

## Колчеданно-полиметаллическое оруденение Рудного Алтая типа VMS на примере Зайцевского рудного поля (Змеиногорский рудный район)

**Аннотация.** Рассмотрены особенности рудовмещающих вулканогенно-осадочных пород и колчеданно-полиметаллического оруденения типа VMS в пределах Зайцевского рудного поля. Рудовмещающие породы относятся к нижней (ранний цикл вулканизма) рудоносной формации – базальтсодержащей риолитовой известково-кремнисто-терригенной. В пределах Зайцевского рудопоя установлены Зайцевская и Рязановская рудные зоны, в которых выделены колчеданно-полиметаллический, колчеданный, медно-колчеданный и колчеданно-медно-цинковый минеральные типы руд. По текстурным особенностям руды вкрапленные, прожилково-вкрапленные, брекчиевые и массивные. Основная масса сульфидов в стратиформных рудных телах была образована на раннем этапе в результате придонного переотложения. В подчинённом количестве присутствуют сульфиды, образованные гидротермально-осадочным путём и вследствие воздействия новых порций гидротермальных растворов. Также образуются сульфиды, которые развиваются по цементу рудных брекчий и в прожилково-вкрапленных зонах минерализации. Распространение рудных брекчий с текстурами, характерными для брекчий обрушения, свидетельствует о существовании на поверхности морского дна гидротермальной сульфидной постройки, которая отчётливо выделяется в пределах Рязановской рудной зоны.

**Ключевые слова:** VMS, Рудный Алтай, Зайцевское рудное поле, придонное переотложение.

СЕРАВИНА ТАТЬЯНА ВАЛЕРЬЕВНА, кандидат геолого-минералогических наук, заведующая лабораторией, seravina@tsnigri.ru

КУЗНЕЦОВ ВЛАДИМИР ВЕНИАМИНОВИЧ, кандидат геолого-минералогических наук, начальник отдела, okt@tsnigri.ru

КУЗНЕЦОВА СВЕТЛАНА ВЛАДИМИРОВНА, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, skuznetsova@tsnigri.ru

ФИЛАТОВА ЛЮДМИЛА КОНСТАНТИНОВНА, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, filatova@tsnigri.ru

ИВАНЕНКОВА ЕЛЕНА ВЛАДИМИРОВНА, старший научный сотрудник, ivanenkova@tsnigri.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов» (ФГБУ «ЦНИГРИ»), г. Москва

## Pyrite-polymetallic VMS type mineralization of the Rudny Altai on the example of the Zaitsevskoe ore field (Zmeinogorsky ore district)

T. V. SERAVINA, V. V. KUZNETSOV, S. V. KUZNETSOVA, L. K. FILATOVA, E. V. IVANENKOVA  
Federal State Budgetary Institution "Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals" (FSBI "TSNIGRI"), Moscow

**Annotation.** The features of ore-containing volcanogenic sedimentary rocks and pyrite-polymetallic mineralization of the VMS type within the Zaitsevskoe ore field are considered. The ore-bearing rocks belong to the lower (early cycle of volcanism) ore-bearing formation – basalt-containing rhyolite calcareous-siliceous-terriгенous. Within the Zaitsevskoe ore occurrence, the Zaitsevskaya and Ryzanovskaya ore zones were identified, in which pyrite-polymetallic, pyrite, copper-pyrite and pyrite-copper-zinc mineral types of ores were identified. According to the textural features of the ore: interspersed, veined-interspersed, breccia and massive. The main mass of sulfides within the stratiform ore bodies was formed at an early stage – as a result of the processes of seafloor replacement. Sulfides formed by hydrothermal sedimentation and as a result of exposure to new portions of hydrothermal solutions are present in a subordinate amount. Sulfides are also formed, which develop along the cement of ore breccias and in veined-interspersed mineralization zones. The distribution of ore breccias with textures characteristic of collapse breccias indicates the existence of a hydrothermal sulfide structure on the seabed surface, which is clearly distinguished within the Ryzanovskaya ore zone.

**Key words:** VMS, Rudny Altai, Zaitsevskoe ore field, seafloor replacement.

**Фактический материал.** Зайцевское рудное поле расположено в юго-восточной части Змеиногорского рудного района Рудноалтайской минералогической зоны (рис. 1), принадлежащей к крупной региональной синклиной структуре (к северо-западному окончанию) – Змеиногорско-Быструшинскому прогибу. Начиная с 1960 г. в рудном поле проводились геологические съёмки масштабов 1 : 200 000 и 1 : 50 000, а в 1970–80 годы были выполнены специализированные геолого-геохимические работы. В результате поисковых работ в пределах рудного поля сотрудниками Рязановской партии РАЭ было уточнено геологическое

строение и выявлен ряд перспективных участков, в том числе Зайцевский.

В пределах Зайцевского рудного поля известно Зайцевское рудопроявление, в рамках которого нами выделены две рудные зоны – Зайцевская и Рязановская. Особенности геологического строения рудопроявления приводятся на примере Зайцевской рудной зоны (рисунки 2, 3). Разрез рудопроявления представлен вулканогенно-осадочными и вулканогенными породами кислого, среднего и основного составов, которые по возрасту и соотношению вулканогенной и осадочной составляющих относятся к нижней (ранний цикл вулканизма)

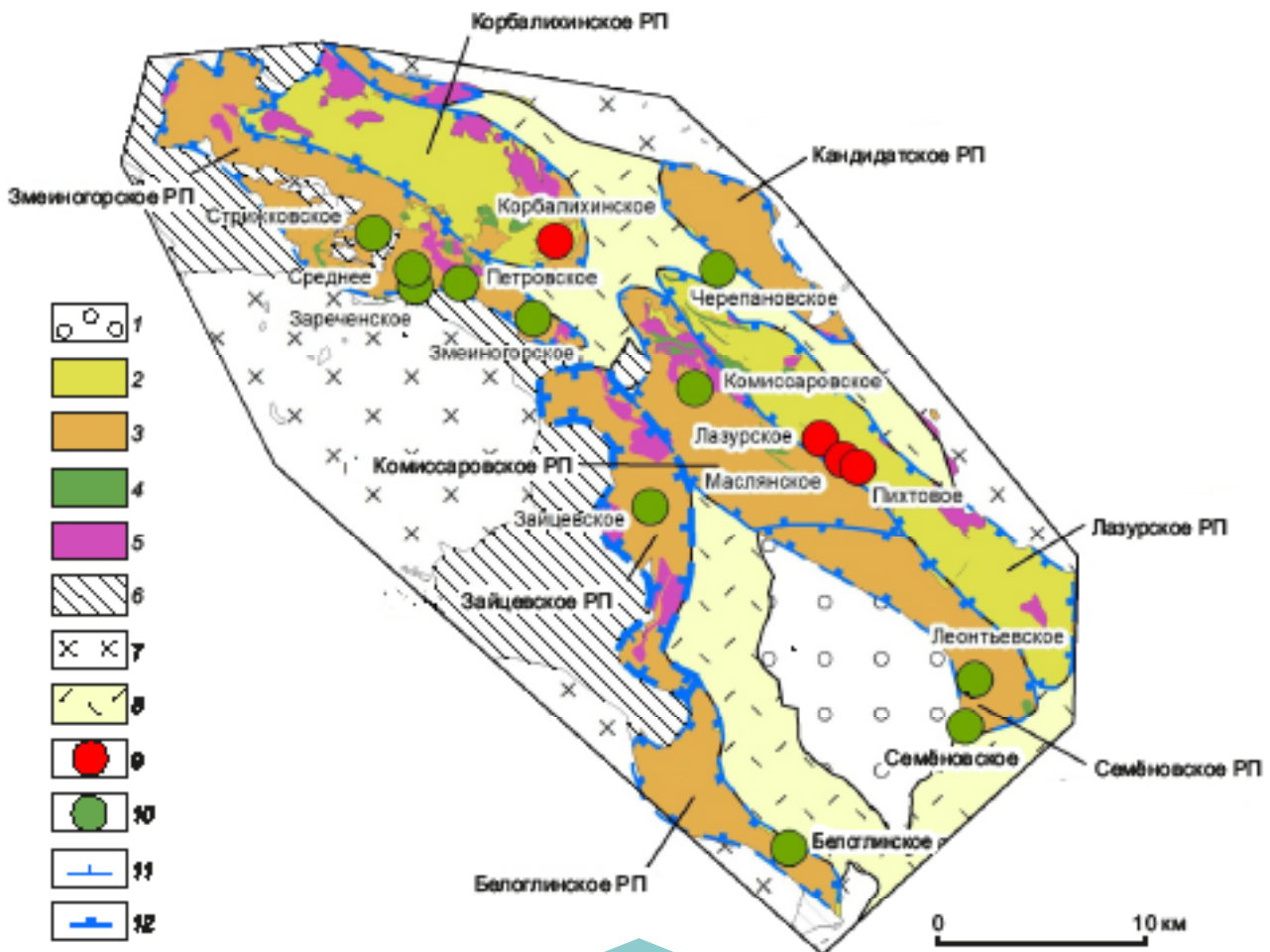


Рис. 1. Схематическая формационная карта центральной части Змеиногорского рудного района:

1–7 – геологические формации: 1 – надрудная без расчленения, 2–3 – рудовмещающие: 2 – базальт-риолитовая кремнисто-терригенная, 3 – базальтсодержащая риолитовая известково-кремнисто-терригенная, 4 – габбро-диабазовая, 5 – риолит-дацитовая субвулканическая, 6 – подрудная известково-терригенная метаморфизованная, 7 – интрузивная габбро-диорит-плагиогранит-гранитовая; 8 – нерасчленённые вулканогенно-терригенные отложения; 9–10 – месторождения и рудопроявления: 9 – медно-свинцово-цинково-колчеданные, 10 – свинцово-цинково-колчеданные; границы: 11 – рудных полей, 12 – Зайцевского рудного поля

рудоносной формации – базальтсодержащей риолитовой известково-кремнисто-терригенной. Последняя имеет трёхчленное строение [4, 5, 7–9]. Разрез сложен следующими пачками (субформациями): нижняя пачка (соответствует мельничной свите) – туфогенно-осадочная (алевролиты, песчаники, туфопесчаники, гравелиты, туффиты, туфы кислого состава, редко лавы риолитов и их ла-

вобрекчии); средняя пачка (сосновская свита) – риолитовая (риолиты и риодациты, их лавобрекчии, туфы кислого состава, реже игнимбриты кислого состава); верхняя пачка (заводская свита) – туфогенно-алевропесчаниковая (алевропесчаники, алевролиты, часто известковистые, кремнистые, песчаники, гравелиты, прослои туфов кислого состава, туффитов).

Большинство разностей пород в разрезе перечисленных пачек неоднократно описано в ряде публикаций [6, 9, 10, 12, 14–16]. Ниже приводится характеристика наиболее значимых разностей рудовмещающих отложений.

В пределах нижней пачки рудные тела и минерализованные зоны приурочены к *кремнистым туффитам*. Это светло-зеленовато-серые однородные породы, сложенные тонким агрегатом кварца, тонкочешуйчатого хлорита, серицита и в переменном количестве мелкого пирокластического материала (кварц, полевые шпаты, хлоритизированное кислое стекло), содержат небольшое количество разложенного (окисленного) калиевого полевого шпата (рис. 4, А).

В пределах средней пачки рудовмещающими являются *витрокластические туфы риолитов и игнимбриты*. *Витрокластические туфы риолитов* –

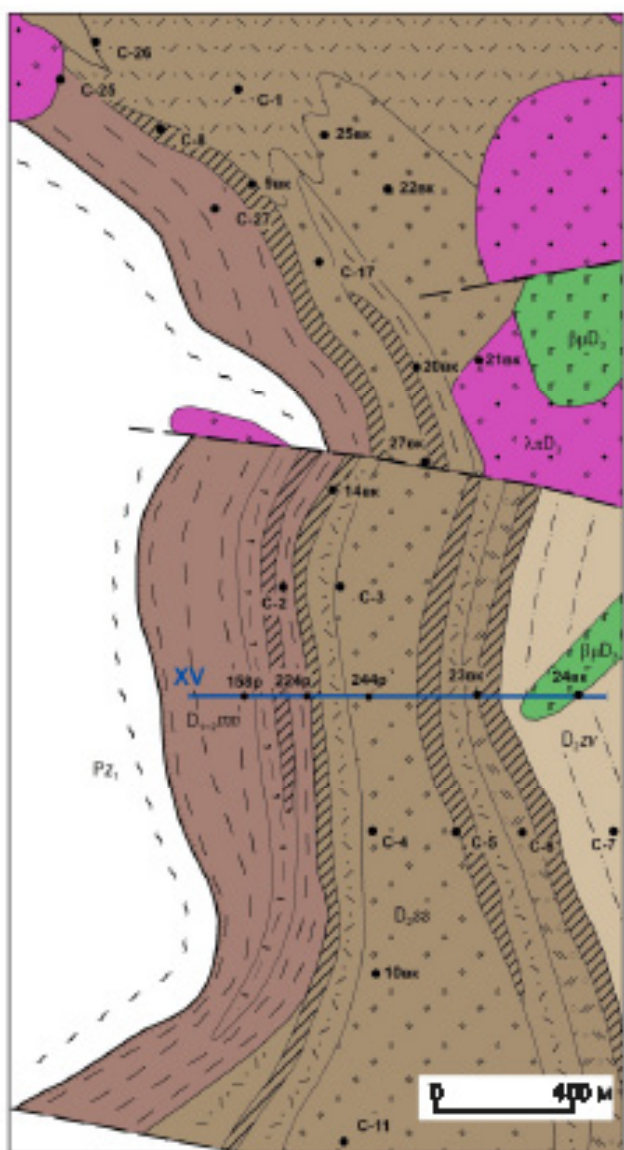


Рис. 2. Схематическая геологическая карта Зайцевской рудной зоны (центральная часть Зайцевского рудного поля):

1–3 – базальтсодержащая риолитовая известково-кремнисто-терригенная формация, свиты: 1 – заводская (верхняя пачка),  $D_{2zv}$ , 2 – сосновская (средняя пачка),  $D_{2ss}$ , 3 – мельничная (нижняя пачка),  $D_{1-2mn}$ ; 4 – нижнепалеозойские отложения,  $Pz_1$ ; 5 – верхнедевонские субвулканические породы основного состава,  $\beta\mu D_3$ ; 6 – верхнедевонские субвулканические породы кислого состава,  $\lambda\mu D_3$ ; 7 – алевропесчаники; 8 – алевролиты, песчаники, туфопесчаники, гравелиты, туффиты; 9 – кремнистые алевролиты; 10 – туфы (туффиты) кислого состава; 11 – риолиты и риодациты, их лавобрекчии, реже игнимбриты кислого состава; 12 – метапесчаники, сланцы кварц-эпидот-хлоритовые, глинисто-хлоритовые, существенно серицитовые, филлитовые (?); 13 – субвулканические габбро, долериты, габбро-долериты; 14 – субвулканические риолиты, риодациты и их автомагматические брекчии; 15 – околорудные метасоматиты: кварц-серицитовые, кварц-серицит-хлоритовые метасоматиты; 16 – рудные зоны; 17 – разрывные нарушения; 18 – скважины; а – на карте, б – на разрезе; 19 – линия разреза

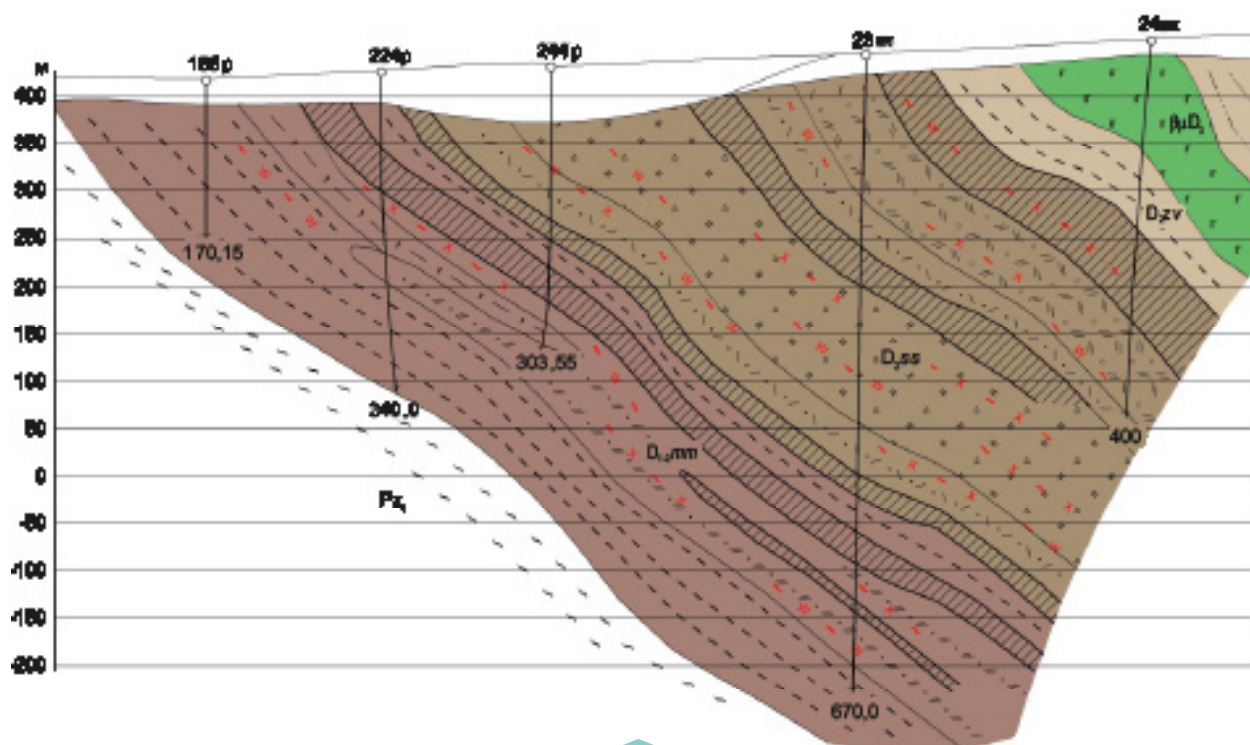


Рис. 3. Геологический разрез через Зайцевскую рудную зону по линии XV:

см. услов. обозн. к рис. 2

это светлоокрашенные породы, плотные, массивные. Содержат подчинённое количество кристаллокластов кварца и полевых шпатов, а также литокластов лав кислого состава. Пепловые частицы выполнены тонким агрегатом кварца и серицита, имеют характерную клиновидную, серповидную, рогульчатую форму (см. рис. 4, Б).

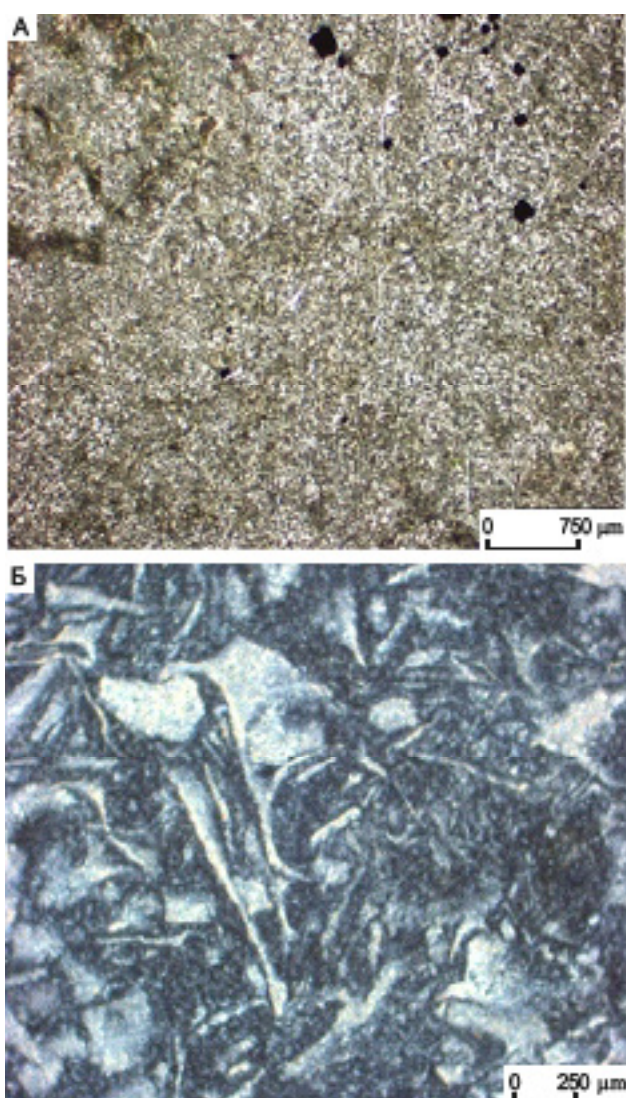
Важное значение в строении разреза пачки имеют *игнимбриты*, которые впервые были выделены в пределах рудного поля. *Игнимбриты* – это кислые вулканиты от светло-зеленовато-серого до тёмно-зелёного цвета. Их характерная особенность – чрезвычайная неоднородность текстур, структур и минерального состава в пределах одного тела (интервала), а также в пределах одного шлифа. От олигофировых риолитов они отличаются присутствием нескольких генераций вкрапленников, присутствием темноцветных минералов, наличием текстур и структур, обусловленных ликвационными процессами (пепловидная, эмульсионная и др.), а также признаками автобрекчирования фенокристаллов и основной массы. Особенностью этих пород является различный характер девитрификации кислого стекла. Так, мы ча-

сто наблюдаем такие микроструктуры стекловатой основной массы, как фельзитовая, сферолитовая, аксиолитовая и др., возникшие в результате изохимической девитрификации. Наряду с этим они тесно сочетаются с участками (фрагментами) стекла разных форм и размеров, нередко с реликтами перлитовой структуры, выполненными хлоритом (в ряде случаев серицитом), образованными в результате аллохимической (аддитивной) девитрификации. Эти породы насыщают весь рудовмещающий разрез, формируют тела разной мощности, содержат прослойки, линзы, обломки осадочных и вулканогенно-осадочных пород [18]. Породы имеют ясную порфириковую структуру, крупные фенокристаллы поздних генераций сложены «бухтообразным» кварцем (рис. 5, А), часто серицитизированным плагиоклазом, слабо пелитизированным калиевым полевым шпатом. Мелкие вкрапленники раннего кварца часто оскольчатой и идиоморфной форм, ранний плагиоклаз призматической и лейстовидной форм, также интенсивно серицитизированы. Вкрапленники биотита хлоритизированы и неравномерно опацитизированы. Основная масса сложена кварц-полевошпатовым агрегатом

в тонком сростании с тонкочешуйчатым хлоритом или реже светлым серицитом (см. рис. 5, Б).

Верхняя пачка является надрудной по отношению к зонам рудной минерализации рудопроявления. В её составе выделяются алевропесчаники, алевролиты, часто известковистые, кремнистые, песчаники, гравелиты, прослой туфов кислого состава, туффитов.

Важное значение имеют субвулканические и экструзивные тела, слагающие палеовулканы, – крупновкрапленные риолиты, автомагматические брекчии риолитов, а также долериты.



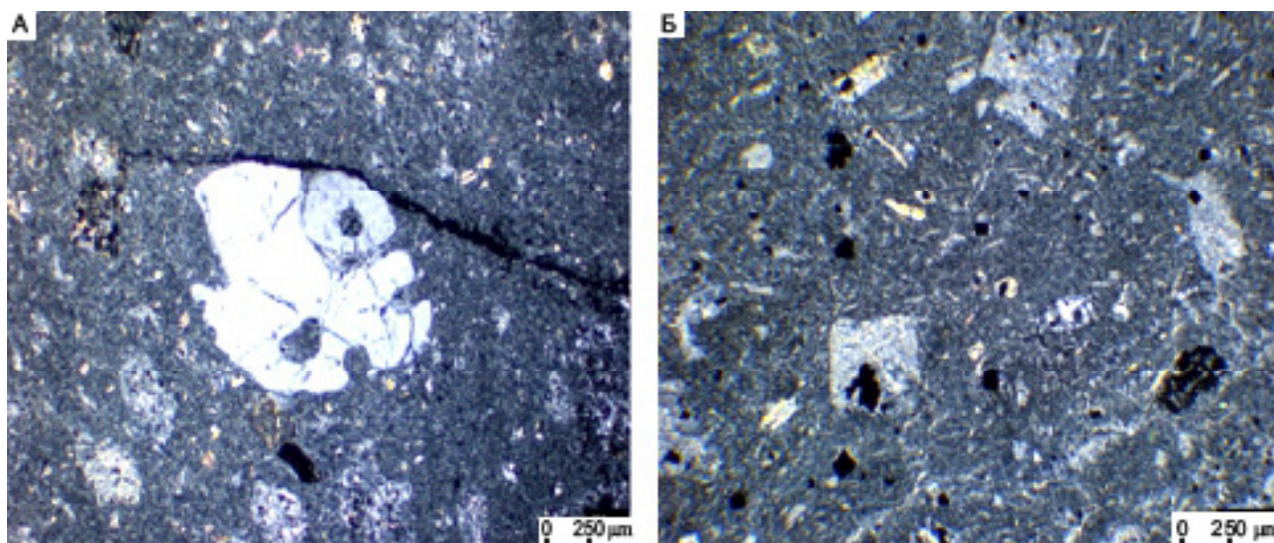
**Рис. 4. Рудовмещающие вулканогенные породы:**

А – кремнистый туффит; Б – витрокластический туф риолитов

**Субвулканические породы кислого состава.** В крупновкрапленных риолитах преобладают крупные вкрапленники (до 5 мм) серицитизированного плагиоклаза, мелкие вкрапленники (до 0,5–1 мм) слабо серицитизированы. Встречаются гломеропорфировые сростки крупных фенокристаллов. Вкрапленники кварца слабо трещиноваты (рис. 6, А). Основная масса метасферолитовая, сложена мелкими округлыми зёрнами кварца, погружёнными в тонкочешуйчатый серицит-хлоритовый цемент. Зёрна полевых шпатов в основной массе слабо серицитизированы. Рудный минерал (магнетит) в виде мелкой вкрапленности приурочен к фенокристаллам серицитизированного плагиоклаза.

*Автомагматические брекчии риолитов* внешне напоминают кристаллокластические туфы или полимиктовые песчаники, состоят из вкрапленников светлоцветных минералов (не менее 30–40 %), большая часть кристаллов имеет правильные кристаллографические ограничения. Частично вкрапленники автобрекчированы, что наиболее отчетливо выражено для раннего кварца (см. рис. 6, Б). Основная масса довольно однородная микрогранолепидобластовая, слабо брекчирована. Для пород характерно обилие гломеропорфировых сростков светлоцветных минералов, в местах их скопления они внешне практически не отличаются от гранитов.

**Субвулканические породы основного состава.** Долериты – породы тёмно-серого, зеленоватого цвета, плотные, мелко-тонкозернистые, порфировой структуры. Вкрапленники выполнены плагиоклазом и клинопироксеном. Последний замещается агрегатом эпидота с тонко распыленным рудным минералом. Вкрапленники клинопироксена замещаются также стильпномелланом, окрашенным в бурый цвет. Минерал обладает очень высоким двупреломлением, при наличии спайности в удлиненных разрезах наблюдается отчетливый плеохроизм. Темноцветный минерал замещается также псевдоморфно хлоритом (центральные зоны кристалла), внешние зоны выполнены эпидотом и цоизитом. Чем меньше размеры кристаллов, тем слабее в них вторичные преобразования. Основная масса имеет офитовую структуру. В интерстициях между кристаллами плагиоклаза располагаются мелкие выделения темноцветного минерала, хлорита и единичные зёрна кварца неправильной формы. Рудный минерал представлен мелкими зёрнами титаномagnetита.

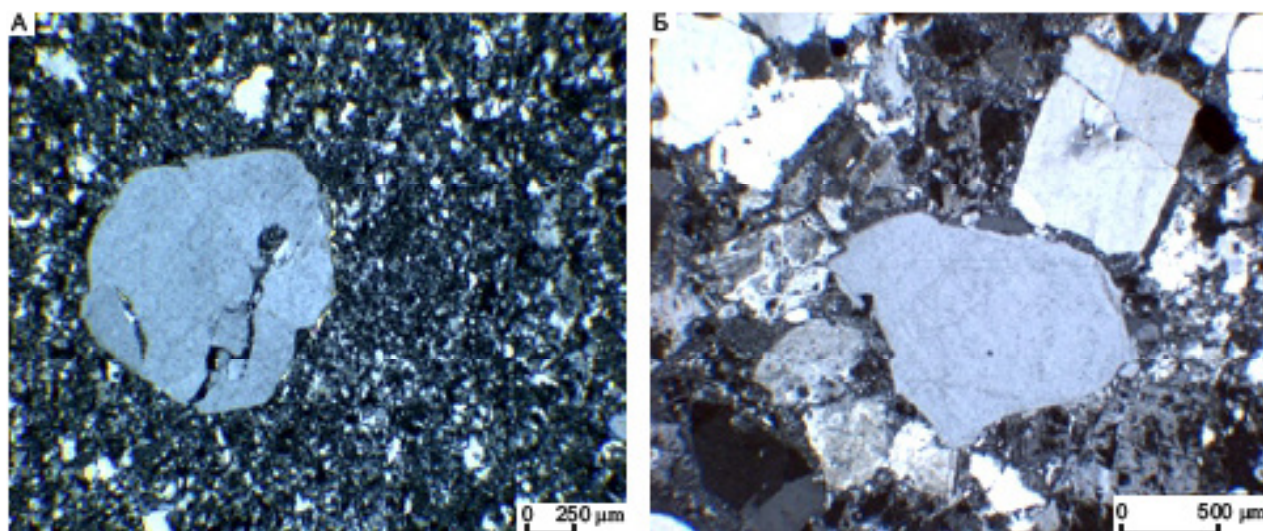


**Рис. 5. Игнимбиты:**

А – вкрапленники «бухтообразного» кварца; Б – вкрапленники серицитизированного плагиоклаза

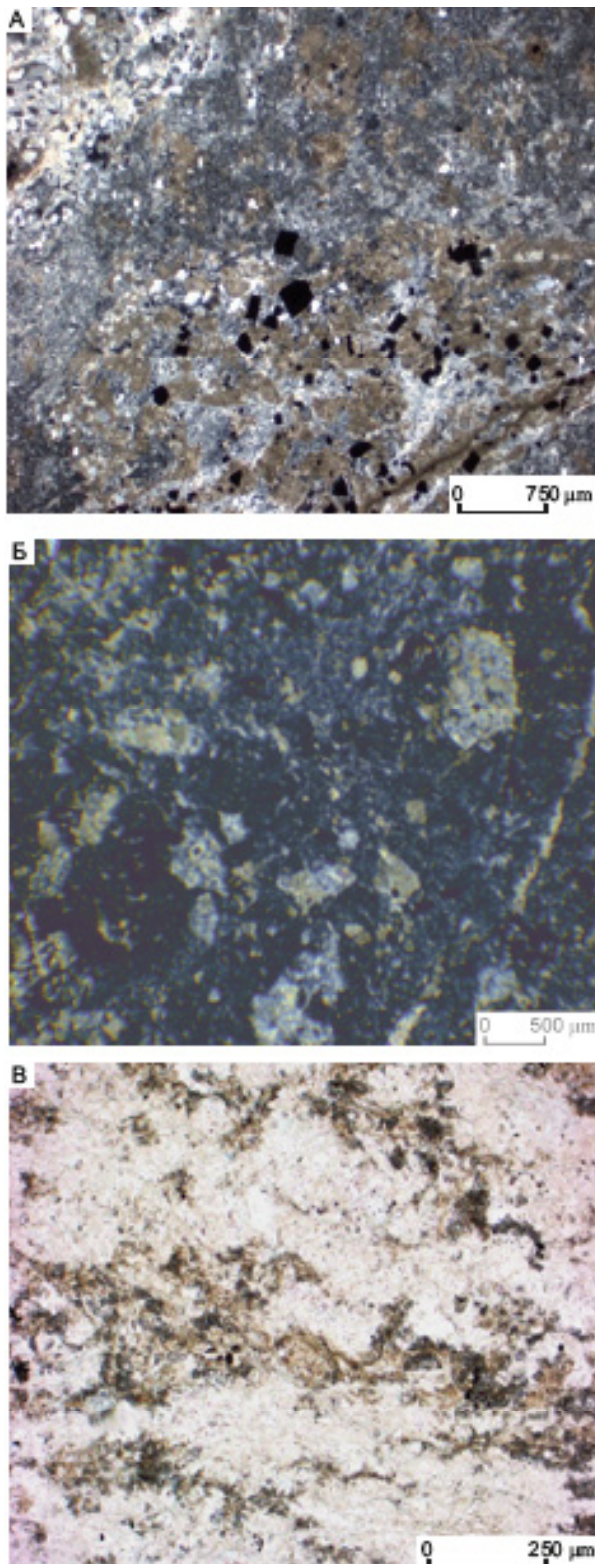
*Гидротермально-метасоматические изменения пород* проявлены неравномерно и наблюдаются в пределах тел игнимбитов, в меньшей мере в основных вулканитах и кремнистых туффитах. Выделяются: серицит-карбонат-хлорит-кварцевые, хлорит-эпидот-карбонатные и серицит-хлорит-кварцевые с кальцитом метасоматиты.

*Серицит-карбонат-хлорит-кварцевые метасоматиты* (по игнимбитам?) сложены кварц-хлоритовым тонкозернистым агрегатом, содержат мелкие зёрна, гнёзда и полосы мелкозернистого железистого кальцита совместно с бластическим кварцем и кубическим пиритом. Почти со всеми выделениями кварц-серицит-карбонатного



**Рис. 6. Субвулканические породы кислого состава:**

А – крупновкрапленный риолит; Б – автомагматическая брекчия риолитов



**Рис. 7. Метасоматиты:**

А – серицит-карбонат-хлорит-кварцевый с пиритом (по игнимбрикам?); Б – хлорит-эпидот-карбонатный (по базальтам); В – серицит-хлорит-кварцевый с кальцитом (по кремнистым туффитам?)

и кварц-карбонатного составов ассоциирует кубический пирит (рис. 7, А). Имеются также тонкие волнистые полосы мелкозернистого железистого кальцита, расположенные субпараллельно и кулисообразно.

В *хлорит-эпидот-карбонатных метасоматитах* по базальтам вкрапленники плагиоклаза карбонатизированы и в меньшей степени эпидотизированы. Темноцветный минерал эпидотизирован и опацифицирован. Основная масса реликтовая интерсертальная и гиалопилитовая (см. рис. 7, Б). В интерстициях между лейстами плагиоклаза располагаются зёрна эпидота. Рудный минерал представлен немногочисленными скелетными кристаллами титаномагнетита и неправильными выделениями окисленного магнетита.

*Серицит-хлорит-кварцевые с кальцитом метасоматиты* (по кремнистым туффитам?) (см. рис. 7, В) не содержат признаков первичных структур, светло-серые, почти белые, сложены плотным кварцитовидным довольно однородным агрегатом. Волнистая тонкая слоистость (?) проявлена в виде субпараллельных полосок окисленного рудного минерала. Вторичные минералы (серицит и хлорит) образуют тонкие ветвящиеся прожилки и мелкие включения. Отмечаются сквозные прожилки мелкозернистого кальцита и кварца.

Вулканогенные породы в пределах рудного поля характеризуются преобладанием пород кислого состава и незначительным (не более 5 %) содержанием пород основного состава, имеют калиевый профиль. Последнее свидетельствует о том, что продукты кислого вулканизма имеют коровое происхождение.

Осадочные породы согласно модулю Fe / Mn, равному 26,5, относятся к глубоководной фации. Индикатор Ti / Zr равен 26. Его повышенное значение характеризуют пелагические глины и особенно карбонаты, что непосредственно связано с ведущей ролью примеси разрушающихся базитов при образовании терригенной составляющей океанических осадков [17].

Как уже отмечалось выше, в пределах Зайцевского рудопоявления выявлены *Зайцевская и Рязановская рудные зоны*, относящиеся к типу VMS. *Зайцевская рудная зона* приурочена к метасоматически изменённым отложениям нижней и средней пачек девонского разреза. По вещественному составу руды медно-свинцово-цинковые (средние содержания: Cu – 0,42 %, Pb – 1,86 %, Zn – 2,20 %, Ag – 6,12 г/т). Отношение Cu : Pb : Zn в среднем составляют 0,2 : 1,0 : 1,2.

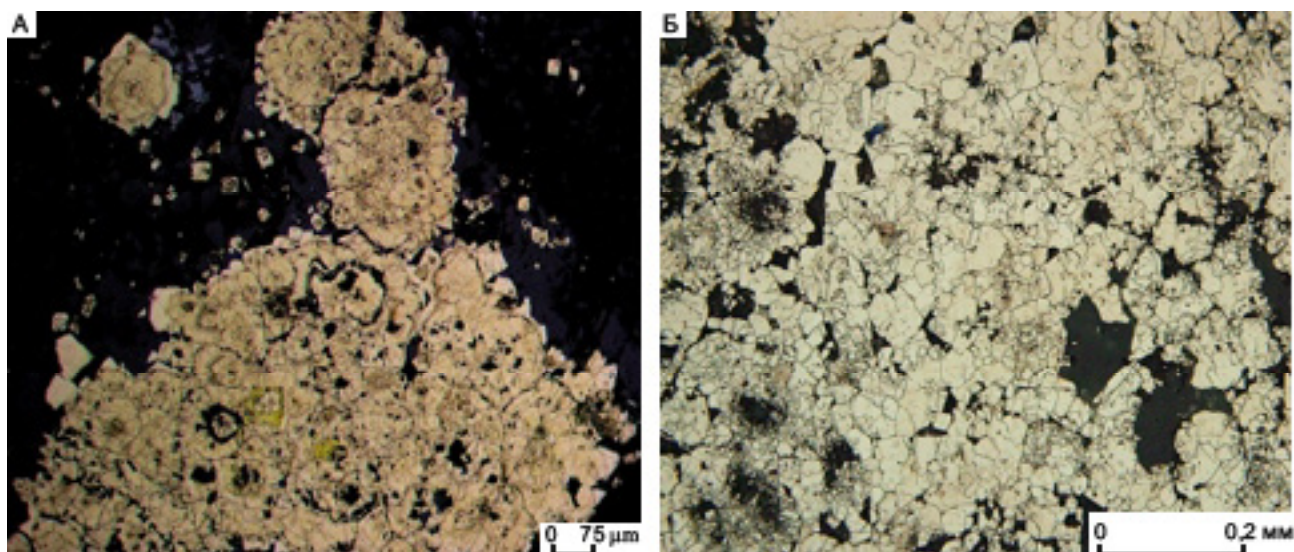


Рис. 8. Морфология выделения пирита:

А – пирит почковидного строения; Б – пирит гранобластовой структуры с реликтами почковидного строения; протравлено концентрированной азотной кислотой

Рязановская рудная зона приурочена к метасоматически изменённым отложениям средней пачки девонского разреза. Руды преимущественно свинцово-цинковые колчедансодержащие (средние содержания (в %): Cu – 0,20, Pb – 1,87, Zn – 4,52).

Крутопадающие минерализованные зоны представлены чередованием линзообразных и пластообразных тел. Выделены следующие минеральные типы руд: колчеданно-полиметаллические, колчеданные, медноколчеданные и колчеданно-медноцинковые. По текстурным особенностям руды вкрапленные и прожилково-вкрапленные (колчеданно-полиметаллические и колчеданно-медноцинковые); брекчиевые (медно-колчеданные (пирит-халькопиритовые) и сфалеритовые)); массивные (колчеданно-полиметаллические с пониженной колчеданной составляющей, колчеданно-медноцинковые и барит-полиметаллические). Все названные минеральные типы руд приурочены к зонам хлоритизации и окварцевания вмещающих пород.

Главные рудные минералы – пирит, сфалерит, галенит и халькопирит – представлены в различных соотношениях в рудах; редкие – вуртцит, блёклые руды, марказит и халькозин; *единичные* – гёссит, тетрадимит.

Вкрапленные и прожилково-вкрапленные руды имеют колчеданно-полиметаллический и колче-

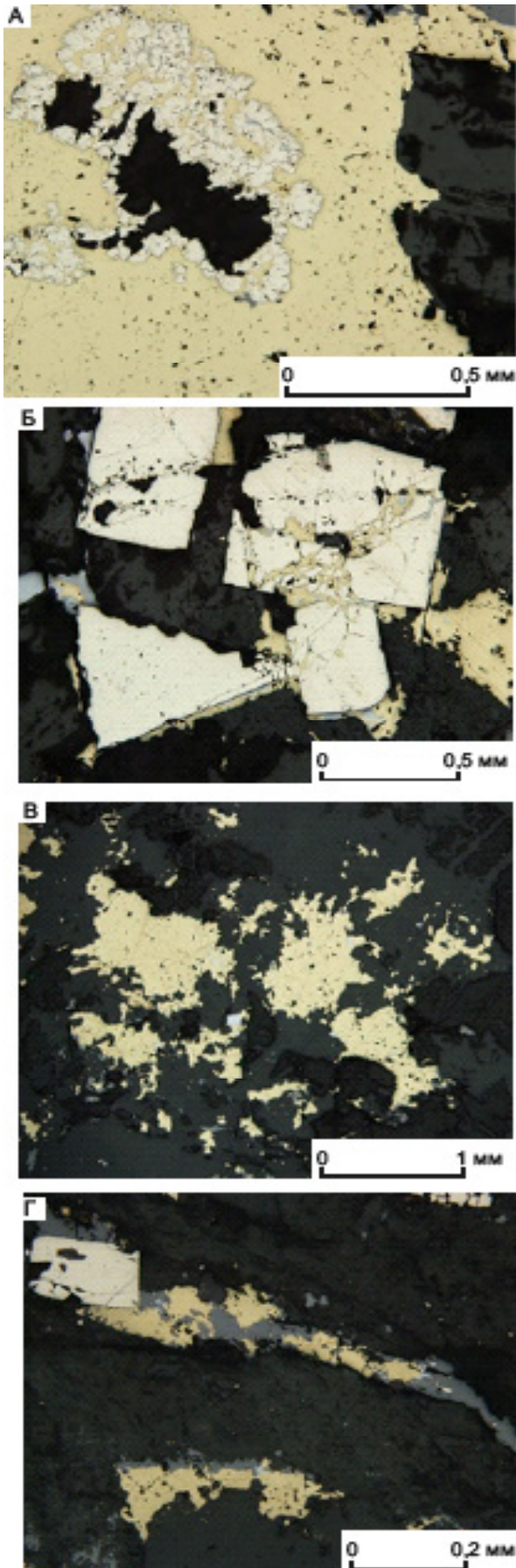
данно-медно-цинковый составы. Важную роль в понимании генезиса руд играет пирит, представленный несколькими разновидностями [11].

К первой разновидности относятся небольшие скопления пирита почковидного облика. Почка частично раскристаллизована, а в их интерстициях развиваются галенит и халькопирит. С помощью структурного травления было определено колломорфное строение почковидного пирита (рис. 8, А). В рудах присутствует глобулярный пирит в ассоциации с колломорфным. Также при диагностическом травлении раннего пирита в ряде случаев выявлена гранобластовая структура (см. рис. 8, Б).

Вторая разновидность пирита концентрируется вокруг крупных пустотелых каверн в сульфидах, преимущественно в халькопирите. Пирит обычно представлен тонко-мелкозернистым агрегатом аллотриоморфных или гипидиоморфных зёрен (рис. 9, А). Третья разновидность пирита представлена вкрапленниками гипидиоморфных зёрен размером 0,05–0,8 мм. Зёрна пирита катаклазированы, по трещинам, в интерстициях и в качестве оторочек его зёрен развиваются халькопирит (см. рис. 9, Б), галенит, сфалерит.

В зонах пиритовой минерализации концентрация серебра достигает 1,5 г/т, золота – 0,2 г/т, иногда





**Рис. 9. Морфология выделения пирита, халькопирита и сфалерита:**

А – аллотриоморфные скопления пирита в халькопирите; Б – халькопирит развивается по трещинам в пирите; В – выделения халькопирита в интерстициях кальцита; Г – тонкие прожилки сульфидов (сфалерита и халькопирита) в маломощных зонах дробления

повышены содержания мышьяка, теллура, селена, кадмия и висмута.

*Сфалерит* представляет собой насыщенные эмульсионной вкрапленностью сплошные выделения, которые интенсивно катаклазированы. Вдоль границ крупных выделений развиваются каёмки невыдержанной мощности сфалерита второй генерации. Этот сфалерит характеризуется отсутствием эмульсионной вкрапленности и трещин, интенсивно корродирует и замещает пирит. Этот же сфалерит присутствует в халькопирите в виде многочисленных тонких звёздчатых частиц.

Халькопирит встречается как в единых агрегатах со сфалеритом, пиритом и галенитом, так и в виде самостоятельных выделений. Чаще всего он образует крупные, достигающие нескольких сантиметров сплошные выделения с неровными ветвящимися границами. Выделения содержат заплывшие трещины, халькопирит корродирован хлоритом, что свидетельствует о его образовании близкоодновременно с ранними сульфидами. Кроме того, в рудах присутствуют тонкие агрегаты халькопирита с кальцитом или хлоритом. Это ксеноморфные выделения, развивающиеся в интерстициях нерудных минералов (см. рис. 9, В). Характерны эмульсионная вкрапленность халькопирита в сфалерите, различной густоты и размеров, заполнение трещин и каймы в пирите и сфалерите, цементация пирита. Вместе с кальцитом халькопирит образует зональные оторочки вокруг выделений сфалерита.

*Вюртцит* присутствует в виде вrostков в крупных сфалеритовых скоплениях, а также развивается вдоль трещин в сфалерите.

В маломощных зонах дробления и смятия встречаются тонкие прожилки сульфидов, среди которых резко преобладают сфалерит и халькопирит (см. рис. 9, Г).

*Галенит* ранней генерации в очень небольшом количестве наблюдается в ассоциации с колломорфным пиритом и локализуется в пределах зональных

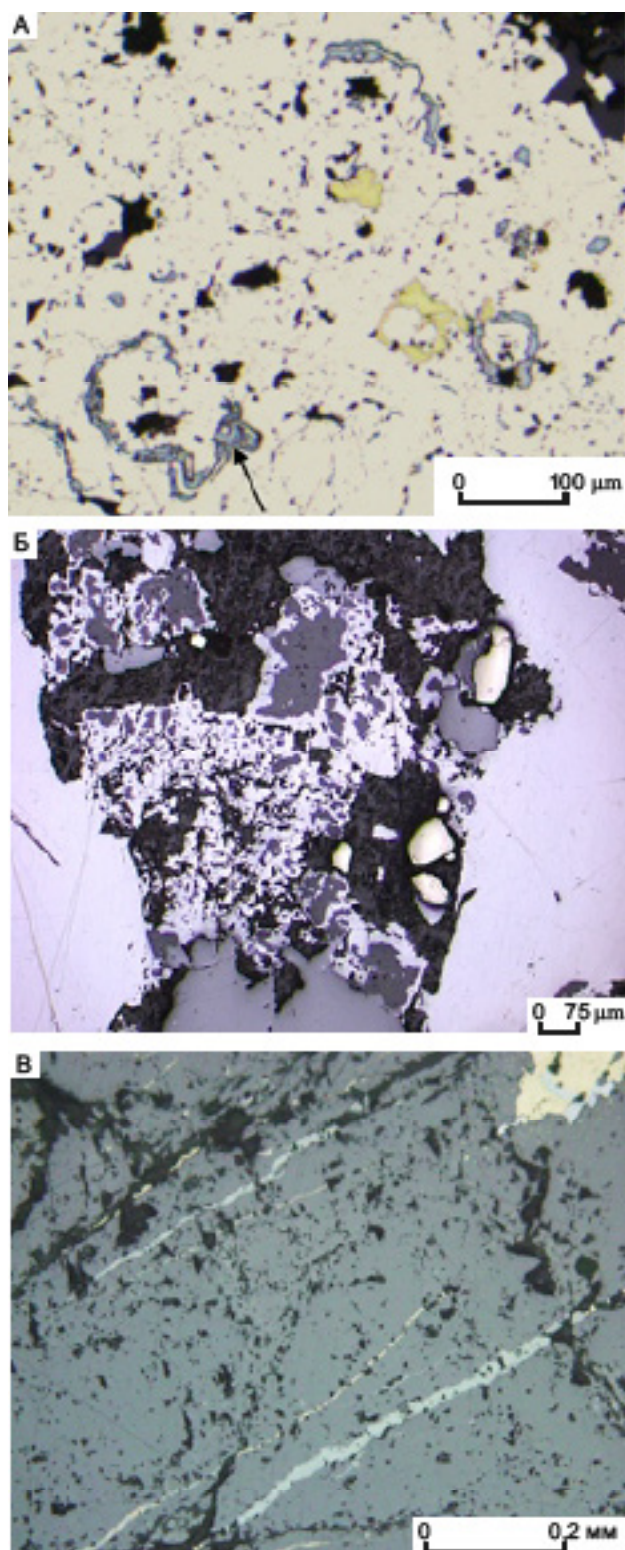


Рис. 10. Морфология выделения галенита и блёклой руды:

А – петельчатые и сплошные выделения галенита; Б – галенит (показан стрелкой) маркирует почки пирита; В – трещины в сфалерите выполнены блёклыми рудами

почек сложного состава (рис. 10, А). Как правило, в рудах распространён галенит более поздней генерации. Для него характерен петельчатый облик (см. рис. 10, Б) или сплошные выделения. Этот галенит корродирует и замещает другие сульфиды, развивается по трещинам, в ряде случаев образует тесные сращения с хлоритом.

*Марказит* встречается в составе зональных марказит-пиритовых вкрапленников, в которых центральная зона сложена марказитом, а периферическая пиритом. Размер таких выделений составляет 0,2–0,4 мм.

*Блёклая руда* залечивает вытянутые параллельные трещины в массивных выделениях сфалерита (см. рис. 10, В).

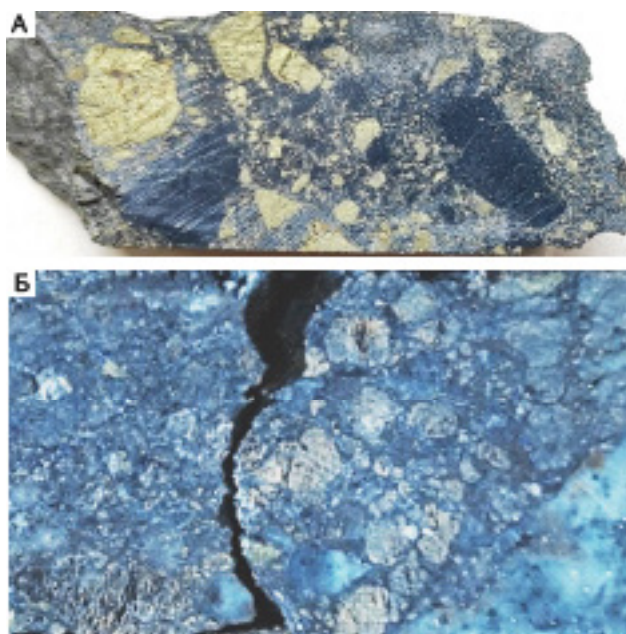
В интервалах развития полиметаллической минерализации повышено содержание серебра до 42 г/т, в рудах постоянно присутствует кадмий, в переменном количестве содержатся селен, теллур и висмут. С блёклыми рудами коррелирует повышение содержаний мышьяка и сурьмы в рудах.

В пределах рудных тел вскрыты *брекчиевые руды* как пирит-халькопиритовые (медноколчеданные), так и сложенные преимущественно сфалеритом.

*Пирит-халькопиритовые (медноколчеданные)* рудные брекчии состоят из крупных обломков руды и интенсивно серицитизированных пород (рис. 11, А). По своим характеристикам породы отвечают лавобрекчиям. В породах сохранены вкрапленники кварца и серицитизированного полевого шпата, что свидетельствует о кислом составе лавы. Цемент изменённый, серицит-хлоритового состава, при преобладании хлорита. В нём присутствуют мелкие обломки кварца и рудных минералов.

Обломки сульфидов в брекчии размером от нескольких миллиметров до 2 см. Встречаются угловатые и окатанные разности. Крупные обломки катаклазированы.

*Сфалеритовые брекчиевые и массивно-брекчиевые руды*: брекчии с обломками сфалерита (см. рис. 11, Б) образуют прослои среди вмещающих пород. Мощность прослоев достигает 50 см, массивно-брекчиевых руд – до 20 см. В отдельных случаях количество обломков сфалерита достигает 95 %. Единичные обломки представлены алевrolитами. Сортировка и окатанность материала различная. В верхней части некоторых прослоев (ближе к подошве рудного тела) наблюдались своеобразные «карманы», заполненные окатанными обломками размером 5–10 мм вместе с тонким материалом в цементе. На контакте с ними наблюдаются крупные угловатые обломки.



**Рис. 11. Брекчиевые руды:**

А – пирит-халькопиритовые (медно-колчеданные), натуральная величина; Б – сфалеритовые, натуральная величина

Массивно-брекчиевые руды слагают прослои в средней части рудного тела, обломки угловатые, размером до 3 см. Снизу вверх по вертикали в брекчиях значительно увеличивается количество мелкого кластического материала, представленного тем же сфалеритом.

В целом по расположению и крупности обломков в брекчиях намечается неясно выраженная слоистость. Для сульфидных обломков этих брекчий, как уже было отмечено, характерен очень однородный состав – обломки представлены сфалеритом.

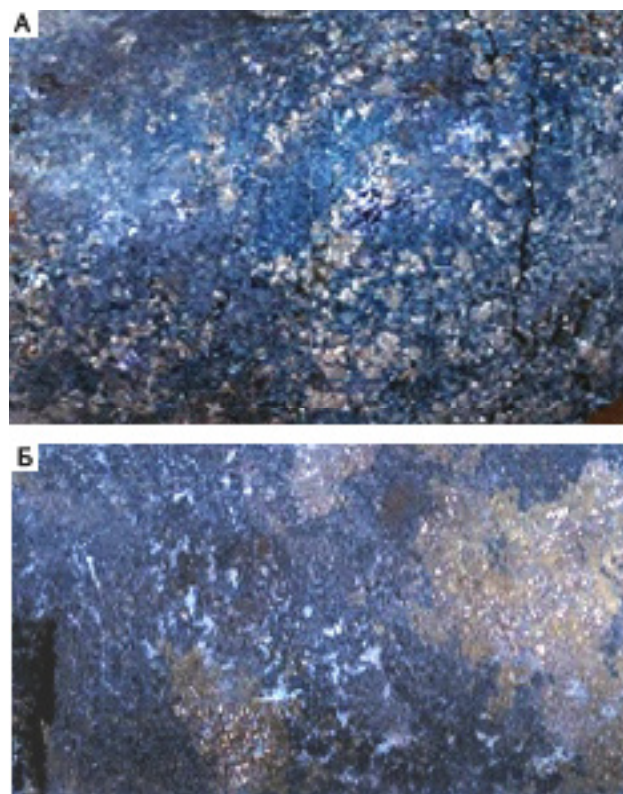
*Сфалерит* из обломков имеет массивный облик. Эмульсионная вкрапленность встречается эпизодически, преобладают разности без «халькопиритовой болезни». Со сфалеритом ассоциирует небольшое количество пирита, галенита и халькопирита, которые развиваются по трещинам и ослабленным зонам.

Цемент брекчий замещён кварц-серицит-хлорит-сфалеритовым агрегатом, иногда присутствует карбонат. Сфалерит из цемента представлен мелкозернистой разностью и находится в тонком прорастании с минералами метасоматитов, вместе

с которыми развивается по цементу брекчий, почти нацело замещая его. Сфалерит из обломков, пирит и галенит корродированы этим агрегатом. В некоторых случаях сфалерит из цемента образует каёмки вокруг сфалерита обломков или галенита.

Среди *массивных руд* выделяются колчеданно-медно-свинцово-цинковые (рис. 12, А) и колчеданно-медно-цинковые сливные или массивно-полосчатые руды. По внешнему облику они представляют собой серую мелкозернистую массу галенита, в которой прослеживаются невыдержанные полосы халькопирит-пиритового состава мощностью до 2 см (см. рис. 12, Б).

С помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ TESKAN MIRA) в рудах Зайцевского рудопоя установлены минералы серебра, теллура, висмута, представленные гесситом и тетрадимитом (рис. 13), выделения которых



**Рис. 12. Массивные руды:**

А – колчеданно-медно-свинцово-цинковые; Б – колчеданно-медно-цинковые, натуральная величина

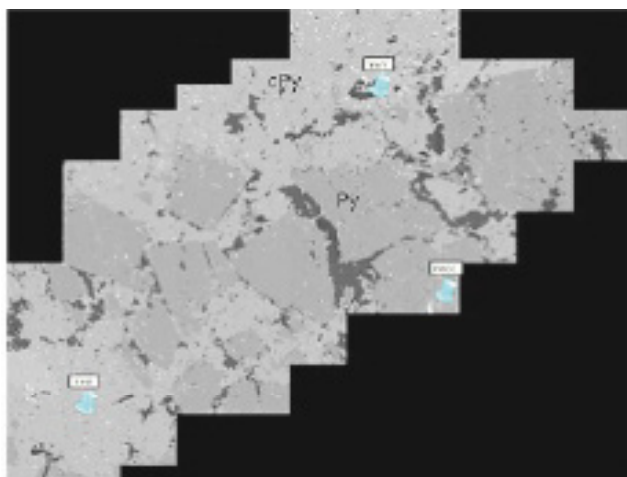


Рис. 13. Точки наблюдения гессита и тетрадимита

локализуются в пределах халькопирита и сфалерита. Химический состав минералов приведён в таблице.

Агрегат гессита ( $\text{Ag}_2\text{Te}$ ) и галенита развивается в интерстициях халькопирита (рис. 14, А). Данные выделения тяготеют к участкам скопления пирита. Тетрадимит ( $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{S}$ ) присутствует в виде включений разрозненных вытянутых табличек в халькопирите и сфалерите (см. рис. 14, Б). Установлено, что тетрадимит представлен разностью с повышенным содержанием селена. Размер выделений до 0,03 мм.

**Обсуждение полученных результатов.** Основная масса сульфидов в стратиформных рудных телах Зайцевого рудопроявления образована на раннем этапе в результате придонного переотложения. В подчинённом количестве присутствуют сульфиды, образованные гидротермально-осадочным путём и под воздействием новых порций гидротермальных растворов. Обособленно от основных рудных тел распространена минерализация штокверковых зон подводящих каналов. Стратиформные залежи и штокверковые рудные тела зон подводящих каналов претерпели контактовый метаморфизм, в результате чего первичные сульфиды были перекристаллизованы. Эволюция руд в целом отвечает схеме, предложенной Г. В. Ручкиным [13], однако стадия мобилизации в основном проявлена в виде перераспределения минерального вещества в пределах минеральных агрегатов и локальным переотложением близ первичных выделений сульфидов.

Таблица. Химический состав редких минералов руд Зайцевого рудопроявления, мас.%

Spectrum	S	Fe	Zn	Se	Ag	Te	Bi
Гессит					66,90	33,10	
Гессит					66,98	33,02	
Тетрадимит	5,22			1,22		33,56	60,00
Тетрадимит	4,30			1,33		33,73	60,64

Среди первичных сульфидов *гидротермально-осадочных руд* можно выделить несколько групп. К первой относятся сульфиды, образованные гидротермально-осадочным путём, в которых обнаружены реликты колломорфных сульфидных почек и глобулярного пирита. Как правило, это ассоциации с повышенной колчеданной составляющей, их концентрация чаще всего прослеживается в висячем боку рудных тел. В разной степени сохранившиеся реликты почек были установлены в пределах пиритового и галенит-сфалерит-пиритового минеральных типов руд.

Наиболее распространён *пирит*, представленный колломорфными концентрически-зональными скоплениями минерала почковидного облика, размер отдельных разностей составляет до 0,25 мм. Встречаются сложные по составу почки с чередованием пиритовых и галенитовых зон, эпизодически присутствует халькопирит. В центре некоторых зональных почек встречаются округлые образования в виде глобулей пирита, их размер не превышает 0,01 мм, составляя обычно тысячные доли миллиметра. Предварительные данные по изотопному составу пирита, содержащего глобулярный пирит в ядре почек, показали отрицательные значения изотопного состава серы пирита (-3,4 ‰), что является аномальным по сравнению с другими типами руд (+0,1...+3,0 ‰) и свидетельствует в пользу влияния биогенного фактора на изотопный состав серы при образовании глобулярного пирита [1]. Сфалерит описываемой ассоциации представлен изометричными комковидными выделениями, нередко интенсивно катклазирован. В некоторых зёрнах по расположению эмульсионной вкрапленности халькопирита можно проследить зональный рост первичного сфалерита. Галенит данной ассоциации наблюдается в подчинённом количестве, локализуясь в зональных почках.

Породообразующие минералы вмещающих слоистых вулканогенно-осадочных пород и сульфиды описываемой ассоциации не обнаруживают секущих или коррозионных взаимоотношений, в то же время отмечается чёткая коррозия мине-

ралов ассоциации образованиями более поздних парагенезисов, а также пересечение пирита колломорфного строения хлоритом и кварц-серичитовыми агрегатами.

Кластические разности сульфидов на северном фланге Зайцевского рудопоявления представлены рудными брекчиями с обломками пирита в вулканитах кислого состава (лавобрекчиях риолитов). В процессе диагенеза часть обломков пирита была псевдоморфно замещена халькопиритом.

На юго-восточном фланге рудопоявления угловатые и полуокатанные сульфидные обломки практически исключительно представлены сфалеритом. Этим брекчиям свойственно сочетание окатанных и угловатых обломков, в крупных угловатых обломках наблюдаются текстуры отрыва, характерные для брекчий обрушения, в некоторых интервалах намечается слабовыраженная слоистость.

Распространение рудных брекчий с текстурами, характерными для брекчий обрушения, свидетельствует о существовании на поверхности морского дна гидротермальной сульфидной постройки [1]. Такая постройка в виде рудного холма со шлейфом брекчиевых руд отчётливо выделяется в пределах Рязановской рудной зоны (рис. 15). Размер рудного холма составляет  $120 \times 50$  м, что хорошо согласуется с данными по современным и древним курильщикам (J. M. Franklin [20] и A. G. Galley [21], H. U. Schmincke [24]).

В пределах Зайцевской рудной зоны холмообразная форма рудной залежи достоверно неизвестна, однако отмечаются шлейфы рудных брекчий обрушения. Данный факт косвенно свидетельствует в пользу наличия древнего курильщика небольшого размера и полностью разрушенного.

Наряду с древними курильщиками в пределах рудного поля рудные залежи, сформированные гидротермально-осадочным путём, подчинены литологическому контролю. Придонные депрессии служат локальными бассейнами для осаждения (химически и механически) сульфидов. Сульфиды в большинстве случаев накапливаются в депрессиях в результате воздействия флюидов, представленных высокоминерализованными морскими водами, обогащёнными металлами (R. R. Large [22], T. L. Smith [25]). В придонных депрессиях также локализуются кластические сульфиды, которые образовались при разрушении богатыми сульфидными подводными каналами, холмов и других построек.

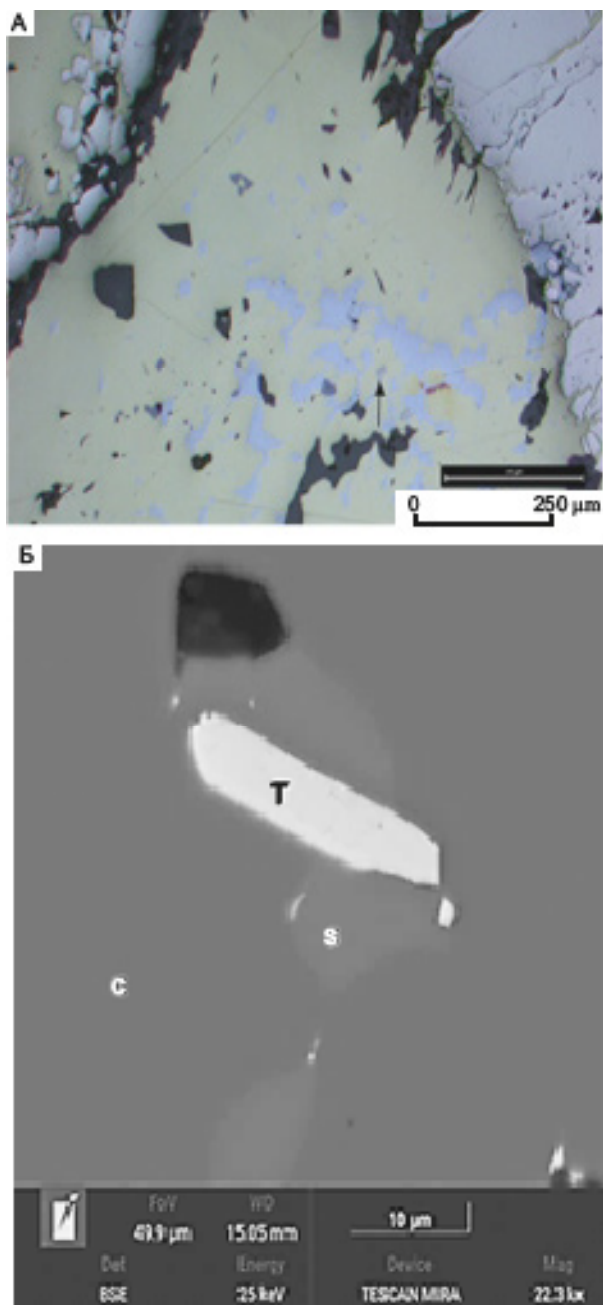


Рис. 14. Морфология выделения гессита и тетрадимита:

А – агрегат галенита (голубой) с гесситом (показан стрелкой) в халькопирите; Б – тетрадимит (Т) со сфалеритом (S) в халькопирите (С)

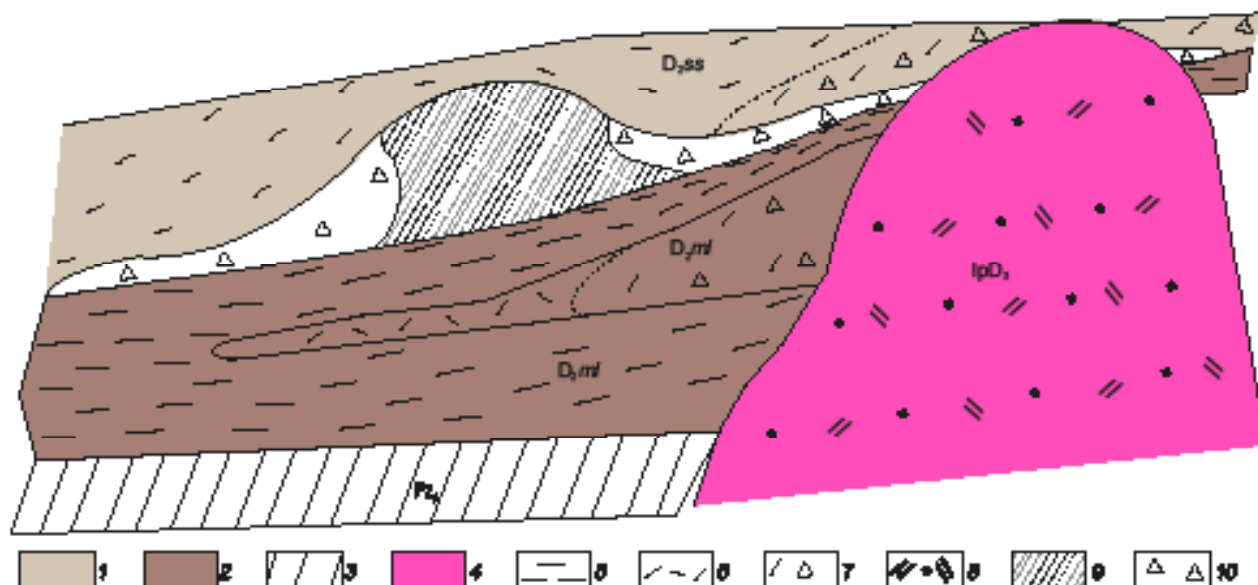


Рис. 15. Палеорекострукция рудного холма в пределах Рязановской рудной зоны:

1–2 – базальтсодержащая риолитовая известково-кремнисто-терригенная формация: 1 – сосновская свита (средняя пачка),  $D_{2,ss}$ , 2 – мельничная свита (нижняя пачка),  $D_{2,ml}$ ; 3 – нижнепалеозойские отложения,  $Pz_1$ ; 4 – верхнедевонские субвулканические породы кислого состава,  $IpD_3$ ; 5 – алевролиты, песчаники, туфопесчаники, гравелиты, туффиты, кремнистые алевролиты; 6 – риолиты и риодациты кислого состава; 7 – лавобрекчии, туфы (туффиты), реже игнимбриты кислого состава; 8 – субвулканические риолиты, риодациты и их автомагматические брекчии; 9–10 – рудные зоны: 9 – прожилково-вкрапленные, вкрапленные, реже массивные руды, 10 – брекчиевые руды

Путём придонного переотложения образуются сульфиды, которые развиваются по цементу сфалеритовых брекчий вместе с агрегатом кварца и хлоритом со сфалеритом второй генерации. Подобная минерализация наблюдается в цементе гравелитов с обломками, представленными почти исключительно алевролитами, в небольшом количестве обломками кварца. Особенностью этих образований является наличие значительно переработанного цемента и практически незатронутого обломочного материала, в том числе и мелкого. По мнению авторов, сульфиды цемента и массивные сульфидные залежи образовались путём замещения слабо литифицированного осадка и выполнения полостей в результате придонного переотложения, предложенного S. J. Piercey [23] (рис. 16), или при разгрузке без выхода на поверхность морского дна следующих порций гидротермальных растворов. Породообразующие минералы вмещающих слоистых вулканогенно-осадочных пород и сульфиды описываемой ассоциации не обнаруживают секущих или коррозионных взаимоотношений, в то же время отмечается чёт-

кая коррозия минералов ассоциации образованиями более поздних парагенезисов, а также пересечение пирита колломорфного строения хлоритом и кварц-серицитовыми агрегатами.

Согласно данным S. J. Piercey [23], первичная пористость и проницаемость осадочных, вулканогенно-осадочных и вулканогенных пород способствует проникновению морской воды в эти отложения, в результате чего образуется сульфидная минерализация. Сульфаты морской воды частично восстанавливаются до  $H_2S$  сульфатредуцирующими бактериями, в результате чего образуется обстановка, в которой преобладают осадочные и вулканические частицы с обильной относительной низкой температурой ( $< 25\text{ }^\circ\text{C}$ ) поровой водой и пониженной серой. Кроме того, образующийся из бактерий  $H_2S$  образует фрамбоидальный пирит, вступая в реакцию с железом, содержащимся в вулканогенных и осадочных отложениях.

Приток гидротермальной жидкости приводит к смешиванию апвеллинговых гидротермальных флюидов, поровой воды и  $H_2S$ . Смешивание с поровой водой приводит к осаждению сульфидов

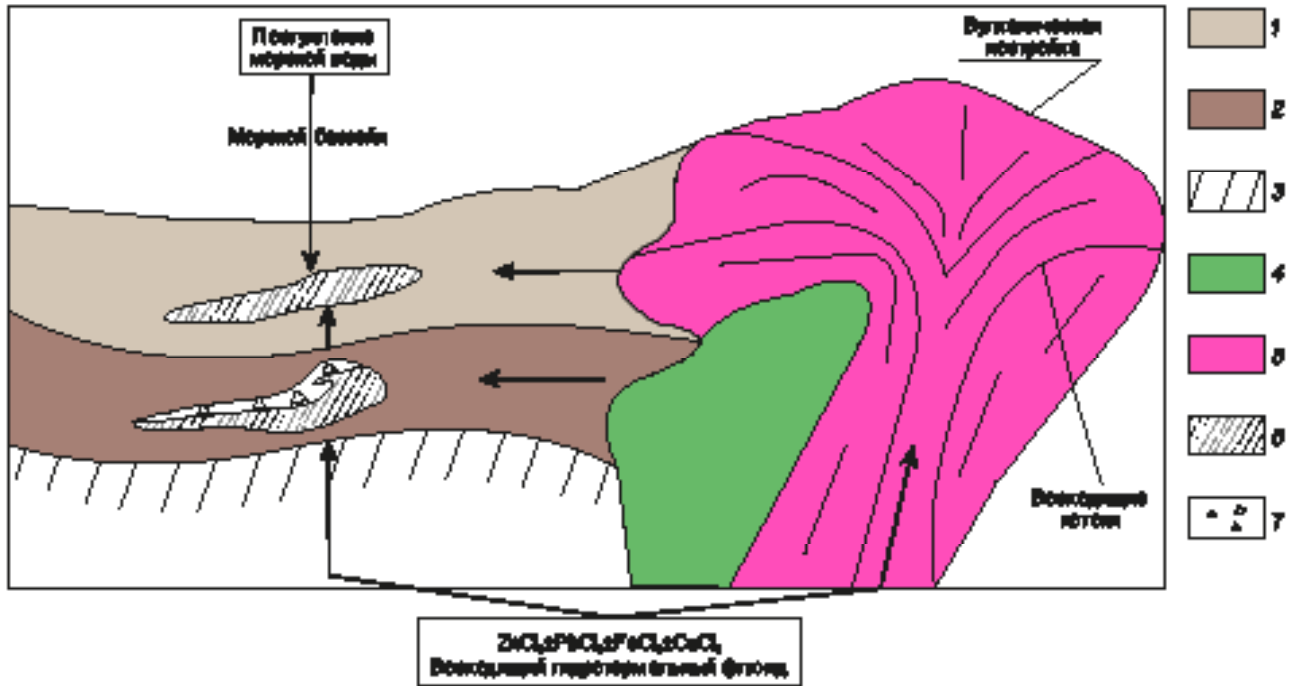


Рис. 16. Модель формирования оруденения Зайцевого рудопоявления путём придонного переотложения. Использованы материалы S. J. Piercey [23]:

1–2 – базальтсодержащая риолитовая известково-кремнисто-терригенная формация: 1 – вулканогенные отложения сосновской свиты (средняя пачка), 2 – осадочные отложения мельничной свиты (нижняя пачка); 3 – нижнепалеозойские отложения; 4 – верхнедевонские субвулканические породы основного состава; 5 – верхнедевонские субвулканические породы кислого состава; 6–7 – рудные зоны: 6 – прожилково-вкрапленные, вкрапленные, реже массивные руды, 7 – брекчиевые руды

из-за охлаждения, а дополнительное количество сульфидного материала осаждается в результате реакции с  $H_2S$ . Кроме того, существующий фрамбоидальный пирит образует ядра, которые новые сульфиды могут либо заменить, либо образовать большие кристаллы вокруг уже существующего ядра. Этот придонный процесс был частично или полностью связан с вышележащей морской водой (например, с частично проницаемой средой), а процесс переотложения совпал и сменился «зональной очисткой» и сменой на более низкие температуры. Ранее сформированные Zn-Pb-Fe ассоциации были более высокотемпературными и обогащены медью, данный фактор приводит к тому, что на Зайцевском рудопоявлении отмечается зональность.

Минерализация штокверковых зон подводющих каналов представлена тонкими секущими прожилками и вкрапленностью тех же основных сульфидов с преобладанием пирита и халькопирита.

В результате метаморфизма на стадии перекристаллизации происходит образование гранобластовых агрегатов пирита, часто с реликтовой зональностью. Сходное с пиритом изменение претерпел и сфалерит, но в виду его большей пластичности промежуточных продуктов почти не наблюдается. Обычно виден мозаичный агрегат с двойниками давления. Двойники в сфалерите выявлены при помощи диагностического травления в парах царской водки, а также маркируются тонкими штрихами халькопирита вдоль двойников. Сюда же мы условно относим и галенит в ассоциации с мозаичным сфалеритом и гранобластовым пиритом. Эта ассоциация сопровождается кварцем ориентировано-гранобластового строения.

Стадия частичной мобилизации проявлена локально и выражается в переотложении части вещества галенита, сфалерита и халькопирита в качестве новообразований на небольшом удалении от границ выделений, а также вдоль трещин

в ранних сульфидах, которые также на этом этапе могут быть залечены блёклыми рудами и вюрцитом. Перераспределение вещества в пределах минеральных агрегатов выражается главным образом в укрупнении эмульсионной вкрапленности халькопирита, а также её концентрации в виде тонких штрихов вдоль двойников сфалерита. Сульфиды этой генерации, переотложенные за пределы первичных агрегатов, корродируют более ранние сульфиды и минералы метасоматитов.

Кроме того, выделяются сульфиды вторичного происхождения, образовавшиеся в основном за счёт халькопирита – халькозин, а также галенита – англезит.

Изменённые породы – *серицит-карбонат-хлорит-кварцевые, хлорит-эпидот-карбонатные и серицит-хлорит-кварцевые с кальцитом метасоматиты*, развитые по вулканогенно-осадочным породам в Зайцевском рудном поле, – сформированы в результате совмещения в пространстве метасоматитов рудоносных зон гипогенного выщелачивания, осаждения и рудоносных зон малоинтенсивного гидrolитического разложения [3, 19].

*Метасоматиты рудоносных зон гипогенного выщелачивания* представлены кварц-серицитовыми, кварц-серицит-хлоритовыми, кварц-серицит-хлорит-карбонатными породами, реже кварцитами. Из рудных минералов в метасоматитах встречены: сфалерит, халькопирит, галенит, марказит. Околорудными изменениями породы замещены не полностью. Изменения составляют от 50 до 60 % от массы породы. В результате в обломочных породах (туфах кислого состава) или в породах с порфировой структурой (риолитах, лавах кислого состава) основная масса породы изменена нацело и превращена в кварц-серицитовый, кварц-серицит-хлоритовый или кварц-серицит-хлорит-карбонатный агрегат, а обломки или фенокристаллы кварца, плагиоклаза сохраняются. В пределах Зайцевского рудного поля также отмечаются полностью изменённые породы. Охарактеризованные околорудно-изменённые породы гипогенного выщелачивания относятся к кварц-серицитовой метасоматической формации.

*Метасоматиты рудоносных зон осаждения* распространены незначительно. Они представлены серицитолитами, хлоритолитами, хлорит-серицитовыми и карбонат-хлоритовыми породами. Выявление даже маломощных тел хлоритовых, кар-

бонатных, серицитовых и смешанных разностей пород служит индикатором расположенных вблизи (от 1–2 до 100–150 м) рудных залежей.

*Метасоматиты рудоносных зон малоинтенсивного гидrolитического разложения* широко проявлены в пределах Зайцевского рудного поля. Они встречены почти во всех скважинах и заключаются в развитии процессов окварцевания, серицитизации, хлоритизации (по породам кислого состава) и преимущественно хлоритизации, карбонатизации (по породам основного состава). Такие изменения составляют не более 25 % от массы породы. По своему составу и морфологическим особенностям метасоматические новообразования близки к таковым во внешнем ореоле гидrolитического изменения предыдущего типа рудоносных зон.

**Выводы.** 1. Вулканогенно-осадочные породы Зайцевского рудного поля по составу, возрасту и соотношению вулканогенной и осадочной составляющих относятся к нижней (ранний цикл вулканизма) рудоносной формации – базальтсодержащей риолитовой известково-кремнисто-терригенной, имеющей трёхчленное строение. Разрез представлен следующими пачками (субформациями): нижняя пачка (соответствует мельничной свите) – туфогенно-осадочная (алевролиты, песчаники, туфопесчаники, гравелиты, туффиты, туфы кислого состава, редко лавы риолитов и их лавобрекчии); средняя пачка (сосновская свита) – риолитовая (риолиты и риодациты, их лавобрекчии, туфы кислого состава, реже игнимбриты кислого состава); верхняя пачка (заводская свита) – туфогенно-алевропесчаниковая (алевропесчаники, алевролиты, часто известковистые, кремнистые, песчаники, гравелиты, прослои туфов кислого состава, туффитов).

2. В пределах Зайцевского рудопроявления выявлены Зайцевская и Рязановская рудные зоны, в которых по вариации минерального состава выделены колчеданно-полиметаллический, колчеданный, медно-колчеданный и колчеданно-медноцинковый минеральные типы руд. По текстурным особенностям руды вкрапленные, прожилково-вкрапленные, брекчиевые и массивные. Выделенные типы рудной минерализации являются серебро-теллуру-висмутсодержащими.

3. Основная масса сульфидов в пределах стратиформных рудных тел образована на раннем



этапе в результате процессов придонного перетолжения. В подчинённом количестве присутствуют сульфиды, образованные гидротермально-осадочным путём и в результате воздействия новых порций гидротермальных растворов. Также образуются сульфиды, которые развиваются по цементу рудных брекчий (особенностью этих образований является значительно переработанный цемент и практически незатронутый обломочный

материал), и в прожилково-вкрапленных зонах минерализации.

4. Распространение рудных брекчий с текстурами, характерными для брекчий обрушения, свидетельствует о существовании на поверхности морского дна гидротермальной сульфидной постройки. Такая постройка в виде рудного холма с шлейфом брекчиевых руд отчётливо выделяется в пределах Рязановской рудной зоны.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гриненко В. А., Гриненко Л. Н.* Геохимия изотопов серы. – М. : Наука, 1974. – 273 с.
2. *Зайков В. В.* Вулканизм и сульфидные холмы палеоокеанических окраин. На примере колчеданосных зон Урала и Сибири. Изд. 2-е, доп. – М. : Наука, 2006. – 429 с.
3. *Кудрявцева Н. Г.* Гидротермально-измененные породы колчеданно-полиметаллических месторождений северо-западной части Рудного Алтая и их поисковое значение // Материалы VIII Международной научно-практической конференции «Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов». – М. : ЦНИГРИ, 2018. – С. 13–14.
4. *Кудрявцева Н. Г.* Ряды рудных формаций месторождений цветных и благородных металлов в различных геодинамических обстановках // Руды и металлы. – 2001. – № 6. – С. 44–52.
5. *Кудрявцева Н. Г., Кузнецов В. В., Галямов А. Л.* Структурно-формационное районирование российской части Рудного Алтая как основа среднесштабных прогнозных построений // Руды и металлы. – 2011. – № 3–4. – С. 103–104.
6. *Кузнецов В. В., Галямов А. Л., Кудрявцева Н. Г.* Литолого-фациальный анализ рудоносных вулканогенно-осадочных отложений в целях прогноза и поиска месторождений рудноалтайского типа // Руды и металлы. – 2011. – № 3–4. – С. 105–106.
7. *Кузнецов В. В., Кудрявцева Н. Г., Галямов А. Л., Кузнецова С. В., Серавина Т. В.* Геолого-генетические основы прогноза и поисков колчеданно-полиметаллических месторождений рудноалтайского типа // Отечественная геология. – 2014. – № 2. – С. 30–38.
8. *Кузнецов В. В., Кудрявцева Н. Г., Серавина Т. В.* Геологические формации и структурно-формационное районирование Российской части Рудного Алтая // Материалы пятой международной научной конференции «Корреляция алтаид и уралид: глубинное строение литосферы, стратиграфия, магматизм, метаморфизм, геодинамика и металлогения». – Новосибирск : Издательство Сибирского отделения РАН, 2020. – С. 52–54.
9. *Кузнецов В. В., Кудрявцева Н. Г., Серавина Т. В.* [и др.] Основы прогноза и поисков колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая. – М. : ЦНИГРИ, 2019. – 207 с.
10. *Кузнецов В. В., Серавина Т. В.* Методика поисков коренных месторождений свинца и цинка в вулканогенных ассоциациях на закрытых территориях, основанная на опыте работ ФГБУ «ЦНИГРИ» 2010–2022 гг. // Труды научно-практической конференции «Актуальные проблемы поисковой геологии». – М. : ВИМС, 2023. – С. 159–166.
11. *Кузнецова С. В.* Некоторые вопросы генезиса и минералогические особенности стратиформных руд колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая, Алтайский край // Руды и металлы. – 2017. – № 2. – С. 40–50.
12. *Кузнецова С. В., Серавина Т. В.* Условия локализации, особенности вещественного состава руд и строение сульфидного холма Западно-Захаровского месторождения (Рудноалтайская минерагеническая зона) // Геология и охрана недр. – 2020. – № 1. – С. 19–30.
13. *Ручкин Г. В.* Стратиформные полиметаллические месторождения докембрия. – М. : Недра, 1984. – 237 с.
14. *Серавина Т. В.* Геологическое строение и петрохимические особенности рудоносных вулканогенно-осадочных отложений Березовогорского рудного поля (Рудный Алтай) // Отечественная геология. – 2015. – № 4. – С. 3–8.
15. *Серавина Т. В., Кузнецова С. В., Филатова Л. К.* Особенности вещественного состава вмещающих пород и руд Лазурского рудного поля (Змеиногогорский рудный район, Рудноалтайская минерагеническая зона) // Отечественная геология. – 2021. – № 3–4. – С. 36–47.
16. *Серавина Т. В., Кузнецова С. В., Филатова Л. К., Донец А. И., Конкин В. Д.* Особенности локализации колчеданно-полиметаллических руд Тушканихинского месторождения (Рудный Алтай) // Руды и металлы. – 2022. – № 4. – С. 102–118.

17. *Склярёв Е. В.* Интерпретация геохимических данных. – М. : Интернет Инжиниринг, 2001. – 288 с.
18. *Филатова Л. К., Филатов Е. И.* Внутреннее строение рудовмещающих кремнекислых вулканогенных образований (на примере девонских вулканизов Рудного Алтая) // Материалы XII научно-практической конференции «Научно-методические основы прогноза, поисков и оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов». – М. : ЦНИГРИ, 2023. – С. 490–491.
19. *Чекваидзе В. Б.* Околорудные метасоматиты колчеданно-полиметаллических месторождений и их поисковое значение. – М. : Недра, 1981. – 240 с.
20. *Franklin J. M., Gibson H. L., Jonasson I. R., Galley A. G.* Volcanogenic massive sulfide deposits // *Economic Geology* 100<sup>th</sup> anniversary volume. – 2005. – P. 523–560.
21. *Galley A. G., Hannington M., Jonasson I. R.* Volcanogenic massive sulphide deposits / in Goodfellow W. D., ed. *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, Special Publication. – 2007. – № 5. – P. 141–161.
22. *Large R. R.* Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits – Features, styles, and genetic models // *Economic Geology*. – 1992. – V. 87. – P. 471–510.
23. *Piercey S. J.* A semipermeable interface model for the genesis of seafloor replacement type volcanogenic massive sulfide (VMS) deposits. – *Economic Geology*. – 2015. – V. 110. – P. 1655–1660.
24. *Schmincke H.-U.* *Volcanism* // Berlin : Springer, 2004. – 324 p.
25. *Smith T. L., Batiza R.* New field and laboratory evidence for the origin of hyaloclastite flows on seamount summits // *Bulletin of Volcanology*. – 1989. – V. 51. – P. 96–114.

#### REFERENCES

1. *Grinenko V. A., Grinenko L. N.* *Geokhimiya izotopov sery* [Geochemistry of sulfur isotopes], Moscow, Nauka publ., 1974, 273 p. (In Russ.)
2. *Zaykov V. V.* Vulkanizm i sulfidnyye kholmy paleo-oceanicheskikh okrain. Na primere kolchedanonosnykh zon Urala i Sibiri [Volcanism and sulphide hills of paleoceanic margins. On the example of pyrite-bearing zones of the Urals and Siberia], Moscow, Nauka publ., 2006, 429 p. (In Russ.)
3. *Kudryavtseva N. G.* *Gidrotermalno-izmenennyye porody kolchedanno-polimetallicheskikh mestorozhdeniy severo-zapadnoy chasti Rudnogo Altaya i ikh poiskovoye znachenie* [Hydrothermally altered rocks of pyrite-polymetallic deposits of the northwestern part of Rudny Altai and their exploration significance], Moscow, TSNIGRI publ., 2018, pp. 13–14. (In Russ.)
4. *Kudryavtseva N. G.* *Ryady rudnykh formatsiy mestorozhdeniy tsvetnykh i blagorodnykh metallov v razlichnykh geodinamicheskikh obstanovkakh* [Series of ore formations of deposits of non-ferrous and precious metals in various geodynamic settings], *Rudy i metally* [Ores and metals], 2001, No. 6, pp. 44–52. (In Russ.)
5. *Kudryavtseva N. G., Kuznetsov V. V., Galyamov A. L.* *Strukturno-formatsionnoye rayonirovaniye rossiyskoy chasti Rudnogo Altaya kak osnova srednemasshtabnykh prognoznykh postroyeniy* [Structural-formational zoning of the Russian part of Rudny Altai as a basis for medium-scale forecast constructions], *Rudy i metally* [Ores and metals], 2011, No. 3–4, pp. 103–104. (In Russ.)
6. *Kuznetsov V. V., Galyamov A. L., Kudryavtseva N. G.* *Litologo-fatsialnyy analiz rudonosnykh vulkanogenno-osadochnykh otlozheniy v tselyakh prognoza i poiska mestorozhdeniy rudnoaltayskogo tipa* [Lithofacies analysis of ore-bearing volcanogenic-sedimentary deposits for the purpose of forecasting and prospecting for deposits of the Ore-Altai type], *Rudy i metally* [Ores and metals], 2011, No. 3–4, pp. 105–106. (In Russ.)
7. *Kuznetsov V. V., Kudryavtseva N. G., Galyamov A. L., Kuznetsova S. V., Seravina T. V.* *Geologo-geneticheskiye osnovy prognoza i poiskov kolchedanno-polimetallicheskikh mestorozhdeniy rudnoaltayskogo tipa* [Geological and genetic foundations of forecasting and prospecting for pyrite-polymetallic deposits of the Ore-Altai type], *Otechestvennaya geologiya*, 2014, No. 2, pp. 30–38. (In Russ.)
8. *Kuznetsov V. V., Kudryavtseva N. G., Seravina T. V.* *Geologicheskiye formatsii i strukturno-formatsionnoye rayonirovaniye Rossiyskoy chasti Rudnogo Altaya* [Geological formations and structural-formational zoning of the Russian part of Rudny Altai], Novosibirsk, Izdatelstvo Sibirskogo otdeleniya RAN publ., 2020, pp. 52–54. (In Russ.)
9. *Kuznetsov V. V., Kudryavtseva N. G., Seravina T. V.* [et al.] *Osnovy prognoza i poiskov kolchedanno-polimetallicheskikh mestorozhdeniy Rudnogo Altaya* [Fundamentals of forecasting and prospecting for pyrite-polymetallic deposits in Rudny Altai], Moscow, TSNIGRI publ., 2019, 207 p. (In Russ.)
10. *Kuznetsov V. V., Seravina T. V.* *Metodika poiskov korennykh mestorozhdeniy svintsya i tsinka v vulkanogennykh assotsitsiyakh na zakrytykh territoriyakh, osnovannaya na opyte rabot FGBU «TSNIGRI» 2010–*

- 2022 [Methodology for prospecting for primary lead and zinc deposits in volcanogenic associations in closed areas, based on the experience of the FGBU «TsNIGRI» in 2010-2022], Moscow, VIMS publ., 2023, pp. 159–166. (In Russ.)
11. *Kuznetsova S. V.* Nekotoryye voprosy genezisa i mineralogicheskkiye osobennosti stratiformnykh rud kolchedanno-polimetallicheskih mestorozhdeniy Rudnogo Altaya, Altayskiy kray [Some issues of genesis and mineralogical features of stratiform ores of pyrite-polymetallic deposits of Rudny Altai, Altai Krai], *Rudy i metally* [Ores and metals], 2017, No. 2, pp. 40–50. (In Russ.)
  12. *Kuznetsova S. V., Seravina T. V.* Usloviya lokalizatsii, osobennosti veshchestvennogo sostava rud i stroyeniye sulfidnogo kholma Zapadno-Zakharovskogo mestorozhdeniya (Rudnoaltayskaya mineragenicheskaya zona) [Localization conditions, features of the material composition of ores and the structure of the sulfide hill of the Zapadno-Zakharovskoye deposit (Rudno-Altai mineragenic zone)], *Geologiya i okhrana nedr*, 2020, No. 1, pp. 19–30. (In Russ.)
  13. *Ruchkin G. V.* Stratiformnyye polimetallicheskiye mestorozhdeniya dokembriya [Stratiform polymetallic deposits of the Precambrian], Moscow, Nedra publ., 1984, 237 p. (In Russ.)
  14. *Seravina T. V.* Geologicheskoye stroyeniye i petrokhimicheskiye osobennosti rudonosnykh vulkanogenno-osadochnykh otlozheniy Berezovogorskogo rudnogo polya (Rudnyy Altay) [Geological structure and petrochemical features of ore-bearing volcanogenic-sedimentary deposits of the Berezovogorsk ore field (Rudny Altai)], *Otechestvennaya geologiya*, 2015, No. 4, pp. 3–8. (In Russ.)
  15. *Seravina T. V., Kuznetsova S. V., Filatova L. K.* Osobennosti veshchestvennogo sostava vmeshchayushchikh porod i rud Lazurskogo rudnogo polya (Zmeinogorskiy rudnyy rayon, Rudnoaltayskaya mineragenicheskaya zona) [Features of the material composition of host rocks and ores of the Lazursky ore field (Zmeinogorsk ore region, Rudnoaltai mineragenic zone)], *Otechestvennaya geologiya*, 2021, No. 3–4, pp. 36–47. (In Russ.)
  16. *Seravina T. V., Kuznetsova S. V., Filatova L. K., Donets A. I., Konkin V. D.* Osobennosti lokalizatsii kolchedanno-polimetallicheskih rud Tushkanikhinskogo mestorozhdeniya (Rudnyy Altay) [Features of the localization of pyrite-polymetallic ores of the Tushkanikhinsky deposit (Rudny Altai)], *Rudy i metally* [Ores and metals], 2022, No. 4, pp. 102–118. (In Russ.)
  17. *Sklyarov Ye. V.* Interpretatsiya geokhimicheskikh dannykh [Interpretation of geochemical data], Moscow, Intermet Inzhiniring publ., 2001, 288 p. (In Russ.)
  18. *Filatova L. K., Filatov Ye. I.* Vnutrenneye stroyeniye rudovmeshchayushchikh kremnekislykh vulkanogennykh obrazovaniy (na primere devonskikh vulkanitov Rudnogo Altaya) [Internal structure of ore-bearing siliceous volcanic formations (using Devonian volcanics of Rudny Altai as an example)], Moscow, TSNIGRI publ., 2023, pp. 490–491. (In Russ.)
  19. *Chekvaizze V. B.* Okolorudnyye metasomatity kolchedanno-polimetallicheskih mestorozhdeniy i ikh poiskovoye znachenie [Near-ore metasomatites of pyrite-polymetallic deposits and their exploration significance], Moscow, Nedra publ., 1981, 240 p. (In Russ.)
  20. *Franklin J. M., Gibson H. L., Jonasson I. R., Galley A. G.* Volcanogenic massive sulfide deposits, *Economic Geology* 100<sup>th</sup> anniversary volume, 2005, pp. 523–560.
  21. *Galley A. G., Hannington M., Jonasson I. R.* Volcanogenic massive sulphide deposits, in Goodfellow W. D., ed. *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, Special Publication, 2007, No. 5, pp. 141–161.
  22. *Large R. R.* Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits — Features, styles, and genetic models, *Economic Geology*, 1992, V. 87, pp. 471–510.
  23. *Piercey S. J.* A semipermeable interface model for the genesis of subseafloor replacement type volcanogenic massive sulfide (VMS) deposits, *Economic Geology*, 2015, V. 110, pp. 1655–1660.
  24. *Schmincke H.-U.* *Volcanism*, Berlin, Springer, 2004, 324 p.
  25. *Smith T. L., Batiza R.* New field and laboratory evidence for the origin of hyaloclastite flows on seamount summits, *Bulletin of Volcanology*, 1989, V. 51, pp. 96–114

Статья поступила в редакцию 20.12.24; одобрена после рецензирования 28.12.24; принята к публикации 10.01.25.  
The article was submitted 20.12.24; approved after reviewing 28.12.24; accepted for publication 10.01.25.