

УДК 553.44:553.061

## Поисковая модель SEDEX-MVT месторождений арктической зоны

А. Л. Галямов<sup>1</sup>, кандидат геолого-минералогических наук,

А. В. Волков<sup>2</sup>, доктор геолого-минералогических наук,

К. В. Лобанов<sup>3</sup>, доктор геолого-минералогических наук

ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН

*Рассмотрена общая геолого-поисковая модель свинцово-цинковых и колчеданно-свинцово-цинковых месторождений в карбонатных и терригенно-карбонатных комплексах, показаны перспективы наращивания минерально-сырьевой базы свинца и цинка арктической зоны. Наряду с широко известными представлениями о связи образования месторождений на ранних этапах с палеогеодинамическими обстановками формирования рудовмещающих формаций показана их дивергентность в зависимости от совмещения субплатформенных, рифтогенных и островодужных условий флюидного режима.*

**Ключевые слова:** арктическая зона, свинцово-цинковые месторождения, SEDEX, MVT, поисковая модель, прогноз.

### Введение

Свинцово-цинковые месторождения арктической зоны — один из важнейших источников Zn и Pb. В мировой литературе эти месторождения по классификации, разработанной В. И. Смирновым, В. Д. Конкиным, А. И. Кривцовым, Г. В. Ручкиным, Н. Г. Скрипченко, разделяются на геолого-промышленные типы — колчеданные в вулканогенных комплексах (VMS), колчеданные в терригенных и терригенно-карбонатных комплексах (SEDEX) и свинцово-цинковые в карбонатных комплексах (MVT — миссисипский). В арктической зоне среди них наиболее известны такие, как Ред Дог, месторождения бассейна Селвин (Ховард Пасс), Пайн-Пойнт и Павловское. Кроме того, выявлены и частично оценены около 120 мелких месторождений и проявлений в Приуралье (Саурейское), Республике Саха (Менгенильер, Агакуканское и др.), Скандинавии (Mofjellet, Bleikvassli), Гренландии (Black Angel), Канаде (Macmillan Pass, Prairie Creek, Bear-Twit и др.) и США (рис. 1). Наибольшее количество известных объектов (около 100) располагается

на североамериканском континенте, и малое количество российских свинцово-цинковых месторождений в арктической зоне обусловлено не только различиями ее геологического строения, но и неравномерной изученностью региона. Так, области развития карбонатных пород на островах архипелага Новая Земля, где выявлено крупное Павловское месторождение, требуют более глубокого изучения и широкого применения поисковых методов. Открытие там во второй половине XX в. густой сети однотипных рудопроявлений свинца и цинка при явно несистематическом проведении поисков свидетельствует о большой вероятности обнаружения новых крупных объектов.

Месторождения SEDEX имеют преимущественно свинцово-цинковую геохимическую специализацию и формировались в морских осадочных бассейнах в условиях восстановительных гидротермальных процессов. Руды SEDEX-месторождений содержат преимущественно сфалерит, галенит и барит. Обычно галенит и сфалерит преобладают вблизи эксгальционных каналов, баритовые тела обнаруживаются вверху рудной колонны либо на периферии области рудоотложения. Цинк характеризуется более широким распространением по сравнению со

<sup>1</sup> e-mail: atg@igem.ru.

<sup>2</sup> e-mail: tma2105@mail.ru.

<sup>3</sup> e-mail: lobanov@igem.ru.

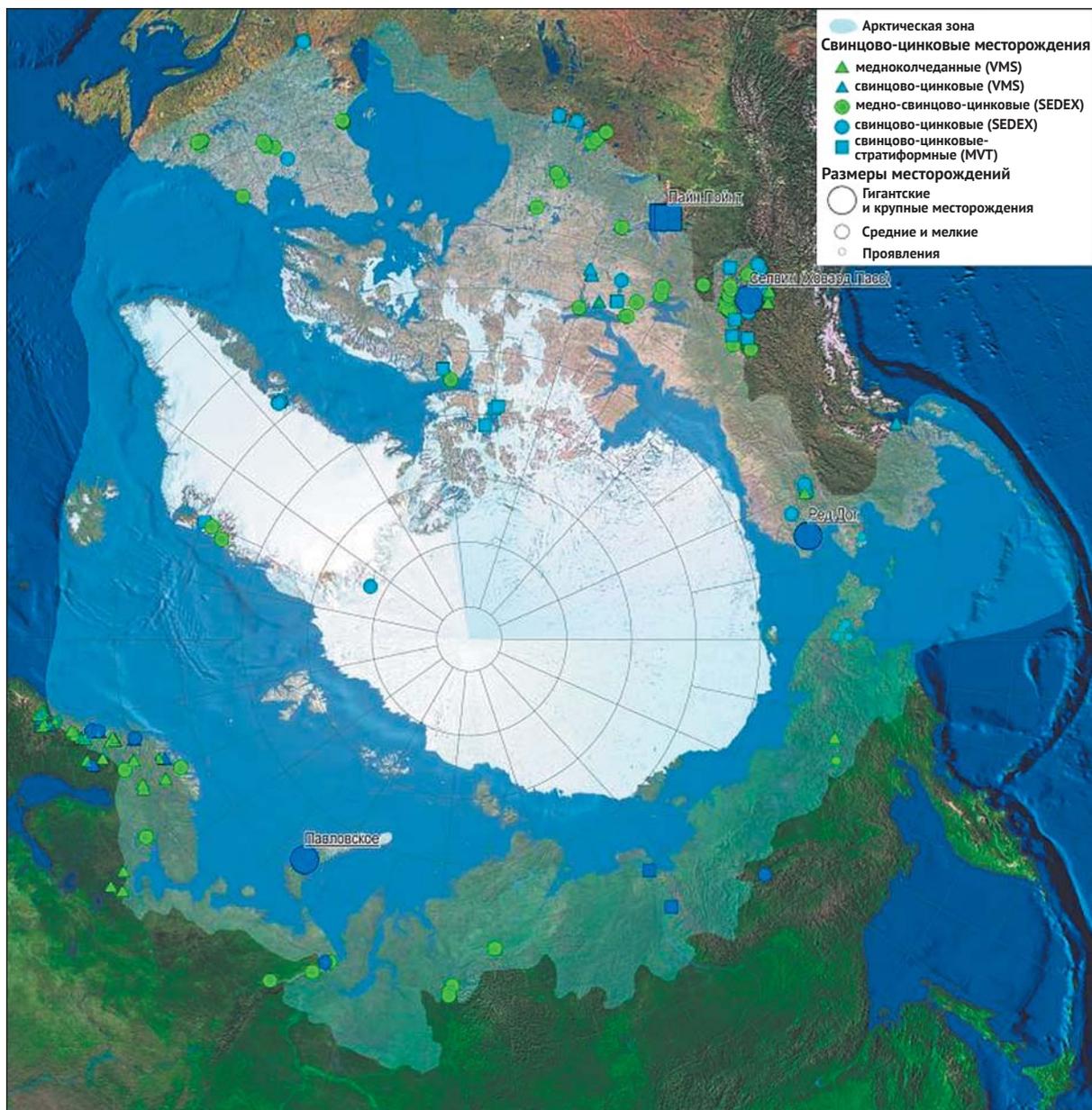


Рис. 1. Месторождения VMS, SEDEX и MVT типов арктической зоны

свинцом, чем объясняется снижение величины отношения свинца к сумме металлов в направлении от центров эксгалляции. Медь повсеместно, особенно в вулканических разрезах, присутствует в рудах в рассеянном виде, иногда образует штокверковые тела (Маунт-Айза) либо стратиформные массивные залежи (Раммельсберг).

Тип SEDEX включает в себя три подтипа [16] — месторождения собственно седиментационно-эксгалляционные, придонные (ирландский подтип — Irish) и месторождения, схожие с Броккен Хилл (BHT). Первые два залегают в карбонатных породах и могут иметь черты как сингенетического, так и эпигенетического рудоотложения. Ирландский подтип сходен с MVT, но вследствие высокой

степени растворимости литифицирующихся на стадии диагенеза карбонатных илов в умеренно кислых рудоносных растворах руды здесь отлагались в конседиментационных карстовых ореалах. Месторождения BHT метаморфизованы, пространственно связаны с Fe-Si-Mn окисными эксгаллитами, а вмещающие породы относятся к контрастным сериям вулканогенно-осадочных пород.

Стратиформные MVT-месторождения тесно связаны с карбонатной формацией и являются основной свинцово-цинковой сырьевой базой. Рудные тела представлены субогласными пластообразными залежами и секущими линзо- и жилообразными телами. Околорудные изменения относительно слабые, представлены доломитизацией, баритизацией

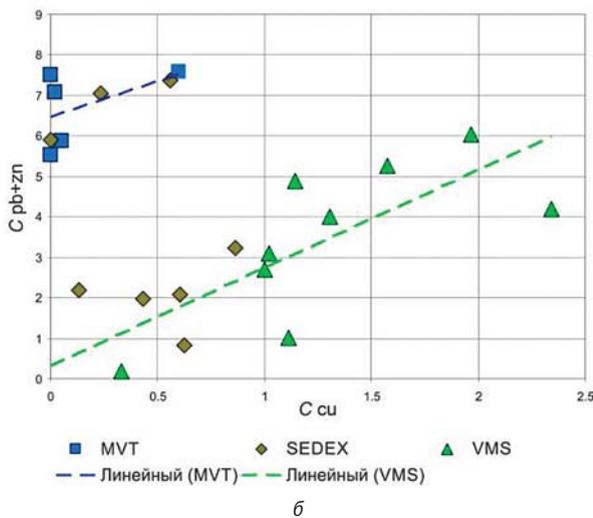
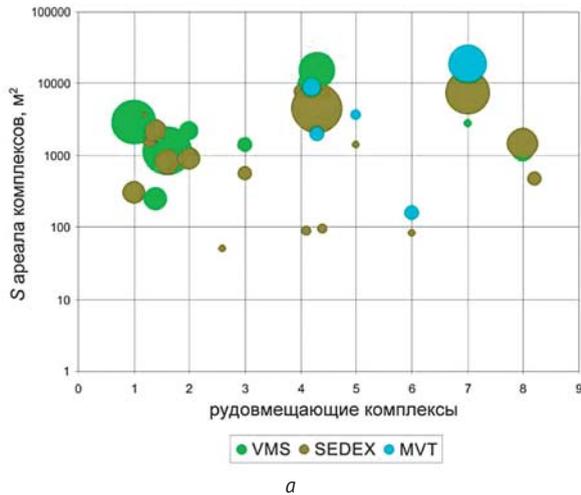


Рис. 2. Соотношение количества (диаметр круга) месторождений VMS, SEDEX и MVT в различных породных комплексах (а) и по средним содержаниям меди, свинца и цинка в рудах (б) арктической зоны и ее обрамления (по материалам геологических служб России, США, Канады и скандинавских стран)

и окварцеванием. Месторождения в карбонатных толщах также объединяются в семейство, включающее рудно-формационные подтипы [5]: собственно миссисипский, сарданский (с германием), силезско-краковский (пиритовый) и миргалимсайский (баритовый). Все месторождения залегают в эпигенетически преобразованных доломит-известняковых толщах и различаются по минералогическому, геохимическому облику и морфологии рудных залежей.

### Положение месторождений в тектонических структурах

Месторождения SEDEX формировались в интракратонных и эпикратонных рифтогенных прогибах, важной особенностью которых являются высокие скорости прогибания и осадконакопления [16; 23]. Свинцово-цинковые месторождения типа MVT

размещаются в платформенных и субплатформенных карбонатных толщах, обычно ассоциируют с баритом или флюоритом и в отличие от SEDEX-типа имеют ярко выраженный эпигенетический облик. Большинство исследователей признается существование ряда между месторождениями типов SEDEX и VMS, с одной стороны, и SEDEX и MVT — с другой [16; 23; 29]. Как SEDEX, так и MVT месторождения залегают в близких геодинамических обстановках вулканической деятельности в карбонатных, карбонатно-терригенных толщах и обусловлены дистальными металлоносными рассолами. При сравнении месторождений рассматриваемых типов, особенно дистальных фаций SEDEX, часто выявляются общие признаки, что является основанием для объединения части дистальных SEDEX-фаций и периферических фаций MVT. Большей частью это связано со смешанной трактовкой принадлежности рудовмещающих комплексов к той или иной обстановке. Это наглядно видно по соотношению позиции месторождений SEDEX и MVT в различных породных комплексах (рис. 2) и по средним содержаниям меди, свинца и цинка в рудах, где в схожих по составу толщах залегают руды всех типов.

### Общая характеристика месторождений арктической зоны

Свинцово-цинковое месторождение Ред Дог, представитель SEDEX-типа, размещается среди черных кремнистых сланцев девон-пермского возраста и приурочено к периферийной области бассейна накопления светло-серых тонкозернистых известняков и темно-серых известковых сланцев [14] (рис. 3).

Рудная зона включает сульфидизированные кремнистые сланцы, массивные сульфидные залежи и сульфидизированные баритовые тела. Сульфидные залежи сложены сфалеритом, пиритом, марказитом и галенитом. Руды обычно массивные, и в них, как правило, отсутствуют следы полосчатости, характерной для месторождений этого типа. В сфалерите редко встречаются включения халькопирита и пирротина, в галените отмечаются включения буланжерита. В основании и на флангах залежей вскрыты мощные подводные жилы, поздними генерациями которых являются кальцитовые жилы с включениями пиробитумов. Барит отмечается в перекрывающих толщах пермского возраста.

Согласно [24] месторождение образовалось на ранних стадиях развития бассейна седиментации. Рудная минерализация формировалась эпизодически от раннемиссисипского до пенсильванского времени. Тектоническая активизация обусловила формирование разобщенных рудных блоков с нарушением фациальной непрерывности рудных зон. Наличие в регионе малых интрузивных тел, предположительно миссисипского возраста, свидетельствует о повышении температурного фона в период осадконакопления. Проницаемые девонские дельтовые отложения также рассматриваются в качестве

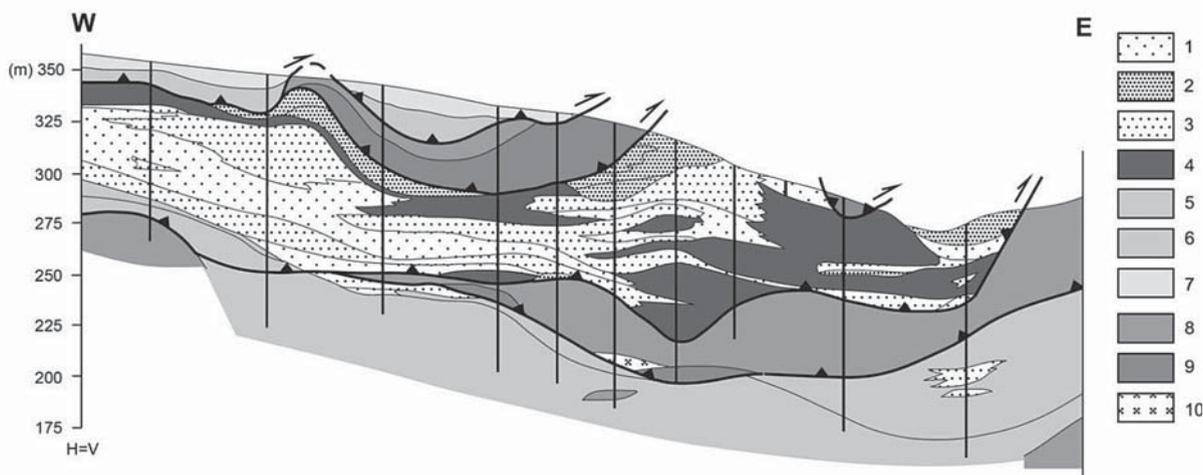


Рис. 3. Геологическое строение месторождения Ред Дог (главная залежь) (по [14])

среды транспортировки минерализованных флюидов на поверхность морского дна.

SEDEX-месторождения бассейна Селвин формировались в условиях пассивной континентальной окраины в карбонатно-сланцевых толщах большой мощности [22]. Свинцово-цинковые руды тесно ассоциируют с проявлениями конседиментационных вулканизма (лавы основного состава и их туфы) и тектонических процессов (крупнообломочные брекчии, оползневые текстуры и др.) и имеют в основном тонкополосчатую текстуру. Имеются также руды отчетливого эпигенетического облика. Некоторые месторождения бассейна (Matt Berry) могут быть отнесены к переходному типу между SEDEX и MVT. Формирование месторождений связано с основными металлогеническими событиями раннего кембрия, силура и особенно среднего девона, ко времени которого приурочена глобальная свинцово-цинковая минерализация. Некоторые месторождения бассейна (например Marg) относятся к VMS-типу и содержат 5,52 млн т руды при содержаниях 4,6% Zn и 1,76% Cu. Общие запасы месторождений бассейна насчитывают 154 млн т при 5,35% Zn и 1,86% Pb.

Руды месторождений тесно ассоциируют с участками резкой фациальной изменчивости, часто

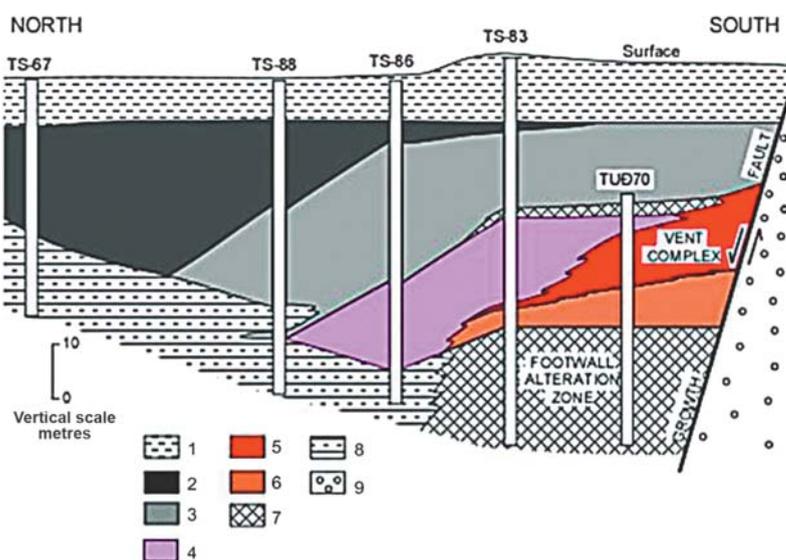


Рис. 4. Геологический разрез. Месторождение Том (бассейн Селвин, Мак-Кензи Пасс) (по материалам [26]): 1 – кремнистые сланцы, 2 – галенит-сфалеритовые руды, 3 – барит-сфалеритовые руды, 4 – сфалеритовые руды, 5 – штокверк пирит-пирротин-галенитовых руд с карбонатом и кварцем, 6 – жильные пиритовые руды с анкеритом и кварцем, 7 – анкеритовые жилы с рассеянным пиритом, халькопиритом и сфалеритом, 8 – черные кремнисто-карбонатные сланцы, алевриты, песчаники, 9 – кремнистые туфопесчаники

маскируемыми наложенными процессами метаморфизма. Тонкополосчатые руды встречаются в окремненных известняках и сланцах (рис. 4), в которых широко проявлены признаки конседиментационных тектонических процессов. Зональность на месторождениях проявлена в виде смены кремнистости вверх по разрезу сульфидизацией (пиритизацией) с баритом. Отношение Zn/Pb+Zn возрастает к верхним горизонтам. Участками к признакам VMS относят залегание массивных сульфидных руд над метавулканическими фациями, повышенные содержания меди и золота, переход массивных руд в полосчатые вверх по разрезу.

**Павловское месторождение** свинца и цинка является крупным рудно-полиметаллическим объектом арктической зоны и расположено в северо-западной части острова Южный архипелага Новая Земля [6; 9]. Оруденение приурочено к девонским органогенно-рифогенным

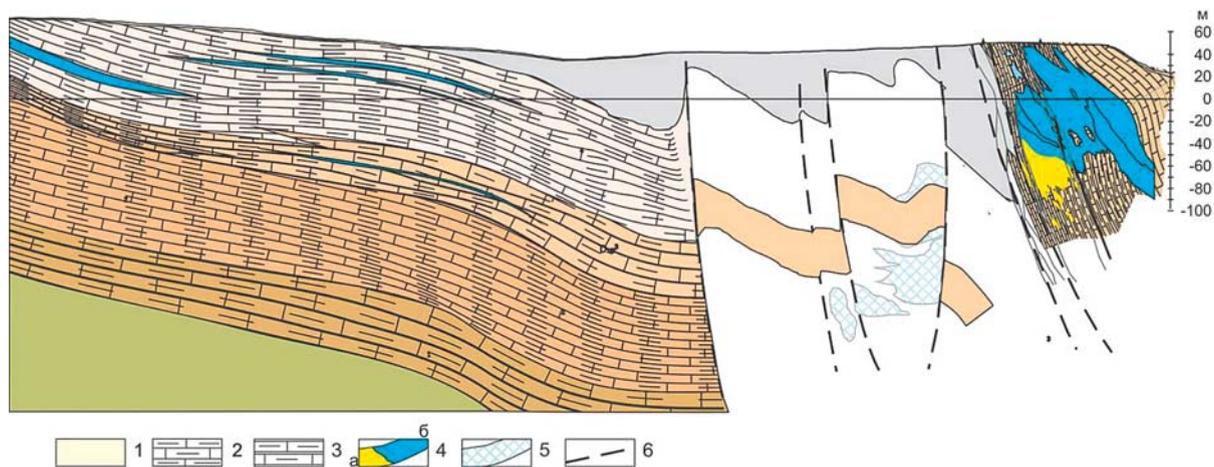


Рис. 5. Строение и морфология рудных тел Павловского месторождения: 1 – четвертичные отложения, 2 – известняки глинистые, 3 – переслаивание органогенных и глинистых известняков, 4 – рудные тела (колчеданные – а, свинцово-цинковые – б), 5 – рудные тела предполагаемые, 6 – разрывные нарушения

карбонатным породам (слоистым и массивным разностям микрозернистых, микритовых, биогенных, реже глинистых известняков, доломитизированных и окремненных). Его положение и особенности морфологии рудных залежей определяются формой вмещающих органогенно-обломочных тел и широким развитием осадочных карбонатных брекчий по периферии органогенных построек в пределах рудовмещающей толщи. Цепочки разномасштабных органогенных построек, пространство между которыми выполнено породами органогенно-обломочных фаций, наблюдаются также в береговых и разрозненных внутренних обнажениях на юго-восточном и северо-западном флангах Восточного блока и частично вскрываются канавами и буровыми скважинами.

Руды слагают линзовидно-пластообразные залежи на двух стратиграфических уровнях (рис. 5). Внутреннее строение залежей связано с неравномерным распределением рудных гнезд и вкрапленности, а также разноориентированных кварц-карбонатных оруденелых жил и прожилков, различных генераций и стадий. Среди руд встречаются сплошные, массивные и прожилково-вкрапленные (вплоть до 1—5% рудной минерализации).

Руды месторождения имеют существенно галенит-сфалерит-пиритовый состав и характеризуются преимущественно массивной, колломорфной, гнездово-вкрапленной и прожилково-вкрапленной текстурой. Главными минералами руд являются галенит, сфалерит и пирит, второстепенными и редко встречающимися — аргентит, миаргирит, пираргирит, буланжерит, геокронит. В сфалерите имеются примеси серебра, кадмия, галлия, германия. Типичными примесями для галенита являются серебро, сурьма, кадмий, в меньшей степени — кобальт, цинк, еще реже отмечаются висмут и олово. В пирите главными примесями являются свинец, цинк, таллий, иногда серебро и индий. Содержания свинца и цинка

в рудах в среднем варьирует от 3—5% до 8—11% (цинк) и от 1,5—2% до 3,5—5% (свинец).

Отнесение руд Павловского месторождения к типу SEDEX определяется несколькими факторами. Во-первых, месторождение расположено в зоне сочленения крупнейших долгоживущих разрывных структур Пайхойско-Новоземельской минерагенической провинции. Эти линейaments являются разломами глубокого заложения, разграничивая собой различные блоки докембрийского фундамента Новой Земли, и характеризуются длительной историей взаимодействия и развития, охватывающей целиком палеозойско-мезозойский период. Влияние разрывных структур отражается в распределении вулканоплутонических ассоциаций и структурно-формационных комплексов палеозоя, отвечающих указанным палеотектоническим обстановкам. Во-вторых, месторождение приурочено к карбонатным формациям раннего девона, характеризующимся на данном участке тесным сочетанием биогенных и микритовых фаций. Особенности литолого-фациальной неоднородности рудовмещающего разреза определяются широким развитием на площади Павловского месторождения биогермных и биостромных тел со шлейфами конседиментационных брекчий и локальных горизонтов карбонатных пород, в разной степени насыщенных глинистым материалом. В-третьих, рудовмещающие карбонатные слои в районе месторождения перекрыты мощной толщей глинистых отложений, являвшихся экраном для металлоносных флюидов.

Широкое распространение на месторождении конседиментационных брекчий обрушения в окремненных сланцах, глинистых известняках и доломитах, наличие компактных галенит-сфалерит-пиритовых скоплений и существенно пиритовых руд с метаколлоидными, брекчиевыми и брекчиевидно-пятнистыми текстурами руд с отчетливо проявленными следами нагрузки и микроскладками оползания в углеродисто-

карбонатно-кремнистой матрице Восточного участка месторождения вполне может свидетельствовать о формировании SEDEX руд на стадии седиментогенеза — раннего диагенеза в интервале температур 245—360°C в условиях малых глубин. Присутствие в непосредственной пространственно-временной близости подводных вулканических построек с шаровыми лавами и туфами основного состава указывает на геодинамические условия рифтогенных областей.

Вместе с тем особенности литологического состава пород и характер наложенных изменений имеют признаки MVT-условий. К последним относят доломитовый и известняковый состав рудовмещающих карбонатных слоев, приуроченность рудных лент и линз к периферии сравнительно мощных органогенных построек, существенно сфалеритовый (клеюфановый) состав руд на периферии рудного поля, наличие, хоть и маломощных, пиритизированных водорослевых матов, текстуры выщелачивания карбонатной матрицы в рудах, наложенные изменения в виде кальцитизации и доломитизации.

**Группа свинцово-цинковых месторождений Пайн-Пойнт** расположена в Канаде на широкой (более 1600 км<sup>2</sup>) территории южнее Большого Невольничьего озера. Месторождения, схожие между собой, относятся к MVT-типу. Здесь к признакам этого типа относятся такие, как карст, доломитизация, ассоциация с эвапоритами [15]. Вмещающие комплексы слагают платформенную окраину и представлены мощными карбонатными толщами среднедевонского возраста.

Рудные тела на месторождениях Пайн-Пойнт обычно ограничиваются ослабленными зонами развития палеокарста (рис. 6). Руды залегают непосредственно в крупнокристаллических доломитах, образовавшихся в результате диагенеза доломитовых фаций. Дорудные карбонатные фазы слагают пласты тонкокристаллического

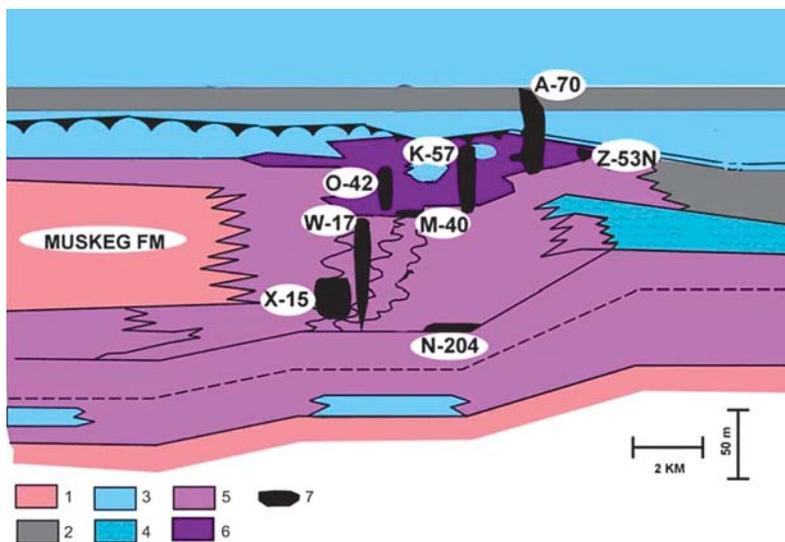


Рис. 6. Пространственные соотношения рудных тел с доломитовыми постройками на месторождениях Пайн-Пойнт: 1 — ангидрит, гипс, 2 — ланцы, 3 — известняки, 4 — битуминозные известняки, 5 — тонкозернистые доломиты, 6 — крупнозернистые доломиты, 7 — рудные тела

доломита и линзы более позднего среднекристаллического доломита. Геохимические исследования указывают на формирование раннего доломита в придонных условиях среднего девона, а его раскристаллизация происходила на сравнительно больших глубинах. Сульфидная минерализация отчетливо приурочена к диагенетическим крупнокристаллическим участкам доломита и характеризуется низкими содержаниями O<sup>18</sup> и несколько пониженными значениями C<sup>13</sup>.

Основные рудные минералы — галенит и сфалерит. Их содержания в рудах достигают 52% суммы металлов. В целом средние содержания составляют 2,4% Pb и 6% Zn при суммарных запасах более 36 млн т руды. Руды тонкокристаллические, часто с прожилками кальцита и доломита, количество которых увеличено на флангах рудных тел. Здесь же встречаются скопления битумоидов. Тонкорассеянная вкрапленность пирита и марказита, частая в массивных рудах, фиксируется также в виде минерализованных горизонтов в нижних частях рудных залежей, а также в подстилающих слоях. Имеются редкие включения целестина и гипса в карбонатных прожилках.

Наиболее распространенные представления о генезисе руд месторождений Пайн-Пойнт заключаются в отложении из проникающих по проницаемым зонам металлоносных рассолов в карбонатных формациях на периферии платформ. Согласно гидрологической модели [15] главным является стратиграфический контроль распределения сульфидов, а роль структурных факторов оставалась на втором плане. Постоянная тектоническая активность обуславливала периодическое изменение сплошности проницаемых зон и способствовала смещению флюидов. Химические и изотопные характеристики руд соответствуют морским условиям, а также условиям конвекции рассолов по системам текущих проницаемых зон, обеспечивающим привнос металлов из глубинных источников.

#### **Рудоконтролирующие факторы, поисковые критерии и модели**

Проблеме поисков полезных ископаемых, в том числе свинцово-цинковых месторождений, уделяется повышенное внимание во всем мире. Основным ее аспектом является необходимость прогнозирования

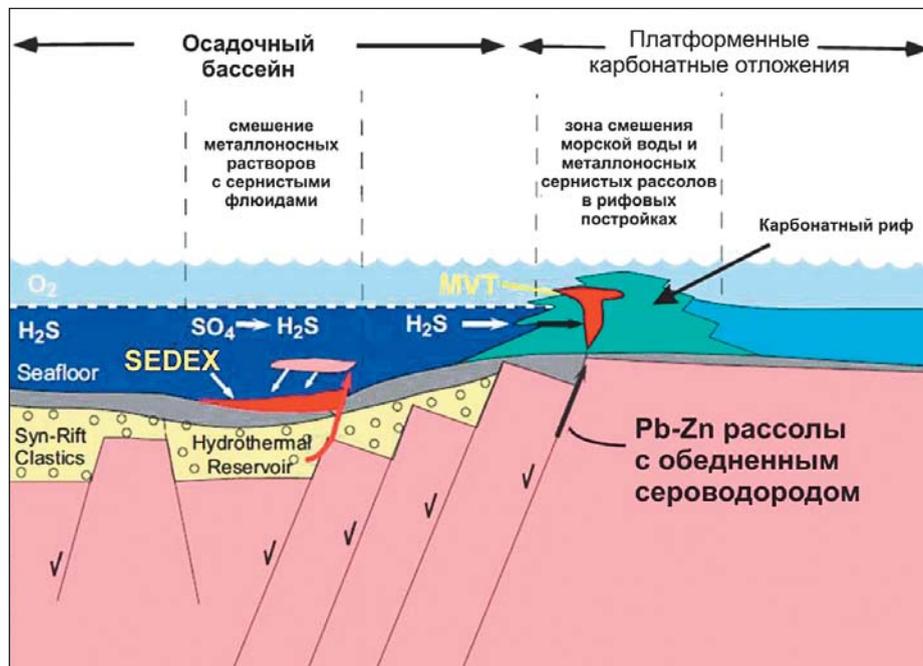


Рис. 7. Соотношение геологических позиций месторождений SEDEX и MVT

геологических систем во времени и в пространстве. На момент проведения поисков системы представляют собой устойчивые парагенетические ассоциации, находящиеся в динамическом равновесии, обусловленном взаимным влиянием комплекса различных факторов, которые рассматриваются в качестве поисковых признаков при использовании рациональных оценочных критериев.

Поисковая модель является информационно-аналитической системой применения в поисковом процессе взаимосвязанных рудоконтролирующих геологических признаков и рациональных методических приемов их выявления применительно к условиям региона определенного геодинамического типа. Применение модели позволяет рационально объяснить пространственное размещение выявленных рудных объектов и прогнозировать обнаружение новых. Работоспособность поисковой модели определяется соблюдением принципов последовательного приближения, что соответствует этапности работы и соответствия между стадиями работ, масштабом объектов прогноза и поисков, поисковыми признаками и методами их обнаружения.

На стадии оценки глобальных перспектив расширения минерально-сырьевой базы свинца и цинка наиболее важной задачей является сравнительный анализ размещения благоприятных геодинамических обстановок различных ее областей с учетом динамики и особенностей опосредования. Поэтому в качестве основных поисковых признаков сырьевого потенциала в арктической зоне рассматриваются типовые обстановки формирования рудовмещающих комплексов, а основным критерием их оценки являются геолого-генетические модели формирования месторождений SEDEX и MVT, широко представленные в публикациях [12; 13; 15; 16; 19; 21; 22 и др.].

Основные различия в геологической позиции месторождений SEDEX и MVT определяются близостью первых к рифтовым прогибам, а последних — к платформенным областям карбонатного осадконакопления (рис. 7). Это различие определяет разные источники, состав и механизмы миграции рудообразующих флюидов. Вопрос о механизме миграции растворов из этих областей весьма дискуссионен, многие в миграции флюидов признают важную роль особенностей рельефа проводящих областей и гравитации. Для существования крупных минерализованных объемов и эвапоритовых толщ для образования региональных флюидных систем необходимы благоприятные палеоклиматические условия бассейнов. Важную роль при этом играет морская биосфера. Биогермные постройки формировались в участках над более пористыми и проницаемыми карбонатными, преимущественно доломитовыми, толщами.

К типу SEDEX относятся месторождения Глетчер, Кастил, Бьюик, Свитватер в районе Вибурнум — Тренд (Юго-Восточное Миссури, США), Таборное и Хибелен в Западно-Прибайкальской металлогенической зоне (Россия). В арктической зоне этот тип широко представлен кордильерской группой свинцово-цинковых месторождений США и Канады. Одним из ярких представителей является месторождение Ред Дог (США). Различают проксимальные и дистальные фации руд. Последние сложены ритмичными прослоями сфалерита, сульфидов железа и обломочных осадков. Проксимальные фации представлены жильно-прожилковыми рудами, являющимися продуктами переотложения дистальных слоистых руд.

Высокие скорости прогибания и осадконакопления в интракратонных и эпикратонных рифтогенных прогибах, с которыми связано формирование

месторождений SEDEX, обуславливали зарождение турбидитных фаций, которое в условиях тектономагматической активизации (внедрение долеритовых силлов) сопровождалось массовым развитием осадочных брекчий и оползневых структур. В этой обстановке оруденение формировалось на морском дне или в придонных осадках в условиях температур 100—300°C при солености воды 10—20% NaCl из рассолов, поднимающихся по проницаемым разрывным зонам рифтовых прогибов. В пострифтовое время стабилизация геотектонической обстановки отразилась в отложении в верхних частях рудовмещающего комплекса тонкообломочных и карбонатных осадков, которые в процессе продолжающегося рудообразования могли играть экранирующую для флюидов роль. Основными отличительными признаками месторождений этого типа являются глубинные конседиментационные разрывы, бассейны с восстановительными условиями, углеродсодержащие осадки с  $C_{орг}$  более 1%, аномальные геохимические концентрации V, Tl, Cd, U, V/Mo и Re/Mo, широкое распространение гидротермальных изменений.

Общей особенностью формирования месторождений типа SEDEX по наиболее общим представлениям являлась высокая сульфатность металлоносных рассолов и (или) морской воды [3]. Такой состав мог быть только при высоком уровне содержания кислорода в атмосфере и гидросфере Земли. Признаки повышенного уровня оксигенации в атмосфере имеются в отложениях с возрастом 2,32 млрд лет. Необратимые изменения и снижение кислородной составляющей в атмосфере, гидросфере, биосфере Земли, произошедшие позднее, отразились на хемогенно-осадочных процессах. Это обусловило в конце палеопротерозоя появление первых крупных стратиформных месторождений типа SEDEX и наиболее ранних месторождений типа MVT. В фанерозое изменения явились причиной периодической глобальной аноксичности гидросферы (ранний кембрий, поздний ордовик — ранний силур, девон, средняя — поздняя юра), способствовавшей формированию месторождений типа SEDEX. Такие циклы вместе с тектонической активизацией определили пики рудообразования этого типа и его соотношение с массовым формированием колчеданных месторождений.

Свинцово-цинковые стратиформные месторождения типа MVT залегают в известняково-доломитовых толщах в ареалах развития палеокарста, в состав руд входят галенит и сфалерит. Руды формировались при 75—200°C из металлоносных рассолов, привнесенных из осадочных бассейнов, и имеют эпигенетический облик. Месторождения размещаются на платформенных окраинах, обычно в зонах передовых прогибов и реже в рифтовых зонах [21].

Соотношение типов MVT и SEDEX исследовалось Сангстером [29], который в итоге не выявил сколько-нибудь резкой границы между ними. В целом MVT-месторождения относятся к целому спектру рудных объектов — полиметаллических в осадочных

породах. Сюда же входят SEDEX-объекты, подтипы «ирландский» и «кипуши», F-Ba-месторождения, галенитовая минерализация в песчаниках, мантообразные Ag-Pb-Zn залежи, и тип Броккен-Хилл.

Свинцово-цинковые месторождения типа MVT обычно ассоциируют с баритом или флюоритом и размещаются в платформенных и субплатформенных карбонатных толщах. В отличие от SEDEX эти месторождения имеют ярко выраженный эпигенетический облик. Д. Л. Лич и др. [20], опираясь на данные палеомагнетизма и изотопии, показали, что миграция и эволюция растворов, из которых отлагались руды MVT, не являются природным следствием формирования вмещающих их бассейнов. Напротив, большинство MVT руд образовалось в регионах, где бассейны и особенно платформенные карбонатные толщи имеют гидрологическую связь с орогенными областями сноса.

Осаждение сульфидов могло происходить в результате: а) смешения рассолов [12; 13; 32], б) сульфат-редукции, в) восстановления серы [12; 32]. Основными отличительными особенностями генезиса месторождений согласно второму варианту являются общность источника металлоносных рассолов и углеводородных флюидов, карстообразование в результате воздействия рассолов на рифогенные образования и формирования сульфатных растворов, образование руд в результате смешения глубинных металлоносных и сульфатных растворов в присутствии остаточных углеводородных соединений, обуславливавших сульфат-редукцию.

Существует несколько гипотез происхождения месторождений этого типа. Первая включает участие глубинных бассейновых рассолов, спускающихся из воздымающихся областей передового прогиба [15]. Вторая гипотеза рассматривает участие растворов, генерированных в условиях диагенеза и катагенеза карбонатных осадков и их соответственного уплотнения [13]. Считается, что масштабы флюидообразования вряд ли были значительными по причине больших расстояний переноса и слабого энергетического потенциала и могли иметь место эпизодически [31]. Согласно третьей гипотезе оруденение связано с циркуляцией рассолов в огромных объемах пород, обусловленной разностью давлений, температуры и солености [25]. Эти условия обеспечивают функционирование системы длительное время и объясняют возможность переработки, в том числе доломитизации, крупных объемов вмещающих пород.

Таким образом, основным поисковым признаком месторождений SEDEX и MVT типов является их позиция во внутриконтинентальных седиментационных бассейнах различных порядков. Заложение бассейнов контролируется разноранговыми разломами, которые кроме того вмещают интрузии основного состава (силлы и субвулканические тела), находящиеся, по мнению большинства исследователей, в парагенетической связи с полиметаллическим

оруденением. Подвижные геодинамические обстановки седиментации в интракратонных и эпикратонных рифтогенных прогибах и в платформенных и субплатформенных условиях определяют соответствующий формационный облик толщ, вмещающих месторождения SEDEX и MVT.

Вмещающие породы месторождений типа SEDEX представлены гемипелагическими морскими тонкозернистыми осадочными породами — глинистыми, углеродисто-глинистыми, черными сланцами, а также известняками и доломитами. Морфология и строение ленто- и линзообразных стратиформных залежей мощностью в первые десятки метров и большой протяженностью (более километра) зависит от удаленности от зоны выхода рассолов на морское дно и особенностей морфологии дна бассейна. Преобладающим сульфидным минералом является пирит, иногда пирротин. Главные коммерческие минералы — сфалерит и галенит, реже халькопирит. Барит может занимать более 25% объема гидротермальных образований.

Для месторождений типа MVT рудовмещающей является глинисто-доломито-известняковая формация, осадки отлагались в мелководных морских условиях окраинно-континентальных бассейнов и характеризуются сложной полифазальностью, включая барьерные рифы, терригенно-карбонатные и хемогенно-карбонатные разности [5]. В рудном районе Пайн-Пойнт (Канада) рудовмещающий комплекс барьерных рифов разделяет доломиты и эвапориты лагунной формации и известняково-сланцевые отложения окраинного моря. В процессе рудообразования хемогенные и биогенные карбонатные породы замещались эпигенетическими доломитами, в которых сохранились реликты первичных пород, в том числе известняков с рифообразующей фауной. На месторождениях миссисипского типа развита кремнисто-известняково-доломитовая формация (Ламог, Коукер, Джоглин, Три-Стейт, Лед-Хилл, США). Для рудоносных субформаций характерно в целом уменьшение кремнистой составляющей.

Общий структурный контроль на месторождениях на стадиях развития бассейнов проявляется в приуроченности ареалов рудовмещающих формаций к палеодепрессиям на склонах поднятий с барьерными рифами, примыкающих к осадочным (в том числе нефтегазоносным) бассейнам с седиментогенными и катагенными водами. Области разгрузки металлоносных рассолов и, возможно, нефтяных вод приурочены к выходам крупных разрывов, ограничивающих рифты и контролирующими размещение центров вулканической деятельности.

Локальные поисковые признаки, к которым относятся складчатая и разрывная структура, оформившаяся на поздних этапах, особенности минерального (в том числе примесного) состава руд, геохимические свойства вмещающих пород, включая зональное распределение главных и второстепенных элементов, — все они относятся к комплексу рудоконтролирующих

локализацию рудных залежей в масштабе рудного поля и участка месторождения и, как правило, составляют элементы-признаки локальных моделей.

В комплекс элементов-признаков поисковой модели, соответствующей масштабу прогнозируемых седиментационных бассейнов, таким образом, входят: ареалы развития карбонатных, терригенно-карбонатных и вулканогенно-терригенно-карбонатных формаций в краевых частях морских бассейнов, в том числе нефтегазоносных; палеодепрессии, расположенные на склонах палеоподнятий; наличие в подстилающих толщах песчано-глинистых отложений элизионных катагенетических флюидов; зоны палеогидрогеологической разгрузки вдоль проницаемых зон, выходящих в близповерхностные области; геохимические ассоциации аномалий свинца, цинка, бария в ареалах развития рудоносных формаций. В комплекс также могут входить поисковые признаки, касающиеся оценки глубинных геодинамических условий формирования палеобассейнов и вытекающие из результатов региональных работ по изучению древних этапов развития земной коры и мантии. Разделению областей с различными обстановками могло бы способствовать применение глубинных геофизических методов, среди которых особое место занимают сейсмо- и гравиразведка, метод ядерного магнитного резонанса. Применение подобного рода поисковых моделей при региональных металлогенических исследованиях (например ГК-1000/3 и ГДП-200) позволяет с новых позиций оценить потенциальные возможности расширения минерально-сырьевой базы свинца и цинка в российской части арктической зоны.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Президиума РАН «Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации».

### Литература

1. Бортников Н. С., Лобанов К. В., Волков А. В. и др. Арктические ресурсы цветных и благородных металлов в глобальной перспективе // Арктика: экология и экономика. — 2015. — № 1. — С. 38—46.
2. Геология и полезные ископаемые России: в 6 т. — Т. 5: Арктические и дальневосточные моря. — Кн. 1: Арктические моря / Ред. И. С. Гранберг, В. Л. Иванов, Ю. Е. Погребницкий. — СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. — 468 с.
3. Дергачев А. Л., Еремин Н. И. Вулканогенное колчеданно-полиметаллическое и эксгалационно-осадочное свинцово-цинковое оруденение в истории Земли // Докл. Академии наук. — 2008. — Т. 423, № 1. — С. 89—91.
4. Додин Д. А. Минерагеня Арктики. — Кн. 1. — СПб.: Наука, 2008. — 298 с.
5. Донец А. И. Стратиформные свинцово-цинковые месторождения в карбонатных толщах: типизация и основы прогноза: Дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. — М., 2003.

6. Ильченко В. О. Минералого-геохимические особенности и условия формирования полиметаллических руд Павловского месторождения (Арх. Новая Земля): Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. — СПб., 2004.
7. Малютин Е. И., Широбоков В. Н. Минерально-сырьевые ресурсы Архангельской области // Минеральные ресурсы России: Экономика и управление. — 2006. — № 4.
8. Полезные ископаемые // Состояние и охрана окружающей среды Архангельской области за 2010 год / Отв. ред. А. В. Чулков. — Архангельск: КИРА, 2011. — С. 72—74.
9. Презентация проекта «РУСБУРМАШ» // [http://www.rbm.armz.ru/media/File/rbm/2014/pgrk\\_presentation.pdf](http://www.rbm.armz.ru/media/File/rbm/2014/pgrk_presentation.pdf).
10. Прогнозно-металлогеническая карта России масштаба 1 : 5 000 000. — СПб.: ВСЕГЕИ, 2006.
11. Российская Арктика: геологическая история, минерагения, геоэкология / Под ред. Д. А. Додина, В. С. Суркова. — СПб.: ВНИИОкеангеология, 2002. — 958 с.
12. Anderson G. M. Precipitation of Mississippi Valley-type ores // *Economic Geology*. — 1975. — Vol. 70. — P. 937—942.
13. Beales F. W., Jackson S. A. Precipitation of lead-zinc ores in carbonate reservoirs as illustrated by Pine Point ore field. — Canada: Institution of Mining and Metallurgy Transactions, section B, 1966. — P. B8278—8285.
14. De Vera J., McClay K. R., King A. R. Structure of the Red Dog District, Western Brooks Range // *Alaska Economic Geology*. — 2004. — Vol. 99. — P. 1415—1434.
15. Garven G. The role of regional fluid flow in the genesis of the Pine Point deposit, western Canada sedimentary basin // *Econ. Geol.* — 1985. — 80. — P. 307—324.
16. Goodfellow W. D., Lydon J. W. Sedimentary exhalative (SEDEX) deposits // *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods* / Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division. — [S. I.], 2007. — P. 163—183. — (Special Publication No. 5).
17. Potential for carbonate-hosted lead-zinc Mississippi Valley-type mineralization in northern Alberta and southern Northwest Territories: geoscience contributions, Targeted Geoscience Initiative / P. K. Hannigan (ed.) // *Geological Survey of Canada*. — 2006. — Bull. no. 591. — 347 p.
18. Kelley K. D., Seal R. R. II, Schmidt J. M. et al. Sedimentary exhalative Zn-Pb-Ag deposits // Preliminary compilation of descriptive geoenvironmental mineral deposit models / E. A. du Bray (ed.). / U.S. Geological Survey Open-File Report 95—831. — P. 225—233.
19. Kesler S. E., Appold M. S., Martini A. M. et al. Na-Cl-Br systematics of mineralizing brines in Mississippi Valley-type deposits // *Geology*. — 1995. — 23. — P. 641—644.
20. Leach D. L., Bradley D. C., Lewchuck M. et al. Mississippi Valley-type lead-zinc deposits through geological time: Implications from recent age-dating research // *Mineral Deposita*. — 2001. — 36. — P. 711—740.
21. Leach D. L., Sangster D. F. Mississippi Valley-type lead-zinc deposits // *Mineral Deposit Modeling* / R. V. Kirkham, W. D. Sinclair, R. I. Thorpe and J. M. Duke, eds.; Geological Association of Canada. — [S. I.], 1993. — P. 289—314. — (Special Paper 40).
22. Luke Ootes et al. Metallogenic Evolution of the Mackenzie and Eastern Selwyn Mountains of Canada's Northern Cordillera, Northwest Territories: A Compilation and Review // *Geoscience Canada*. — 2013. — Vol. 40. — P. 40—69.
23. MacIntyre D. G. Sedex — Sedimentary-exhalative Deposits // *Ore Deposits, Tectonics and Metallogeny in the Canadian Cordillera* / W. J. McMillan, Coordinator; B. C. Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources. — [S. I.], 1991. — P. 25—69. — (Paper 1991-4).
24. Moore D. W., Young L. E., Modene J. S., Plahuta J. T. Geologic Setting and Genesis of the Red Dog Zn-Pb-Ag Deposit, Western Brooks Range, Alaska // *The Genesis of Stratiform Sediment-hosted Lead and Zinc Deposits: Conference Proceedings* / R. J. W. Turner and M. T. Einaudi, Ed. — [S. I.]: Stanford Univ. Publ., 1986. — P. 104—108.
25. Morrow D. Regional subsurface dolomitization; Models and constraints // *Geoscience Canada*. — 1998. — Vol. 25. P. 57—70.
26. Paradis S., Hannigan P., Dewing K. Mississippi Valley-Type Lead-Zinc Deposits (MVT). — Ottawa: Geological Survey of Canada; 2008.
27. Pirajno F. Hydrothermal Processes and Mineral Systems. — [S. I.]: Springer Science & Business Media, 2008. — 1282 p.
28. Taylor R. D., Leach D. L., Bradley D. C., Pisarevsky S. A. Compilation of Mineral Resource Data for Mississippi Valley-Type and Clastic-Dominated Sediment-Hosted Lead-Zinc Deposits: Open-File Report 2009—1297 / U.S. Department of the Interior.
29. Carbonate-hosted lead-zinc deposits; Society of Economic Geologists / D. F. Sangster, ed. — [S. I.], 1996. — 687 p. — (Special Paper 4).
30. SEDEX&MVT deposits: Presentation / McGill Univ., Canada.
31. Sharp J. M. J. Energy and momentum transport model of the Ouachita basin and its possible impact on formation of economic mineral deposits // *Economic Geology*. — 1978. Vol. 73. — P. 1057—1068.
32. Sverjensky D. A. Oil field brines as ore-forming solutions // *Economic Geology*. — 1984. — Vol. 79. — P. 23—27.
33. Viets J. B., Hofstra A. H., Emsbo P. Solute composition of fluid inclusions in sphalerite from Northern American and European Mississippi Valley-type ore deposits: ore fluids derived from evaporated seawater // *Carbonate-hosted lead-zinc deposits* / D. F. Sangster, ed.; Society of Economic Geologists. — [S. I.], 1996. — P. 465—482. — (Special Publication Number 4).