и крупных месторождений типа VMSD, но и почти одновременными вспышками рудообразования типа SEDEX на пассивных континентальных окраинах (реактивизированных, расщепленных) и в задуговых рифтах, а позднее (около 425–410 млн л. н.) и типа долины Миссисипи (MVT) в рифтогенных прогибах. Эта эпоха стала наиболее продуктивной в истории Земли именно в результате

совпадения пиков рудообразования разных типов (VMSD, SEDEX и в намного меньшей степени MVT). Однако после завершения сбора Пангеи около 330 млн л. н. интенсивность вулканических процессов и связанного с ними вулканогенного колчеданообразования в глобальном масштабе резко снизились, а после 310 млн л. н., по существу, прекратилось и образование эксгальационно-осадочных месторождений в терригенных породах (тип SEDEX). Сравнительно высокая продуктивность процессов свинцово-цинкового рудообразования, сохранявшаяся приблизительно до 290 млн л. н., была обусловлена в основном формированием месторождений типа MVT в пределах эпикратонных карбонатных платформ на пассивных континентальных окраинах, а также в прогибах форланда (пики ФПВ запасов металлов на 250–273 млн л. н.). Распространение новых типов месторождений и расширение спектра геотектонических обстановок, в которых протекали процессы рудообразования того или иного типа, стало причиной того, что продуктивность процессов свинцово-цинкового рудообразования в целом после 2250 млн л. н. никогда больше не снижалась до нулевого уровня.

Таким образом, тектоническая эволюция планеты, становление современной тектоники литосферных плит, нарастающее разнообразие типов свинцово-цинковых месторождений и расширение спектра тектонических обстановок, при которых могли образовываться свинцово-цинковые месторождения (например, типа SEDEX), можно рассматривать в качестве причин увеличения продолжительности эпох свинцово-цинкового рудообразования.

В кажущемся противоречии с этим находится отсутствие какой-либо крупной эпохи свинцово-цинкового рудообразования, соответствующей суперконтинентальному циклу Родинии [Еремин и др., 2002]. Для этого цикла не установлены признаки какой-либо значительной вспышки вулканогенного колчеданообразования, которая соответствовала бы стадии сбора этого суперконтинента. Немногочисленные примеры вулканогенных колчеданных месторождений известны лишь в пределах пояса Намаква–Наталь к западу от архейского Каапваальского кратона (ЮАР), а также в провинции Аравалли–Дели (Индия). В первом случае они имеют возраст в интервале 1299–1190 млн лет, относятся к подтипу бесси, а в исключительных случаях — к аналогам фанерозойского уральского типа. В поясе Аравалли–Дели, в отложениях супергруппы Дели небольшие колчеданно-полиметаллические месторождения с возрастом 1102–1087 млн л. н. связаны с бимодальной базальт-риолитовой, а в исключительных случаях — с недифференцированной базальтоидной формацией. Эти месторождения могли формироваться в обстановках островных дуг и задуговых

бассейнов при закрытии океана Дели (по разным данным, около 1100 или 1000–900 млн л. н.).

В цикле Родинии продуктивность накопления запасов Zn на месторождениях типа VMSD достигла максимума около 1284 млн л. н. Но она была на порядок ниже соответствующих показателей более ранних суперконтинентальных циклов, и вклад сформировавшихся в этот период месторождений в современные мировые запасы Zn и особенно Pb ничтожен. В период 1350–750 млн л. н. большой редкостью были и свинцово-цинковые месторождения других типов. Предположительно в обстановках пассивных континентальных окраин возникли месторождения типа SEDEX с возрастом 1280–1240 млн лет, известные в поясе Гренвилл (террейны Эльзевир и Фронтинак) [Davidson, 2008]. Однако эти малочисленные и относительно скромные по запасам месторождения не дают основания говорить о наступлении новой металлогенической эпохи, и с ними не связано никакого значительного роста продуктивности свинцово-цинкового рудообразования.

В истории Родинии еще до окончательного сбора суперконтинента уже проявились первые признаки деструкции, а наиболее широким развитием процессов континентального рифтогенеза ознаменовался период 825–740 млн л. н. [Li et al., 2008]. В неопротерозойских рифтах находится около 20 месторождений типа SEDEX (преимущественно мелких), но никаких соответствующих им значительных максимумов продуктивности рудообразования в этот период не обнаружено. Для сравнения — в палеомезопротерозойскую эпоху именно в интраконтинентальных рифтах (неудавшихся рифтах), образовалась основная масса запасов металлов и многочисленные месторождения того же типа (в том числе НУС, Маунт-Айза, Сенчери, Брокен-Хилл и другие в Австралии, а также Раджпура-Дариба, Саладипура и многие другие в провинции Аравалли–Дели в Индии, а позднее — Сулливан в рифте Белт-Пурсел).

В интервале геологического времени, соответствующем циклу Родинии, отмечены лишь два более или менее значительных, но узких и изолированных максимума продуктивности процессов рудообразования (около 900 и 740 млн л. н.; рис. 1), но они связаны, по существу, с единичными крупными месторождениями типа SEDEX — Горевским (980–860 млн лет) и Холоднинским (750–730 млн лет).

В целом в металлогеническом отношении суперконтинентальная эпоха Родинии проявлена намного хуже остальных. Месторождения типа VMSD в цикле Родинии либо возникали редко, либо были уничтожены. Возможным объяснением в первом случае может быть неполный распад палеопротерозойского суперконтинента и как следствие малочисленность колчеданосных вулканических поясов, возникавших при сбо-

ре Родинии. Во втором случае причиной могло быть то, что многие из сформировавшихся подвижных поясов этого времени могли относиться к внутренним, т.е. при последующем закрытии океанов и образовании суперконтинента были вовлечены в процессы континентальной коллизии, сопровождавшейся короблением, интенсивными деформациями, увеличением мощности коры и метаморфизмом высоких ступеней, а затем подверглись воздыманию и интенсивной денудации. В таких условиях многие месторождения, залегавшие в верхней части коры, могли не сохраниться.

Существует и альтернативная точка зрения, согласно которой после 900–750 млн л. н. произошел распад не Родинии, а Колумбии, которая, таким образом, просуществовала в течение ~1 млрд лет. Однако более вероятным кажется предположение о неполном распаде Колумбии, после которого сохраняло стабильность ядро суперконтинента, включавшее Сибирь, Лаврентию и Балтику, объединившиеся еще при сборе Колумбии [Божко, 2011; Evans, 2013]. При сборе Родинии в результате гренвилльских коллизий к этому ядру были тектонически причленены Амазония, Индия и ряд других блоков. При таком подходе находит объяснение не только малочисленность пассивных континентальных окраин после распада Колумбии [Bradley, 2008], но и отмеченное выше отсутствие значительного пика вулканогенного колчеданообразования в мезопротерозое.

В то же время появление после длительного (около 500 млн лет) перерыва месторождений типа VMSD на стадии сбора Родинии, несмотря на их малочисленность, позволяет определить приблизительную периодичность повторения эпох свинцово-цинкового рудообразования. В неогарее–палеозое оно возобновлялось через 825–625–740 млн лет (в среднем 730 млн лет), что сопоставимо с продолжительностью суперконтинентальных циклов [Condie, 1998].

Нарушает эту закономерность появление максимума свинцово-цинкового рудообразования после 100 млн л. н., всего через 460 млн лет после начала неопротерозойско-палеозойской эпохи рудообразования. Несмотря на некоторый подъем рудообразования типа VMSD около 90 млн л. н. (в основном в поясе океана Тетис), а также около 15 млн л. н., мезозойско-кайнозойскому пику ФПВ запасов Pb и Zn не соответствует никакая вспышка вулканогенного колчеданообразования, сопоставимая по продуктивности и широте географического распространения месторождений с предшествующими металлогеническими эпохами. Примечательно, что после 300 млн л. н. очень низкой оставалась и продуктивность рудообразования типа SEDEX.

Мезозойско-кайнозойская эпоха рудообразования отличается от предыдущих как по ее месту в рамках незавершенного амазийского суперкон-

тинентального цикла, начавшегося после распада палеозойской Пангеи, так и по соотношению между типами свинцово-цинковых месторождений, совершенно необычному для предшествующих эпох. Важная роль в отношении продуктивности рудообразования и доли во вновь формирующихся запасах металлов в этот период играло рудообразование типа MVT (максимальные значения ФПВ на 83–87, 40–47 и 15 млн л. н.). Однако в целом мезозойско-кайнозойский максимум продуктивности рудообразования обусловлен появлением многочисленных и крупных скарновых и плутоногенных гидротермальных месторождений (кластер пиков ФПВ запасов металлов в интервале 40–15 млн л. н.). Судя по возрастным спектрам месторождений этих типов и спектрам современных запасов металлов в них, такие месторождения спорадически появлялись уже с конца палеопротерозоя (около 1700 млн л. н.), однако более или менее заметную роль они начали играть после 500 млн л. н., особенно широкое распространение они получили после 200 млн л. н. После 100 млн л. н. по продуктивности процессов рудообразования они лишь немного уступают суммарной продуктивности рудообразования типов VMSD, SEDEX и MVT, а в последние 50 млн лет в несколько раз опережают их.

Никаких геологических причин, препятствовавших формированию скарновых и плутоногенных гидротермальных месторождений Pb и Zn в предшествующие металлогенические эпохи, очевидно, не существовало. Гранитоидный магматизм в геологической истории неоднократно получал широкое развитие, а накопление известняков и доломитов, необходимых для формирования скарновых месторождений, началось еще в палеопротерозое. Вполне возможно, что максимумы продуктивности образования скарновых и гидротермальных месторождений могли быть и в более ранние металлогенические эпохи. Однако они связаны с орогенным гранитоидным магматизмом, формировались в верхней части земной коры в пределах поясов, подвергавшихся воздыманию и быстрой денудации, что ограничивало возможности сохранения таких месторождений от полного разрушения. Таким образом, эксгумация месторождений, возможно, представляет собой еще один фактор, повлиявший на возрастной спектр месторождений и спектр современных запасов Pb и Zn.

Периодическое приращение и эволюция состава коры континентального типа и соотношение Pb/Zn в рудах месторождений. При анализе возрастных спектров запасов металлов на рис. 1 обращает на себя внимание отсутствие пика ФПВ запасов Pb, отвечающего максимуму продуктивности накопления Zn в интервале 2750–2680 млн л. н., а также резкое различие продуктивности накопления запасов Pb и Zn в интервале 1925–1850 млн л. н. В первом случае максимум ФПВ запасов Zn

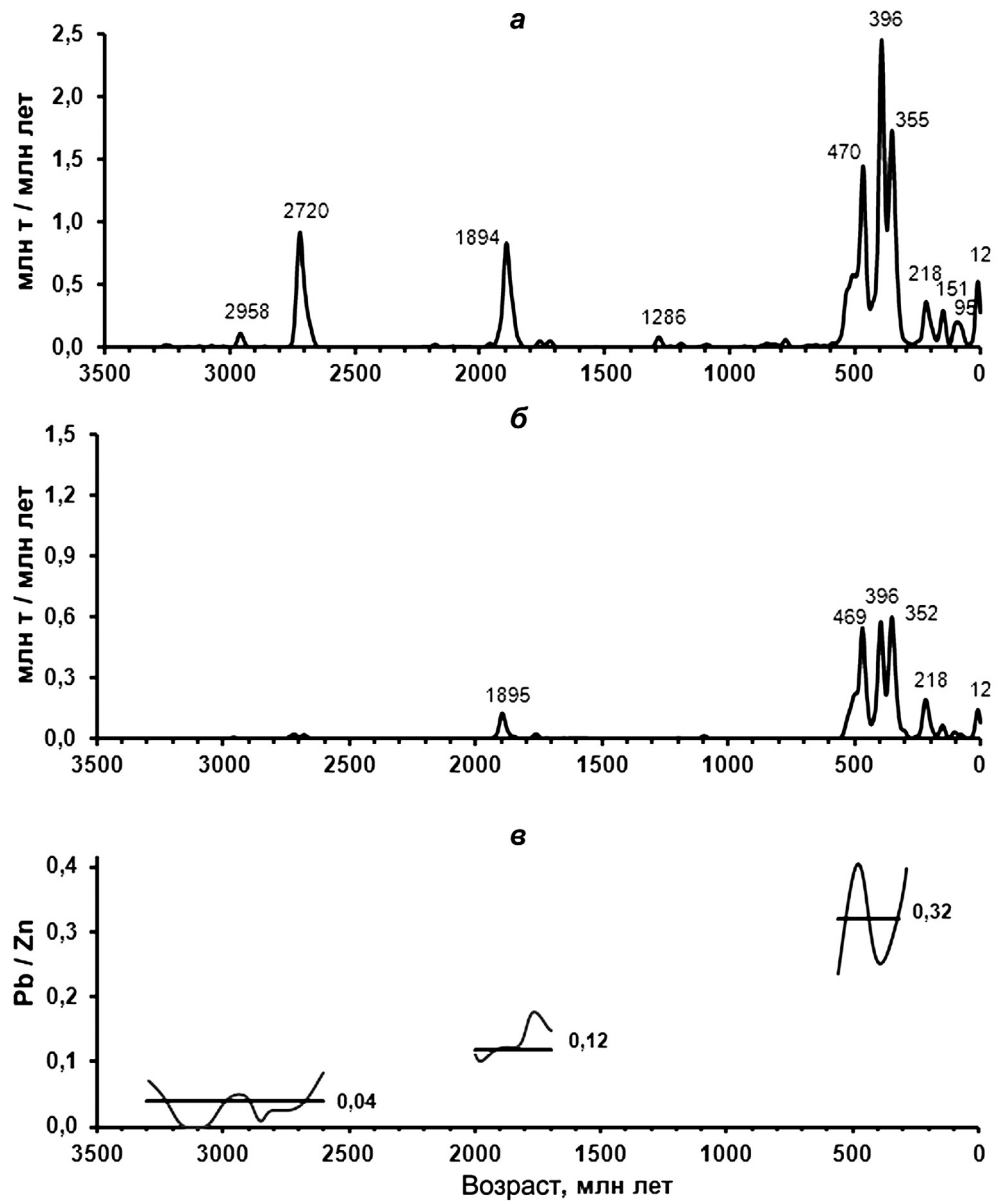
обусловлен исключительно, а во втором случае — преимущественно рудообразованием типа VMSD, так как месторождения остальных типов в истории Земли либо появились существенно позже (тип MVT), либо в указанный период вносили ничтожный вклад в современные запасы металлов (тип SEDEX, а также скарновые и гидротермальные месторождения). Таким образом, устанавливаемое различие в возрастных спектрах запасов свинца и цинка объясняется, видимо, эволюцией состава руд месторождений типа VMSD.

Действительно, в запасах руды вулканогенных колчеданных месторождений, образовавшихся 3250–2600 млн л. н., среднее отношение Pb/Zn составляет 0,04, тогда как в палеопротерозойскую эпоху, в период 2000–1700 млн л. н. оно возросло до 0,12, а в палеозое (540–250 млн л. н.) составило 0,32 (рис. 3). Такая эволюция среднего состава руд колчеданных месторождений, возникавших в различные эпохи, отражает изменения во времени соотношения между наиболее распространенными подтипами вулканогенных колчеданных месторождений — уральским и куроко.

Месторождения обеих этих групп формировались в пределах островодужных систем, ассоциируют с контрастными или последовательно дифференцированными вулканогенными формациями, а их пространственная позиция определяется размещением палеовулканических центров. Однако для фанерозойских месторождений уральского подтипа, а также их раннедокембрийских аналогов характерно преобладание основных пород в разрезе формации (доля кислых вулканитов изменяется от 30 до 10% и менее), смена толеитовых вулканитов известково-щелочными, а также медноколчеданный или медно-цинковый состав руд. Такие месторождения возникали в обстановках молодых энсиматических дуг при минимальном участии коры континентального типа в процессах магмообразования. Промышленное количество свинца установлено только на 1/3 из таких месторождений, а его доля в суммарном содержании Cu, Zn и Pb не превышает 10%.

В то же время месторождения подтипа куроко и их древнейшие аналоги встречаются в рудных районах, где в составе рудоносных базальт-риолитовых и риолитовых формаций преобладают, а нередко и господствуют кислые разности вулканогенных пород, демонстрирующие калиево-натриевый, калиевый или реже натриевый петрохимический профиль. Руды таких месторождений демонстрируют обогащение Zn относительно Cu, а также Pb относительно Zn. Именно распределение месторождений подтипа куроко в геологической истории Земли определяет возрастной спектр запасов Pb на месторождениях типа VMSD. Формирование месторождений подтипа куроко протекало в пределах энсиалических, реже зрелых энсиматических островных дуг и расщепленных

Рис. 3. Возрастные спектры запасов Zn (а) и Pb (б) на месторождениях типа VMSD и график изменения среднего отношения Pb/Zn в запасах металлов на вулканогенных колчеданных месторождениях в главные эпохи свинцово-цинкового рудообразования (в)



дуг, а также, возможно, задуговых удаленных интраконтинентальных рифтов. Хотя вопрос о тектонических обстановках рудообразования для месторождений этого подтипа часто остается дискуссионным, энсиалическая природа большинства из них не вызывает сомнений.

Между тем в ходе эволюции Земли относительная численность месторождений подтипа куроко закономерно возрастала. Среди месторождений типа VMSD с возрастом 2750–2680 млн лет они составляли лишь 15%, в дальнейшем их доля возросла до 52% в период 1925–1560 млн л. н. и до 55% в период 560–290 млн л. н. Ранее было показано [Дергачев и др., 2013], что на этом фоне происходило и обогащение свинцом руд месторождений, образывавшихся в энсиалических обстановках (от 0,25 до 1,19%), в то время как на месторождениях уральского типа и их древних аналогах содержание свинца почти не изменялось на протяжении 2,8 млрд лет.

Вполне вероятно, что отмеченные особенности отражают постепенное распространение энсиалических обстановок рудообразования типа VMSD, а в конечном счете — разрастание коры континентального типа, происходившее периодически при сборе суперконтинентальных массивов около 2700, 1900 и 1200 и после 650 млн л. н. По мнению К. Конди, например, около 36% современной коры возникло в период 3,0–2,5 млрд л. н., а еще 39% — 2,15–1,65 млрд л. н. [Condie, 1998]. Другая возможная причина заключалась в том, что увеличение площади коры континентального типа уже около 3,1 млрд л. н. происходило, как считают некоторые исследователи, например, [Cawood et al., 2006], за счет присоединения к кратонам островных дуг, сложенных известково-щелочными или промежуточными между толеитовыми и известково-щелочными вулканитами, которые были обогащены элементами с крупными ионными

радиусами, в том числе Рb. Состав вновь возникающей континентальной коры при этом постепенно изменялся, и в каждую последующую эпоху колчеданообразования в процессах магмообразования участвовала континентальная кора, все более обогащенная Рb.

Заключение. Закономерности распределения во времени современных запасов Рb и Zn обуслов-

лены глобальными факторами, среди которых ведущая роль принадлежит тектонической эволюции планеты. Циклические изменения продуктивности свинцово-цинкового рудообразования отражают периодический сбор и распад суперконтинентальных массивов, приращение и эволюцию состава коры континентального типа, а также возможную эксгумацию месторождений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Божко Н.А. О двух типах суперконтинентальных циклов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2011. № 5. С. 15–24.

Дергачев А.Л., Дергачев А.А., Еремин Н.И. Эпохи свинцово-цинкового рудообразования в геологической истории Земли // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2015. № 3. С. 62–72.

Дергачев А.Л., Еремин Н.И., Сергеева Н.Е. Разномасштабные тенденции 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 колчеданообразования в истории Земли // Геология рудн. месторождений. 2002. Т. 44, № 4. С. 259–275.

Barley M.E., Groves D.I. Supercontinental cycles and the distribution of metal deposits through time // *Geology*. 1992. N 20. P. 291–302.

Bradley D.C. Passive margins through earth history // *Earth Sci. Rev.* 2008. Vol. 91. P. 1–26.

Condie K.C. Episodic continental growth and supercontinents: a mantle avalanche connection? // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1998. Vol. 163. P. 97–108.

Davidson A. Late Paleoproterozoic to mid-Neoproterozoic history of northern Laurentia: An overview of central Rodinia // *Precamb. Res.* 2008. Vol. 160. P. 5–22.

Evans D.A.D. Reconstructing pre-Pangean supercontinents // *Geol. Soc. Amer. Bull.* 2013. Vol. 125. P. 1735–1751.

Li Z.X., Bogdanova S.V., Collins A.S., Davidson A. et al. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis // *Precamb. Res.* 2008. Vol.160. P. 179–210.

Meyer C. Ore metals through geologic history // *Science*. 1985. Vol. 227. P. 1421–1428.

Meyer C. Ore deposits as guides to geologic history of the Earth // *Ann. Rev. Earth Sci.* 1988. Vol. 16. P. 147–171.

Поступила в редакцию 11.12.2018

Поступила с доработки 27.02.2019

Принята к публикации 27.02.2019