

## БОР-ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКАЯ МЕТАЛЛОГЕНИЯ СЕВЕРНОЙ И СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ СИНО-КОРЕЙСКОГО КРАТОНА

*В.В. Раткин<sup>1</sup>, В.И. Гвоздев<sup>2</sup>, О.А. Карась<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Старомонетный пер. 35, г. Москва, 119017; e-mail: [ratkin@yandex.ru](mailto:ratkin@yandex.ru)

<sup>2</sup>ФГБУН Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, пр. 100 лет Владивостоку 159, г. Владивосток, 690022; e-mail: [gvozdev@fegi.ru](mailto:gvozdev@fegi.ru), [okaras@yandex.ru](mailto:okaras@yandex.ru)

Поступила в редакцию 18 апреля 2013 г.

На основе обобщения литературных данных и оригинальных исследований показано, что для металлогенических зон на севере и северо-востоке Сино-Корейского кратона типично сочетание широко известных месторождений золота, железных и железо-марганцевых руд и уникальных борных и свинцово-цинковых месторождений мирового класса. Рудообразование имеет пространственно унаследованный характер и проявилось в период с архея по мезозойское время. Архейские металлогенические зоны связаны с террейнами протоконтинентальных окраин в составе фундамента кратона и представлены месторождениями слоистых железных руд и медно-цинковыми колчеданными месторождениями. Протерозой-раннепалеозойские металлогенические зоны проявлены как рифтогенные бассейны, где толщи вулканических и осадочных пород перекрывают рудоносный архейский складчатый фундамент. Протерозойские металлогенические зоны объединяют месторождения золота в кварцевых жилах и зонах рассланцевания, месторождения слоистых железных и железо-марганцевых руд, крупные месторождения осадочно-метаморфогенных боратов, магнезита и месторождения медно-вольфрамовых руд в турмалинитах, месторождения эксгалационно-осадочных свинцово-цинковых руд, а также крупные полигенные месторождения REE-Fe-Nb руд. Для рифей-кембрийских терригенно-карбонатных толщ характерны стратиформные свинцово-цинковые и флюоритовые месторождения. Мезозойские металлогенические зоны, ассоциированные с вулканоплутоническими комплексами внутриплитных серий, унаследованно связаны с участками, где складчатый фундамент представлен рудоносными докембрийскими сериями. Золоторудные месторождения характерны для всех разновозрастных металлогенических зон, но подавляющая их часть связана с мезозойскими вулканоплутоническими комплексами.

**Ключевые слова:** рифт, металлогения, месторождения, железо, свинец, цинк, бор, флюорит, золото, Сино-Корейский кратон.

### ВВЕДЕНИЕ

Сино-Корейский кратон был сформирован как единая структура уже в архее. В северной и восточной части кратона, где обнажается докембрийский фундамент, выделяется несколько разнородных архей-раннепротерозойских террейнов, амальгамированных в период древнее 2500 млн лет [15]. Архей-раннепротерозойский фундамент локально перекрывается в протерозое-раннем палеозое осадочными и вулканогенно-осадочными толщами субплатформенного чехла, которые формируются в локальных морских

рифтогенных бассейнах и авлакогенах. Периоды деформации кратона с формированием таких бассейнов отвечают интервалам 2500–1600, 1600–1000 и 1000–500 млн лет назад.

В палеозое вплоть до поздней перми Сино-Корейский кратон располагался в экваториальных широтах и был отделен от раннепалеозойского Бурей-Ханкайского орогенного пояса так называемым Солонкерским палеоокеаном. В ходе закрытия этого палеоокеана Сино-Корейский кратон был перемещен в период с конца перми до триаса от тропических палеоширот до положения, близкого к современному [2].

В позднеюрско-раннемеловое время Сино-Корейский кратон представлял собой часть единой Восточно-Азиатской континентальной окраины. Тогда при преобладающем режиме проскальзывания океанической плиты в краевой приокеанической части материка формировалась система внутриконтинентальных синсдвиговых грабенов, крупнейшим из которых является выполненный континентальными отложениями грабен Сунляо, пересекающий в меридиональном направлении палеозойские складчатые структуры и северную часть Сино-Корейского кратона. Западнее и восточнее субпараллельно впадине возникли полосы вулканотектонических депрессий с характерными субщелочными внутриплитными комплексами, которые прорывают и локально перекрывают архейские и протерозойские толщи Сино-Корейского кратона [15].

В металлогеническом отношении северная часть Сино-Корейского кратона уникальна по насыщенности месторождениями железа, марганца, магния, бора, свинца, цинка, меди и золота. Месторождения локализуются преимущественно в составе толщ архейских, протерозойских и раннепалеозойских пород. Значительное количество месторождений непосредственно ассоциировано с юрско-меловыми вулканоплутоническими комплексами. При этом до конца 90-х годов доминировали представления, что только железорудные месторождения, объединяемые в субширотную Северо-Маньчжурскую металлогеническую провинцию [10], имели доскладчатую природу и претерпели совместно с вмещающими породами региональный метаморфизм. Месторождения золота, меди, свинца и цинка объединялись в Яншаньскую провинцию [10] и интерпретировались как посткладчатые мелкие и средние по запасам объекты скарновой или гидротермально-метасоматической природы. Многочисленные месторождения боросиликатных руд также представлялись как мелкие скарновые залежи мезозойского возраста [5]. Тем не менее, в ходе детальных поисково-разведочных работ, выполненных в 90-х годах в КНР и КНДР, было установлено, что большое число магнетитовых, свинцово-цинковых и борных месторождений тесно связано с процессами седиментогенеза и преобразовано в ходе метаморфизма. Региональные металлогенические обобщения [6, 8, 15] показали, что в северо-восточной части Сино-Корейского кратона следует выделять Ляодун-Северо-Корейскую металлогеническую провинцию уникальных по запасам месторождений магнетита, свинцово-цинковых и борных руд, сформированных синхронно процессам седиментогенеза и подводного вулканизма.

В основу представляемого анализа эволюции металлогении северной и северо-восточной части Си-

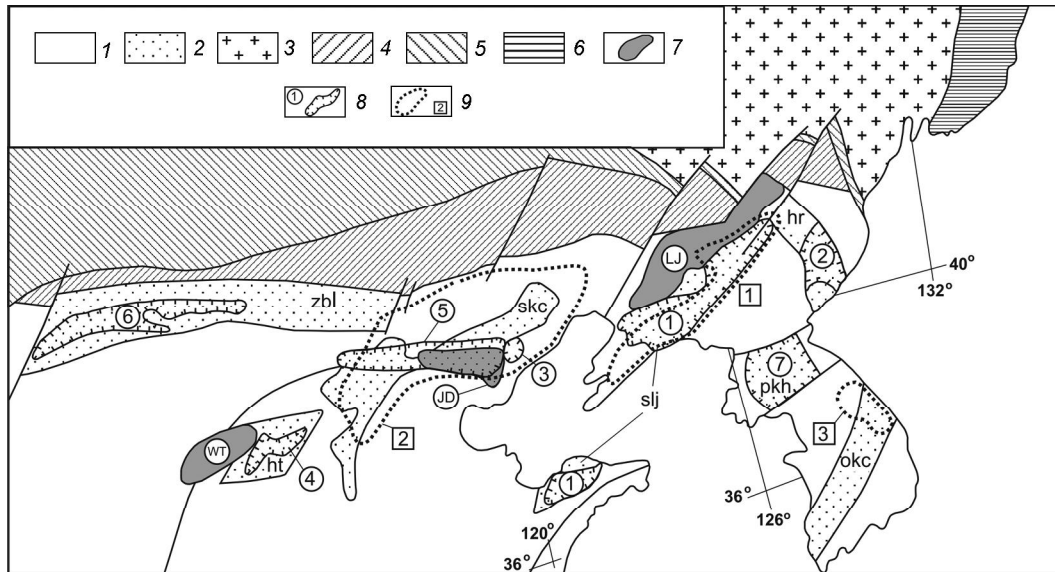
но-Корейского кратона положены выполненные обобщения современных данных и оригинальный авторский материал детального изучения северо-корейских месторождений.

#### АРХЕЙСКИЕ МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИЕ ЗОНЫ

Архейские металлогенические зоны отвечают террейнам, которые имеют характерный тип разреза протоконтинентальных окраин при доминировании вулканогенно-осадочных и магматических комплексов [19]. Породы преобразованы в биотитовые гнейсы, плагиоклазовые амфиболиты, хлоритовые сланцы, кварциты, плагиоклазовые кварциты и филлиты. В составе толщ присутствуют метаморфиты ультраосновного состава, тоналиты, трондьемиты и гранодиориты.

На территории Китая детально изучено три архейских металлогенических пояса: Вутяо, Джидун и Ляоджи (рис. 1). В современной структуре первые отвечают соответственно бортам протерозойского рифта Хутяо и рифта (авлакогена) Хэбей-Ляонин. Проявлены эти металлогенические зоны как территории, где в толщах переслаивания осадочных пород и вулканитов кислого и основного состава выявлены многочисленные крупные месторождения седиментогенных слоистых железных руд при доминировании окисных (железистые кварциты) и участии силикатных (магнетит, кварц и грунерит) и карбонатных (сидерит, ферродоломит) фаций. Возраст рудовмещающих толщ варьирует от 3.5 до 2.5 млрд лет. Складчатость и метаморфизм рудоносных толщ датируется 2.5 млрд лет [21]. В составе металлогенических зон присутствуют золоторудные месторождения, проявленные как зоны рассланцевания и кварц-золоторудного прожилкования. Месторождения золота традиционно связывались с процессами ретроградного докембрийского метаморфизма, однако, по данным датирования пород и руд, показано, что они сформировались как экономически значимые объекты в результате многостадийных гидротермальных преобразований рудовмещающих пород в позднепалеозойское и мезозойское время [15].

В металлогенической зоне Ляоджи, которая соответствует архейскому зеленосланцевому Джилин-Ляонин-Восточно-Шандунскому поясу (террейну активной континентальной окраины), кроме золоторудных метаморфогенных месторождений и месторождений слоистых железных руд присутствует медно-цинковое месторождение массивных сульфидных руд Хонтушань. Линзовидные рудные тела переслаиваются с биотит-плагиоклазовыми и амфибол-плагиоклазовыми гнейсами с прослоями фельзитовидных гнейсов и железистых кварцитов. В составе руд доминируют пирит и пирротин (до 80 %), присут-



**Рис. 1.** Архей-раннепалеозойские и мезозойские металлогенические зоны северной и северо-восточной части Сино-Корейского кратона, по данным [15], с изменениями и дополнениями.

1 – архейские террейны, частично перекрытые фанерозойским платформенным чехлом; 2 – протерозой-раннепалеозойские рифтогенные впадины (внутриплитные бассейны): skc – Хебей-Ляонинский прогиб; slj – Вост. Шандун-Вост. Ляонин-Вост. Джилинский рифт; ht – рифт Хутяо; hg – Хесан-Ривонский прогиб; zbl – Зангбей-Боян Обо-Лангшанский рифт; pkh – Пхеннамский прогиб; oks – Окчхонский прогиб; 3 – раннепалеозойский орогенный пояс (Бурзя-Ханкайский супертеррейн); 4 – аккреционная призма Вундурмяо (протерозой–ордовик); 5 – позднепалеозойский Солонкерский орогенный пояс; 6 – раннемеловой Сихотэ-Алинь-Северо-Сахалинский орогенный пояс; 7 – архейские металлогенические зоны: WT – Вутяо; JD – Джидун; LG – Ляоджи; 8 – протерозой-раннепалеозойские металлогенические зоны. Раннепротерозойские: 1 – Джиляоджи; 2 – Хесан-Ривонская; 3 – Киньлун; 4 – Лулиньшань. Среднепротерозойские: 5 – Янляо; 6 – Лангшань-Боян Обо. Рифей-раннепалеозойские: 7 – Пхеннамская; 9 – юрско-раннемеловые металлогенические зоны: 1 – Джиляолу; 2 – Яншаньская; 3 – Тэбэгсанская.

ствуют халькопирит и сфалерит. Возраст рудоносных толщ, по данным датирования трондьемитов, около 3.8 млрд лет [15].

#### ПРОТЕРОЗОЙСКИЕ МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИЕ ЗОНЫ

*Раннепротерозойские (2.5–1.6 млрд лет) металлогенические зоны* доминируют в составе рудоносной территории севера и северо-востока Сино-Корейского кратона. Они представлены локальными морскими депрессиями, где рудоносные толщи залегают в виде субплатформенного чехла на складчатом архейском фундаменте, пространственно сопряжены с архейскими рудоносными зонами, частично перекрывая их (рис. 1).

Металлогеническая зона Лулиньшань соответствует рифту Хутяо, в основании которого залегают рудоносные архейские толщи металлогенической зоны Вутяо. Протерозойские толщи сложены метаконгломератами, кварцитами, филлитами, известняками, доломитами, песчанистыми сланцами с прослоями metabазальтов и вмещают пластовые тела слоистых магнетит-гематитовых руд. Возраст оруденения, по данным U-Pb датирования metabазальтов по циркону, 2.4 млрд лет. Золоторудные месторождения связаны

с зонами расланцевания, где рудные минералы присутствуют в форме высокопробного золота, пирита, пирротина, магнетита, самородного свинца при минимальном участии галенита и борнита. Формирование месторождения связывается с процессами зеленосланцевого метаморфизма рудоносных толщ (около 2.3 млрд лет назад) [21].

Металлогеническая зона Киньлун отвечает восточной части Хебей-Ляонинского среднепротерозойского бассейна (авлакогена) и сопряжена с архейской зоной Джидун. Здесь, кроме месторождений слоистых магнетитовых руд, переслаивающихся с турмалиновыми гнейсами и гранат-слюдистыми сланцами, в толще переслаивания терригенно-карбонатных пород и вулканитов основного и кислого состава присутствуют пластовые тела терригенных пород с прожилково-вкрапленной минерализацией. Показано, что рудовмещающая толща была обогащена на седиментогенной стадии рудными компонентами, которые были ремобилизованы и сформировали прожилки и вкрапленность пирита, арсенопирита с золотом в связи с более поздними геологическими событиями [15].

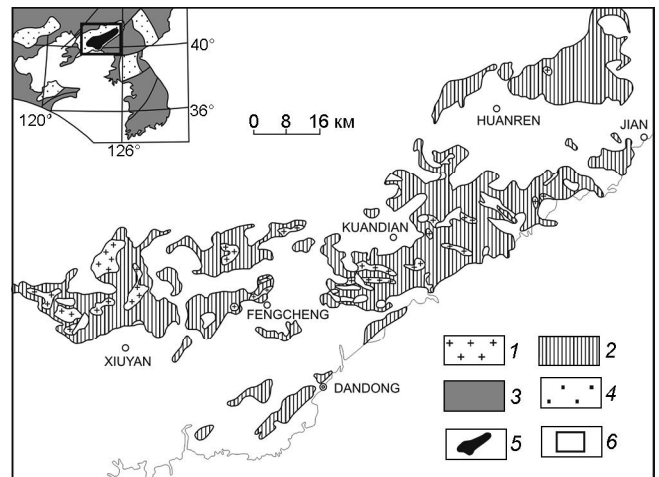
Зона Джиляоджи соответствует Вост. Шандун-Вост. Ляонин-Вост. Джилинскому рифту. В основании

рудноносного протерозойского разреза, объединяемого в группу Ляохэ, доминируют вулканогенно-осадочные породы. Среднюю часть разреза формируют терригенные породы, известняки и доломиты. Верхняя часть сложена переслаиванием субщелочных вулканитов среднего и кислого состава и осадочных пород, преобразованных на уровне амфиболитовой фации метаморфизма. В числе наиболее значительных рудных объектов металлогенической зоны представлены свинцово-цинковые месторождения рудного района Киньчензи. Месторождения локализируются в толще терригенно-карбонатных пород в средней части протерозойского разреза. Преобладают линзовидные и пластообразные тела массивных сульфидных руд в толще переслаивания амфиболитов, биотитовых сланцев, слоистых углеродистых и массивных мраморов. Галенит-сфалеритовые рудные тела участвуют в складчатости совместно с вмещающими породами. Руды имеют аналогичную рудовмещающим сланцам группы Ляохэ свинцово-изотопную характеристику [12].

Для верхней части разреза протерозойской толщи металлогенической зоны Джиляоджи характерны месторождения слоистых железных руд формации Дализи. Кроме объектов с доминирующими гематитовыми и магнетитовыми слоистыми рудами в ассоциации с кремнистыми породами, здесь проявлены пластовые сидеритовые месторождения, где рудовмещающая карбонатная толща аномально обогащена свинцом и цинком. Первичные условия осадконакопления интерпретируются как рудоносный мелководный бассейн, где гематит-магнетитовые руды в глинистых породах и сидеритовые руды в карбонатной толще связаны фаціальными переходами [15].

Для толщ в основании протерозойского разреза металлогенической зоны Джиляоджи характерна исключительно высокая насыщенность бором. Турмалин-биотитовые лептиты и турмалиниты имеют региональное распространение (рис. 2). Бороносные толщи непрерывно прослеживаются на сотни километров. В составе этих толщ присутствуют крупные линзовидные тела, сложенные суанитом  $[Mg_2(B_2O_3)]$ . Последние оценены как месторождения борных руд мирового класса. В ходе их детального изучения показано [20], что пачки пород с линзами суанита – это известняки, доломиты и магнезиты с горизонтами красноцветов и субщелочных пирокластических пород, которые в результате метаморфизма превращены в магнетит-микроклиновые мелкокристаллические гнейсы и лептиты (рис. 3).

Крупнейшее месторождение суанитовых руд – Венькуангоу (рис. 4). Непосредственно рудовмещающими являются магнезит-доломитовые породы с форстеритом и диопсидом с линзами магнезита. Здесь же



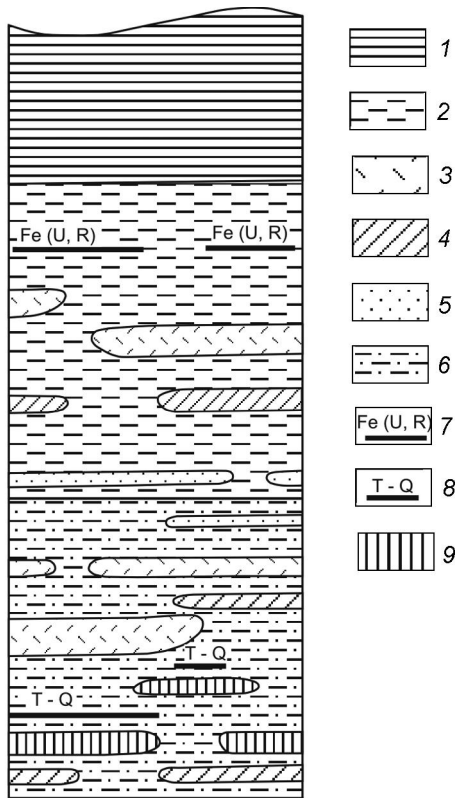
**Рис. 2.** Схема распространения бороносных метаморфических толщ раннепротерозойского возраста в восточной части полуострова Ляонин, по данным [16], с изменениями и дополнениями.

1 – граниты раннепротерозойского возраста; 2 – бороносные толщи группы Ляохэ; 3 – архейские террейны Сино-Корейского кратона; 4 – протерозой-раннепалеозойские рифтогенные бассейны; 5 – раннепротерозойская бороносная провинция Ляохэ; 6 – положение схемы на обзорной карте северо-восточной части Сино-Корейского кратона.

присутствуют горизонты брекчий, где обломки магнезиальных силикатных пород с форстеритом и диопсидом облекаются струйчатым агрегатом суанита и магнезита. Бороносная толща испытала метаморфизм амфиболитовой фации и интенсивную складчатость. Возраст метаморфизма – 1.9 млрд лет [15].

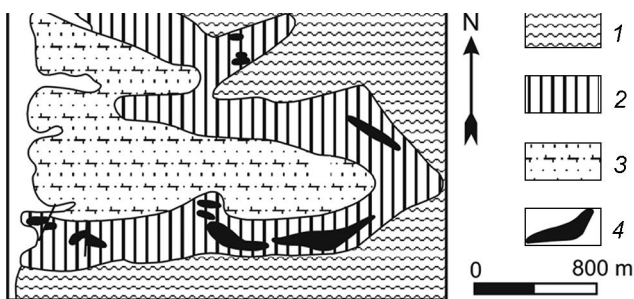
По данным петрологических и изотопно-геохимических исследований, суанитовые руды имеют характерный для морских эвапоритов утяжеленный изотопный состав бора (средние значения  $\delta^{11}B = +10$  ‰). Из этого следует, что турмалиниты и турмалинсодержащие метаморфические породы – это метаморфизованные глинистые бороносные осадки зоны морского эвапоритового седиментогенеза [20]. Аномальная обогащенность этих пород оловом (4.0–28.0 г/т) и барием (до 0.1%) [9] отражает возможное участие вулканических эксгальций в седиментогенном процессе.

Хесан-Ривонская металлогеническая зона в возрастном и литолого-стратиграфическом отношении однотипна металлогенической зоне Джиляоджи. Зона соответствует Хесан-Ривонскому прогибу (авлакогену). Прогиб выполнен слоистыми толщами раннепротерозойской маченренской серии, которая параллелизуется с китайской группой Ляохэ. Основание раннепротерозойского разреза сложено сончжинской свитой – интенсивно метаморфизованными вулканогенными и терригенными породами, которые



**Рис. 3.** Стратиграфический разрез бороносной толщи раннепротерозойского возраста в восточной части полуострова Ляонин (Вост. Шандун-Вост. Ляонин-Вост. Джилинский рифт), по данным [16].

1 – графитизированные осадочные породы; 2 – биотитовые кремнистые породы; 3 – метавулканические породы кислого состава; 4 – амфиболиты; 5 – альбитовые породы; 6 – кремнистые тонкокристаллические породы с турмалином; 7 – горизонты слоистых железных руд с урановой и редкоземельной минерализацией; 8 – турмалиниты; 9 – турмалин-магнезит-доломитовые породы с форстеритом и диопсидом, вмещающие линзы суанитовых руд.



**Рис. 4.** План-схема месторождения боратов Венькуангоу, адаптировано из [15].

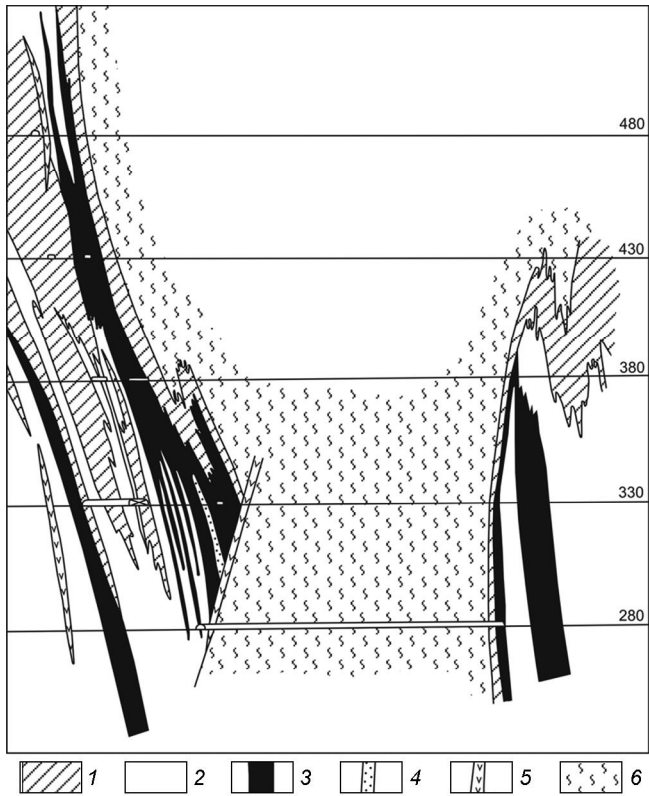
1 – тонкокристаллические биотитовые гнейсы; 2 – биотит-диопсидовые и амфибол-диопсидовые тонкокристаллические гнейсы; 3 – тонкозернистые гнейсы с турмалином; 4 – доломит-магнезит-суанитовые породы (рудные тела).

превращены в амфиболиты, биотит-амфиболовые гнейсы, гранитогнейсы с прослоями мраморов. Выше залегают слюдястые и известково-сланцевые сланцы, тремолитовые мрамора и слоистые известково-доломитовые породы пуктечонской свиты. Венчает разрез намдечонская свита, которая сложена в нижней части кремнистыми, известковистыми, слюдястыми сланцами с прослоями амфиболитов, а в верхней части преимущественно очковыми, слюдястыми, силлиманит-полевошпатовыми, турмалин-силлиманитовыми, турмалин-кварц-полевошпатовыми и другими сланцами с прослоями кварцитов.

Крупнейший рудный объект Хесан-Ривонской металлогенической зоны – свинцово-цинковое месторождение мирового класса Комдок ( $Pb:Zn \approx 1:4$ ). Рудовмещающие породы представлены пачкой переслаивания пуктечонских доломитов, пистомезитов и слюдястых сланцев, залегающей непосредственно ниже контакта с перекрывающими сланцами намдечонской свиты. Породы собраны в серию изоклиналиных складок меридионального простирания. Рудные тела приурочены к горизонтам слоистых доломитов, в виде линз и пластов залегают согласно с вмещающими породами и совместно участвуют в складчатости (рис. 5). Мощность рудных линз и пластов варьирует от 0.5 до 10.0 м. Присутствуют раздувы рудных тел мощностью до 30.0 м. По простиранию индивидуальные рудные тела прослеживаются на 1–2 км, но в целом рудоносный горизонт, мощность которого не превышает 100 м, прослеживается в субмеридиональном направлении более чем на 10 км. Крутопадающие рудные тела прослежены подземными горными выработками на глубину около 1 км.

В составе руд преобладает сфалерит, содержащий 6.0–7.5 мас.% железа. Он образует тесные сростания с резко уступающим ему по распространенности галенитом. Для галенита характерны мелкие включения тетраэдрита, джемсонита и буланжерита. Пирит присутствует в рудах в виде округлых включений фрамбоидального типа.

Преобладают массивные руды, но ближе к области выклинивания рудных тел появляются полосчатые разновидности, где чередуются сульфидные, доломитовые и пистомезитовые слойки мощностью от 3–5 мм до 5–10 см. Здесь же проявлено будинирование карбонатных прослоев с формированием типичных брекчиевых текстур, где обломки доломита облекаются струйчатым сульфидным агрегатом. Реже происходит развальцевание сульфидных прослоев. При этом сфалерит по периферии рудных будин осветляется. Для массивных руд типичны струйчатые динамометаморфические текстуры, где галенит фор-



**Рис. 5.** Геологический разрез через южный фланг месторождения Комдок, по данным [4], с изменениями.

1 – переслаивание слюдястых сланцев и доломитов пуктечонской свиты; 2 – доломиты пуктечонской свиты; 3 – сплошные, массивные полиметаллические руды; 4 – вкрапленные полиметаллические руды; 5 – дайки андезитовых порфиров; 6 – сланцы намдечонской свиты. Цифры – горизонты подземных горных выработок, в метрах над уровнем моря.

мирует обособленные тонкие полоски с текстурой свинца.

В сфалерите выявляются микроструктуры деформирования двойниковых полос. Вблизи полосок галенита сфалерит перекристаллизован и представлен кристаллическим агрегатом с зернами, вытянутыми вдоль полоски.

На южном фланге месторождения располагается крупная интрузия мезозойских гранитоидов с зонами экзоконтактового скарнирования терригенно-карбонатных пород. Скарны с сульфидами локализуются только на контакте гранитов с рудоносной пачкой доломитов. В составе силикатного парагенезиса скарнов доминируют гроссуляр и андрадит. Для скарнов характерны мелкие гнезда и прожилки галенита и низкожелезистого сфалерита. В отличие от галенита слоистых руд, галенит из скарнов аномально обогащен висмутом (до 0.43 %).

Слоистые руды в непосредственной близости с гранитной интрузией сохраняют текстурные макро-

признаки динамометаморфических преобразований. Но при травлении полированных шлифов обнаружено, что сульфиды имеют специфические микротекстуры. В галените проявлена полигонально-зернистая текстура тройных углов стыковки. А галенит-сфалеритовый агрегат имеет текстуру, где сфалерит обособляется в каплевидной форме. Подобные текстуры характерны исключительно для термально преобразованных руд [14] и не оставляют сомнений в том, что плейчатые динамометаморфизованные сульфидные руды локально преобразованы в термальном поле гранитной интрузии. Появление включений кубанита в сфалерите слоистых сульфидных руд близ контакта с гранитами [5] выступает как прямое минералогическое свидетельство термальной переработки руд.

Характерные текстуры руд, отсутствие зон метасоматической переработки на контакте согласно залегающих в складчатых слоистых осадочных породах пластовых рудных тел выступают как фундаментальные признаки связи доскладчатого рудообразования с эксгальционнно-осадочными процессами дистального типа. Участие в процессе рудообразования сульфатов морской воды находит свое выражение в утяжеленном изотопном составе серы сфалерита ( $\delta^{34}\text{S} = +6.0 \div +14.0 \text{ ‰}$ ).

Указанные особенности месторождения Комдок согласуются с расчетным Pb-Pb возрастом полиметаллических руд, который соответствует, по нашим данным и данным корейских геологов [3], возрасту рудовмещающих осадочных толщ (1.94 млрд лет).

Кроме месторождения Комдок в аналогичной литолого-стратиграфической позиции обнаружены свинцово-цинковые месторождения Ченнам и Чемпхен. Эти месторождения имеют меньшие масштабы, но однотипны по текстурам, минеральному составу руд и условиям их локализации месторождению Комдок.

Осадочные породы намдечонской свиты аномально обогащены бором. Для толщи биотит-полевошпатовых и силиманит-полевошпатовых сланцев, кроме рассеянной вкрапленности турмалина, характерны горизонты турмалин-альбитовых пород и турмалинитов. Бороносные породы совместно со сланцами интенсивно деформированы и участвуют в изоклинальной складчатости. Локально, в виде зон протяженностью несколько сотен метров, турмалиниты минерализованы и несут прожилково-вкрапленное оруденение. Ранняя рудная ассоциация представлена вкрапленностью магнетита, арсенопирита, пирита и шеелита в турмалиновых (альбит-дравитовых) породах. А поздняя минеральная ассоциация проявлена как сложно ветвящиеся субслоистые интенсивно деформированные кварц-турмалиновые прожилки и мел-

кие жилы с халькопиритом, пирротином, сфалеритом и блеклыми рудами. Установлено [5], что рудные минералы локализуются в кварце в тесной ассоциации с тонкими волосовидными кварц-полевошпатовыми прожилками. Их появление связывается с процессами мигматизации обогащенных рудными элементами эксгальционно-осадочных бороносных пород в связи с внедрением интрузий протерозойских гранитоидов.

Для намдечонской свиты также характерны линзообразные тела магнетитовых руд. Локализуются они среди слюдястых сланцев с редкими прослоями известняков, кристаллических сланцев и амфиболитов. Участками рудные тела совмещены с зонами скарнирования, но большей частью удалены от интрузий. По данным корейских геологов [3], скарнирование наложено на железистые руды, сформированные синхронно с протерозойским осадконакоплением. Предполагается, что процессы рудообразования в период формирования железных руд проявились как придонные эксгальции в связи с подводным вулканизмом основного состава.

*Позднепротерозойские металлогенические зоны (1.6–1.0 млрд лет)* проявляют аналогично раннепротерозойским унаследованную сопряженность с рифтогенными структурами.

Главная рудоносная структура этого возраста – металлогеническая зона Янляо – находится в восточной части горной системы Яншань, занимая запад провинции Ляонин и северо-восток провинции Хэбэй. В геолого-структурном отношении она отвечает Хэбэй-Ляонинскому морскому бассейну (авлакогену), где в позднем протерозое была сформирована толща глинистых сланцев с горизонтами известняков и доломитов (рис. 1). Для средней части разреза, где доминируют глинистые сланцы, характерно присутствие пластовых залежей седиментогенных марганит-родохрозитовых железо-марганцевых руд. С толщиной марганцовистых сланцев и доломитов связаны пластовые залежи свинцово-цинковых руд эксгальционно-осадочного происхождения [17].

Наиболее значительным является месторождение Гаобань, которое представлено серией пластообразных залежей на участке общей протяженностью около 6 км при ширине 3 км. Рудовмещающие породы – это марганцовистые сланцы и доломиты позднепротерозойской формации Гаюжуань. В составе рудных минералов доминируют сфалерит, галенит и пирит. Текстуры руд от массивной до слоистой. Для нерудных прослоев характерна вкрапленность фрамбоидального и колломорфного пирита. Формирование руд происходило, по данным китайских геологов, синхронно осадконакоплению и диагенезу рудоносной протерозойской толщи.

На крайнем западном фланге Сино-Корейской провинции находится позднепротерозойская Лангшань-Баян Обо металлогеническая зона с многочисленными эксгальционно-осадочными медь-свинцово-цинковыми и полигенными REE-Fe-Nb месторождениями. Зона приурочена к Зангбей-Баян Обо-Лангшанскому рифтогенному бассейну, сформированному в краевой части Сино-Корейского кратона (рис. 1).

Сульфидные залежи наиболее значительного месторождения Хугеки металлогенической зоны Лангшань-Баян Обо локализованы в толще филлитов, сланцев и кварцитов с изотопным возрастом 1.1 млрд лет. В составе руд доминируют халькопирит, пирит, пирротин, магнетит, галенит, сфалерит. Присутствуют арсенопирит и гематит. Доказывается эксгальционно-осадочный генезис руд [13].

Уникальное месторождение редкоземельных металлов Баян Обо представлено пластовыми и линзовидными залежами в толще кварцитов, сланцев, известняков и доломитов при минимальном участии вулканических пород кислого и среднего состава. Доминируют прожилково-вкрапленные и жильные руды. Генезис месторождения является предметом дискуссий. Высказывается мнение, что рудные тела сформированы как при участии эксгальционно-осадочных процессов, так и более поздних процессов метасоматического замещения осадочных доломитов [11, 18].

#### **РИФЕЙ-РАННЕПАЛЕОЗОЙСКИЕ МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИЕ ЗОНЫ**

Рифей-кембрийские металлогенические зоны проявлены, как и протерозойские зоны, в виде внутриплитных бассейнов, но характерны только для северо-востока Сино-Корейского кратона. Наиболее изученной является Пхеннамская металлогеническая зона в Северной Корее, которая соответствует в геологическом плане рифей-раннепалеозойской Пхеннамской депрессии (авлакогену) (рис. 1).

Основание рудоносного разреза представлено рифейской серией Санвон. По данным корейских геологов [3], осадочные породы залегают без видимого углового несогласия на раннеархейских метаморфитах наннимского комплекса. В составе серии выделяют четыре свиты: 1) чикхен – кварциты, хлорит-мусковитовые, мусковитовые, кварц-биотитовые сланцы, филлиты и мраморы – 1–1.5 км; 2) садану – известняки и доломиты с пачками серицит-хлоритовых сланцев, филлитов и кремней – от 1.3 до 2.0 км; 3) мукчен – серицитовые, кремнистые, известковистые сланцы – 0.25 км; 4) кухен – филлиты, филлитовидные глинистые сланцы, алевролиты и внутриформационные конгломераты – не более 300 м (рис. 6).

Суммарная мощность толщи меняется в широких пределах, увеличиваясь к осевым частям авлаогена от нескольких сотен метров до 5 км.

Кембрий и ордовик представлены всеми отделами, кроме верхнего ордовика. Это морские терригенные и карбонатные отложения общей меняющейся мощностью от нескольких сотен метров до 4 км.

Характерной особенностью Пхеннамской металлогенической зоны является обилие свинцово-цинковых месторождений (Pb:Zn ≈ 2:3), локализованных среди карбонатных пород. Месторождения представлены многоярусными линзо-пластообразными телами галенит-сфалеритовых руд, локализованными преимущественно в карбонатных породах рифейских свит чикхен и садану, а также в составе кембрийской свиты яндок (рис. 6). К числу типовых относится месторождение Маджен (рис. 7).

Все месторождения однотипны. Рудные тела залегают согласно с напластованием вмещающих карбонатных пород и отчетливо участвуют в складчатости совместно с ними. Рудовмещающие горизонты сложены преимущественно доломитовыми известняками и доломитами и прослеживаются на десятки километров.

В составе рудоносных горизонтов устанавливаются три разновозрастные минеральные ассоциации. Первая, седиментогенно-диагенетическая, представлена скоплениями пелитоморфного кварца, кальцита, доломита, чешуйчатыми мелкими выделениями серицита, хлорита с рассеянной вкрапленностью флюорита, сфалерита и фрамбоидального пирита. Для второй, гидротермально-метасоматической, ассоциации характерны сростки хорошо ограненного кварца, доломита, сфалерита и галенита. Формирование кварца и доломита, судя по ориентировке идиоморфных кристаллов, происходило в субслоистых флюидонаполненных полостях осадочных карбонатных пород. Сульфиды кристаллизовались вслед за кварцем, близодновременно с крупнокристаллическим доломитом, выполняя интерстиции между кристаллами кварца. Третья минеральная ассоциация связывается с региональным метаморфизмом и проявлена как кварц-тремолит-мусковитовый агрегат, который наложен на осадочные породы и руды. Отчетливо проявлены структуры пересечения минералов гидротермально-метасоматической ассоциации мусковитом. Сфалерит на контакте с мусковитом освобождается от эмульсионной вкрапленности халькопирита, а галенит становится менее сереброносным. Сам мусковит, пересекающий зерна сфалерита, обогащается цинком (до 1.5–2.0 %). При этом пересечение метаморфогенным мусковитом уже изогнутых полисинтетических двой-

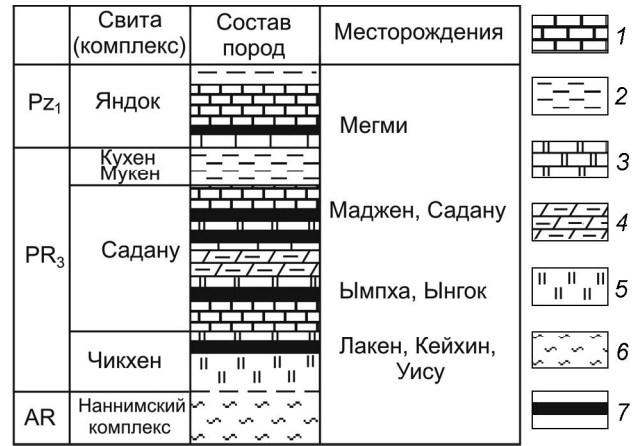


Рис. 6. Схема литолого-стратиграфической приуроченности стратиформных свинцово-цинковых месторождений Пхеннамской металлогенической зоны, по данным [4].

1 – известняки, 2 – сланцы, 3 – доломиты, 4 – доломитовые известняки, 5 – кварциты, 6 – гнейсы, 7 – свинцово-цинковые стратиформные месторождения.

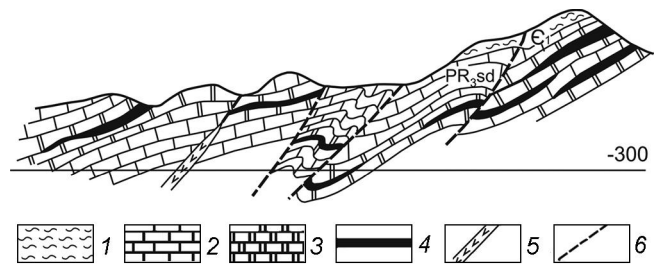


Рис. 7. Схематический геологический разрез свинцово-цинкового месторождения Маджен, по данным [4], с изменениями.

1 – сланцы, 2 – графитизированные темно-серые известняки с тонкой вкрапленностью сфалерита и флюорита, 3 – светло-серые доломитовые известняки, 4 – галенит-сфалеритовые рудные тела, 5 – дайки андезитовых порфиритов, 6 – разломы.

ников сфалерита свидетельствует о последовательных процессах деформации и метаморфизма руд.

Утяжеленный изотопный состав серы сульфидов ( $\delta^{34}\text{S} = +5.4 \div +8.0 \%$ ) отражает участие сульфатной серы морской воды в процессах рудообразования.

Кроме рассеянной вкрапленности флюорита в карбонатных породах свинцово-цинковых месторождений, для Пхеннамской металлогенической зоны характерно присутствие стратиформных собственно флюоритовых месторождений.

Наиболее значимым и детально изученным является флюоритовое месторождение Пхенсан. Оно представлено серией линз мощностью до 10 м и протяженностью около 200 м, локализованных на



контакте кварцитов свиты чикхен и перекрывающих известняков свиты садану. Преобладают полосчатые руды: чередование полос, сложенных известняками и крупнокристаллическим флюоритом. Характерной особенностью таких руд является крайне незначительное замещение карбонатных пород со стороны скоплений флюорита. Прослой известняков часто бывают разорваны, фрагменты известняков «плавают» в гидротермальном цементе. Текстурно эти руды однотипны с полиметаллическими, которые были сформированы седиментогенными растворами при их нагнетании в субсогласные напластованию осадочных пород коллекторы. Судя по температуре гомогенизации газовой-жидких включений во флюорите, эти руды, так же как и стратиформные полиметаллические, формировались при температуре около 150°C.

В составе рудоносной рифей-раннепалеозойской толщи, которая выполняет Пхеннамский прогиб, не фиксированы горизонты, обогащенные бором. Тем не менее, широко проявлены зоны скарирования с суанитом на контакте доломитов и известняков с интрузиями гранитоидов юрско-раннемелового возраста. Предполагается, что источником бора выступают ассимилированные гранитоидами бороносные толщи перекрытого рифейскими породами докембрийского фундамента.

#### **ЮРСКО-РАННЕМЕЛОВЫЕ МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИЕ ЗОНЫ ВНУТРИПЛИТНОГО МАГМАТИЗМА**

Юрско-раннемеловые металлогенические зоны северной и северо-восточной части Сино-Корейского кратона связаны с проявлением юрско-раннемеловых вулканоплутонических процессов. Самыми значительными являются металлогенические зоны Джиляолу, Яншань и Тэбэгсан (рис. 1).

Металлогеническая зона Джиляолу представлена как пояс вулканоплутонических депрессий юрско-раннемелового возраста, которые сформировались на докембрийском фундаменте. Вулканиды локально перекрывают Джилин-Ляонин-Вост.-Шандунский террейн архейского возраста и толщи Вост.-Шандун-Вост.-Ляонин-Вост.-Джилинского рифтового бассейна протерозойского возраста. В составе мезозойских вулканических толщ доминируют андезиты, дациты и риолиты известково-щелочной серии. Плутонические породы – преимущественно многофазные интрузии гранитов. Формирование пояса связывается с процессами мезозойской деструкции Сино-Корейского кратона в зоне влияния системы разломов Тан-Лу [15].

Пространственно, в плане, металлогеническая зона Джиляолу в полном объеме соответствует древним металлогеническим зонам (рис. 1): на северном

окончании – архейской металлогенической зоне Джидун; в центре и на юге – протерозойской металлогенической зоне Джиляоджи.

С гранитоидными породами связаны преимущественно многочисленные жильные золоторудные месторождения, но присутствуют также штокверковые, жильные и скарновые месторождения свинца, цинка и меди.

Металлогеническая зона Яншань объединяет десятки рудных районов, размещение которых контролируется субширотными разломами. Рудовмещающими являются разломы север-северо-восточной ориентировки. Доминируют золоторудные месторождения, тесно ассоциированные с интрузиями субщелочных гранитоидов в архейских метаморфических породах, и золото-серебряные эпitherмальные месторождения в мезозойских вулканитах. С интрузиями гранитов и гранодиоритов, которые прорывают архей-раннепротерозойские метаморфические толщи, связаны скарновые медные и вольфрамовые месторождения. Немногочисленные свинцово-цинковые месторождения представлены преимущественно жилами и зонами прожилкования в зонах метасоматоза, которые наложены на кристаллические метаморфические породы архей и раннего протерозоя. Мезозойские месторождения отчетливо концентрируются в субширотной полосе, которая отвечает древней архейской металлогенической зоне Джидун и протерозойским зонам Янляо и Киньлун, и по вертикали совмещены с многочисленными архей-протерозойскими золоторудными и свинцово-цинковыми месторождениями.

Металлогеническая зона Тэбэгсан, располагающаяся в восточной части прибрежной части Корейского полуострова, не имеет видимой пространственной связи с древними металлогеническими зонами, но, тем не менее, приурочена к восточному флангу Окчхонского прогиба – внутриплитного бассейна рифей-раннепалеозойского возраста. Для данной металлогенической зоны характерны преимущественно скарновые железорудные, свинцово-цинковые и вольфрам-молибден-бериллиевые месторождения, сформированные при участии тел юрско-раннемеловых гранитов, гранит-порфиров и кварцевых порфиров, которые прорывают карбонатные толщи позднего протерозоя и раннего палеозоя. Отмечается [15], что малые интрузии, с которыми связаны скарноворудные тела, аномально обогащены, так же как и вмещающие их толщи осадочных пород, рудными элементами.

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Территория севера и северо-востока Сино-Корейского кратона – крупнейший металлогенический

элемент востока Евразии. Здесь многократно проявились процессы рудообразования, связанные с седиментогенезом унаследованно развивающихся рифтогенных зон архей-протерозой-раннепалеозойского возраста. При сохраняющейся во времени значительной роли разновозрастных золоторудных месторождений отчетливо выражена эволюция рудообразующих процессов. Архейские медно-цинковые колчеданные месторождения в вулканогенно-осадочных толщах сменяются протерозойскими свинцово-цинковыми месторождениями в терригенно-карбонатных породах и далее существенно свинцовыми стратиформными месторождениями в рифей-кембрийских карбонатных толщах. При этом, архейские месторождения слоистых железных руд сменяются в протерозое железомарганцевыми окисными и сидеритовыми месторождениями [15]. Для раннего протерозоя характерен комплекс турмалиновых гнейсов и пластовых тел турмалинитов. Бороносные, часто аномально обогащенные рудными компонентами, толщи формировались в результате подводных эксгалационно-осадочных процессов, а также при участии эвапоритов [20]. Собственно эвапоритовые отложения преобразованы в процессе метаморфизма и представлены в современной структуре месторождениями суанитовых руд мирового класса. Для рифей-кембрийских отложений кроме стратиформных свинцовых месторождений характерна аномальная насыщенность толщ карбонатных пород стратиформными месторождениями флюорита.

Изучение свинцово-цинкового гиганта востока Евразии – месторождения Комдок – показало, что в среднем протерозое в морских континентальных бассейнах рифтогенной природы доминировали процессы эксгалационно-осадочного рудогенеза при участии сульфатов морской воды. Рудные тела совместно с вмещающими терригенно-карбонатными породами участвовали в складчатости, были регионально метаморфизованы и в последующем частично скарнированы под влиянием интрузий гранитоидов.

В мезозойских структурах также проявлена металлогеническая унаследованность. Юрско-раннемеловые золоторудные и полиметаллические месторождения ассоциированы с вулканоплутоническими комплексами внутриплитных серий, ареалы развития которых совпадают с территориями, где фундамент представлен рудоносными толщами рифтогенных докембрийских бассейнов.

Принципиально важное значение для оценки перспектив обнаружения аналогов сино-корейских месторождений на дальневосточной территории РФ имеет вопрос о наличии фрагментов Сино-Корейского кратона в составе фанерозойских орогенных поясов востока Азии. Нельзя исключать мнение, что значи-

тельная часть террейнов на северо-востоке Азии была связана в докембрийской истории с Сино-Корейским кратоном. К числу таких фрагментов относят Охотский и Омолонский массивы [9]. В литолого-стратиграфическом отношении сходство проявляют и террейны, участвующие в строении Бурей-Ханкайского супертеррейна. В особой мере это относится к Вознесенскому террейну, где уже выявлены пластообразные тела флюорит-магнетит-сфалеритовых руд в толще карбонатных пород кембрийского возраста [1], а широко проявленный борный метасоматоз в рудных зонах с оловянным оруденением, судя по аномальным значениям  $\delta^{11}\text{B}$  турмалина (+26.98 ‰), связан с заимствованием рудоносными палеозойскими гранитоидами бора из эвапоритовых толщ докембрийского фундамента [7].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №12-05-9293-Инд\_а, №12-05-31041 мол\_а.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андросов Д.В., Раткин В.В. Доскладчатые цинково-колчеданные руды на Вознесенском грейзеновом месторождении // Геология руд. месторождений. 1990. Т. 35, № 5. С. 46–58.
2. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. Ред. А.И. Ханчук. Владивосток: Дальнаука. 2006. 981 с.
3. Геология Кореи. Пхеньян: Изд-во книг на ин. яз., 1993. 663 с.
4. Ким Чан Вон, Кан Хен Габ. Геология рудных месторождений КНДР. Пхеньян: АН КНДР. 1983. 364 с.
5. Магматизм и полезные ископаемые Северо-Восточной Кореи и юга Приморья. М.: Наука, 1966. 224 с.
6. Петров О.В. Тектоника и металлогения Северной и Центральной Евразии на основе анализа новых международных карт масштаба 1:2500000 // Региональная геология и металлогения. 2009. № 37. С. 4–15.
7. Раткин В.В. Металлогения свинца и цинка Тихоокеанской окраины Азии: Дис... д-ра геол.-минер. наук. М., 1995. 364 с.
8. Раткин В.В. Эволюция и рудоносность Хесан-Ривонской металлогенической зоны докембрийской континентальной окраины (Сино-Корейский щит) // Геодинамика и минерагения Северо-Восточной Азии. Улан-Удэ: Изд-во «Экос», 2013. С. 297–299.
9. Смелов А.П., Янь Х., Тимофеев В.Ф. Модель формирования Северо-Азиатского и Сино-Корейского кратонов в раннем докембрии // Тектоника и металлогения Центральной и Северо-Восточной Азии. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2002. С. 35–36.
10. Тихоокеанская окраина Азии. Металлогения / Ред. Е.А. Радкевич. Владивосток: ДВО АН СССР. 1991. 204 с.
11. Chao E.C.T., Baok J.M., Minkin J.A. Host rock controlled epigenetic hydrothermal metasomatic origin of the Bayan Obo REE-Fe-Nb ore deposit, Inner Mongolia, People's Republic of China // Applied Geochemistry. 1992. V. 7. P. 43.
12. Chen J., Yu G., Xue C. et. al. Pb isotope geochemistry of lead, zinc, gold and silver deposit clustered region, Liaodong rift zone, northeastern China // Sci. China. Ser. D-Earth Sci. 2005.

- V. 48, N. 48. P. 467–476.
13. Ge C., Sun H., Zhou T. Cu deposits of China // Mineral deposits of China. Beijing: Geol. Publ. House, 1994. V. 1. P. 35–113.
  14. Mills J.W. Metamorphism of the zinc-lead sulfide ores of the Yellowhead horizon, Metaline limestone formation, Northeastern Washington // Econ. Geol., 1978. V. 71, N 8. P. 1601–1609.
  15. Parfenov L.M., Nokleberg W. J., Berzin N.A. et.al. Tectonic and metallogenic model for Northeast Asia: U.S. Geol. Survey Open-File Report 2011–1026, 2011. CD-ROM.
  16. Peng Q., Feng B., Liu J., Zhou R. Geology of the Early Proterozoic boron deposits in Eastern Liaoning, Northeastern China // Resource Geol. Spec. Issue. 1993. N 15. P. 343–350.
  17. Tu G. Lead-zinc deposits of China // Mineral deposits of China. Beijing: Geol. Publ. House, 1989. V. 1. P. 114–206.
  18. Tu G. The unique nature in ore composition, geological background and metallogenetic mechanism of non-conventional superlarge ore deposits: A preliminary discussion // Beijing: Sci. China Press, 1998. Ser. D. V. 41. P. 1–6.
  19. Shen B., Luo H., Li Sh. et. al., Geology and mineralization of Archean greenstone Belt, in north China Platform. Beijing: Publ. House, 1994. P. 74–138.
  20. Xu H., Peng Q., Palmer M.R. Origin of tourmaline – rich rocks in a Proterozoic terrane (N.E China): Evidence for evaporate-derived boron // Geology in China. 2004. V. 31. N.3. P. 40–253.
  21. Zhai M. G., Bain A.G., Zhai T.P. The amalgamation of the supercontinent of North China craton at the end of Neoproterozoic and its break-up during Late Paleoproterozoic and Mesoproterozoic // Science in China. 2000. V. 43. 219 p.

*Рекомендована к печати Н.А. Горячевым*

**V.V. Ratkin, V.I. Gvozdev, O.A. Karas'**

### **Boron-polymetallic metallogeny of the northern and northeastern Sino-Korean craton**

On the basis of published data and original investigations it has been shown that for metallogenic belts of the north and northeastern Sino-Korean craton the combination of widely known Fe, Fe-Mn ores, Au-deposits and unique boron, lead-zinc world class deposits is typical. Here the ore-forming processes have been spatially inherited from Archean to Mesozoic times. The Archean metallogenic belts are related with protocontinental margin terranes of the craton basement and include the banded iron formation (BIF) and volcanogenic Cu-Zn massive sulfide deposits. The Proterozoic - Early Paleozoic metallogenic belts are the rift basins where volcanic and sedimentary rock assemblages covered the folded Archean ore-bearing basement. Proterozoic metallogenic belts contain Au in shear-zone and quartz-vein deposits, BIF and sedimentary Fe-Mn deposits, major sedimentary-metamorphic borate and magnesite deposits, tourmalinite-hosted Cu-W deposits, sedimentary exhalative Pb-Zn (SEDEX) deposits, and large polygenic REE-Fe-Nb deposits. The Riphean and Cambrian terrigenous carbonaceous strata are characterized by the presence of stratiform Pb-Zn and fluorite deposits. The Mesozoic metallogenic zones associated with volcano-plutonic complexes of intraplate series exhibit the same inheritance and coincide with the zones where the basement consists of Precambrian ore-bearing sequences. Au-deposits are typical for all metallogenic belts but their most part is connected with Mesozoic volcano-plutonic complexes.

**Keywords:** rift, metallogeny, deposits, iron, lead, zinc, boron, fluorite, gold, craton, Sino-Korean.