

Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых

УДК 550.4, 553.3

ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ РУД И МЕТАСОМАТИЧЕСКИ ИЗМЕНЕННЫХ ПОРОД БЕРЕЗНЯКОВСКОГО ЭПИТЕРМАЛЬНОГО ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

А.М. Спиридонов¹, З.И. Куликова², Л.Д. Зорина³, Е.М. Гранина⁴, А.В. Паршин⁵,
А.Е. Будяк⁶

¹⁻⁶Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а.

⁵Иркутский государственный технический университет, 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Целью работы являлось изучение вещественного состава руд Березняковского золоторудного месторождения по технологическим пробам.

Установлено, что формирование рудоносных пород месторождения проходило в три этапа: на предрудном этапе происходил процесс аргиллизации, типичный для эпиптермальных месторождений золота, на синрудном этапе образовывались пиррофиллит-кварцевые метасоматиты, на пострудном этапе наблюдалась гипогенная гидратация слюд и еще более поздняя карбонатизация пород. Околорудные метасоматиты месторождения являются типичными для месторождений порфировой рудной формации.

Рудные минералы Березняковского месторождения представлены золотом, серебром, пиритом, блеклыми рудами (теннантитом, тетраэдритом, теллуристой блеклой рудой), сфалеритом, галенитом, халькопиритом, вторичными сульфидами меди, гидроксидами железа. Большую часть выявленных рудных минералов можно отнести к теллуридно-полиметаллической стадии (блеклорудно-теллуридной и золото-теллуридной подстадиям). В незначительных количествах присутствует материал энаргитовой подстадии, галенит-сфалеритовой и кварц-карбонатной стадий рудообразования.

Основная масса золота находится в самородной форме в виде высокопробного и чистого золота, реже в виде теллуридов золота. Часто золото находится в сростках с сульфидами, сульфосолями, а также кварцем, пиррофиллитом, серицитом, иллитом.

Ключевые слова: Березняковское месторождение; золотое оруденение; минералогия; петрография.

¹Спиридонов Александр Михайлович, доктор геолого-минералогических наук, зам. директора по научной работе, тел.: (3952) 422645, e-mail: sam@igc.irk.ru

Spiridonov Alexander, Doctor of Geological and Mineralogical sciences, Deputy Director for Research, tel.: (3952) 422645, e-mail: sam@igc.irk.ru

²Куликова Зоя Ивановна, ведущий инженер лаборатории геохимии рудообразования, тел.: (3952) 422645.

Kulikova Zoya, Leading Engineer of the Laboratory of Geochemistry of Ore Formation, tel.: (3952) 422645.

³Зорина Лидия Дмитриевна, кандидат геолого-минералогических наук, главный специалист лаборатории геохимии рудообразования, тел.: (3952) 422645.

Zorina Lidia, Candidate of Geological and Mineralogical sciences, Chief Specialist of the Laboratory of Geochemistry of Ore Formation, tel.: (3952) 422645.

⁴Гранина Елена Михайловна, ведущий инженер лаборатории геохимии рудообразования, тел.: (3952) 422645.

Granina Elena, Leading Engineer of the Laboratory of Geochemistry of Ore Formation, tel.: (3952) 422645.

⁵Паршин Александр Вадимович, кандидат геолого-минералогических наук, руководитель совместной научно-исследовательской лаборатории геологической информатики ИГХ СО РАН и ИрГТУ, e-mail: sarhin@geo.istu.edu

Parshin Alexander, Candidate of Geological and Mineralogical sciences, Head of the Joint Research Laboratory of Geological Informatics IGC SB RAS and ISTU, e-mail: sarhin@geo.istu.edu

⁶Будяк Александр Евгеньевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии рудообразования, тел.: (3952) 422645, e-mail: budyak@igc.irk.ru

Budyak Alexander, Candidate of Geological and Mineralogical sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Geochemistry of Ore Formation, tel.: (3952) 422645, e-mail: budyak@igc.irk.ru

MATERIAL COMPOSITION OF ORES AND METASOMATICALLY ALTERED ROCKS OF BEREZNYAKOVSKOE EPITHERMAL GOLD ORE DEPOSIT (THE SOUTH URALS)

A.M. Spiridonov, Z.I. Kulikova, L.D. Zorina, E.M. Granina, A.V. Parshin, A.E. Budyak
Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, 1a Favorsky St., Irkutsk, 664033, Russia.
Irkutsk State Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia.

Material composition of ores from Bereznyakovskoe gold deposit is examined on the basis of bulk samples.

Three stages are distinguished in the formation of ore-bearing rocks of the deposit: a pre-ore stage that involves the process of argillization typical of epithermal gold deposits; a syn-ore stage that is characterized with the formation of pyrophyllite quartz metasomatites; a post-ore stage that features hypogenic hydration of mica and subsequent carbonatization of rocks. Wallrock metasomatites of the deposit are typical of porphyry deposits of ore formation.

Ore minerals in the Bereznyakovskoe deposit are presented by gold, silver, pyrite, fahl ores (tennantite, tetrahedrite, grey telluride ore), sphalerite, galena, chalcopyrite, secondary sulfides of copper and iron hydroxides. Identified ore minerals are mostly referred to telluride-polymetallic stage (fahl ore-telluride and gold-telluride substages). There is insignificant presence of the material of enargite substage, galena-sphalerite and quartz-carbonate mineralization stages.

The bulk of gold is represented by native high-carat and pure gold, less frequently by gold tellurides. Gold is often to be found in intergrowths with sulfides, sulfosalts, as well as with quartz, pyrophyllite, sericite and illite.

Keywords: Bereznyakovskoe deposit; gold mineralization; mineralogy; petrography.

Введение. Открытия последних лет существенно изменили представления о металлогении золота Урала. Здесь были обнаружены ранее неизвестные генетические типы месторождений золота: Воронцовское месторождение карлинского типа [13] и Березняковское эпитермальное месторождение [1, 2, 12, 21, 22], что значительно расширяет перспективы Урала как золотодобывающего региона. Все это послужило основанием для постановки более детальных минералого-геохимических исследований вещественного состава руд и метасоматически измененных пород Березняковского эпитермального золоторудного месторождения. Месторождение расположено в 20 км юго-западнее г. Челябинска в пределах Биргильдинско-Томинского рудного узла, который находится в южном экзоконтакте Челябинского полихронного (С₁-Р) гранитоидного плутона на участке сочленения Восточно-Уральской вулканогенной зоны с Восточно-Уральским поднятием.

Актуальной проблемой современного уровня эксплуатации золоторудных месторождений является вопрос более полного извлечения полезного компонента. Березняковское месторож-

дение является одним из привлекательных полигонов для разработки инновационной технологии обогащения руд, где детальное доизучение вещественного состава руд и вмещающих пород позволит оптимизировать технологический процесс обогащения и повысит эффективность извлечения золота на данном объекте.

Особенности геологии и оруденения Березняковского месторождения. Березняковское эпитермальное золоторудное месторождение находится в Биргильдинско-Томинском медно-порфировом рудном поле, представляя верхнюю часть протяженной по вертикали медно-порфировой колонны, мезоабиссальный срез которой соответствует собственно медно-порфировому Северо-Томинскому месторождению [1, 4]. В настоящее время в связи с тектоно-блоковым строением рудного поля эти месторождения находятся в пределах единого эрозионного среза, но в разных тектонических блоках: Северо-Томинское – в базальтах нижнего структурного этажа (О₁₋₂), а Березняковское – в осадочно-вулканогенной толще верхнего структурного яруса (D₃-С₁).

Геолого-генетическое положение Березняковского месторождения в схеме зональности золото-медно-порфировой колонны соответствует имеющимся теоретическим представлениям [19] и подтверждается [1, 14, 17, 18, 20] связью месторождения с субвулканической интрузией диоритовых порфиритов, изотопией O, S, C, результатами термобарогеохимических исследований. Оно соответствует вертикальной и латеральной зональности крупных медно-порфировых месторождений [2, 3, 5, 6, 15–18, 20], являясь продуктом единой порфировоэпитермальной флюидно-магматической системы, подобно тому, как Дарасунская, Карийская и Балейская золоторудно-магматические системы являются продуктами единой порфирово-эпитермальной системы Восточного Забайкалья [11].

В геологическом строении Березняковского месторождения принимает участие субвулканическое тело кварц-плагиоклазовых диоритовых порфиритов (D₃-C₁), прорывающее туфы и кластолавы андезит-дацитового состава осадочно-вулканогенной толщи (D₃-C₁) и образующее с ними единую вулканоплутоническую ассоциацию (рис. 1).

Наиболее детально разведаны Центральный и Юго-Восточный участки Березняковского месторождения [10]. Оконтуренные рудные тела с прожилково-вкрапленным оруденением находятся преимущественно в теле интенсивно катаклазированных, милонитизированных, рассланцованных диоритовых порфиритов. Приурочены они к центральной части метасоматического ореола кислотного выщелачивания, представленного хлорит-слюдисто-кварц-альбитовыми метасоматитами

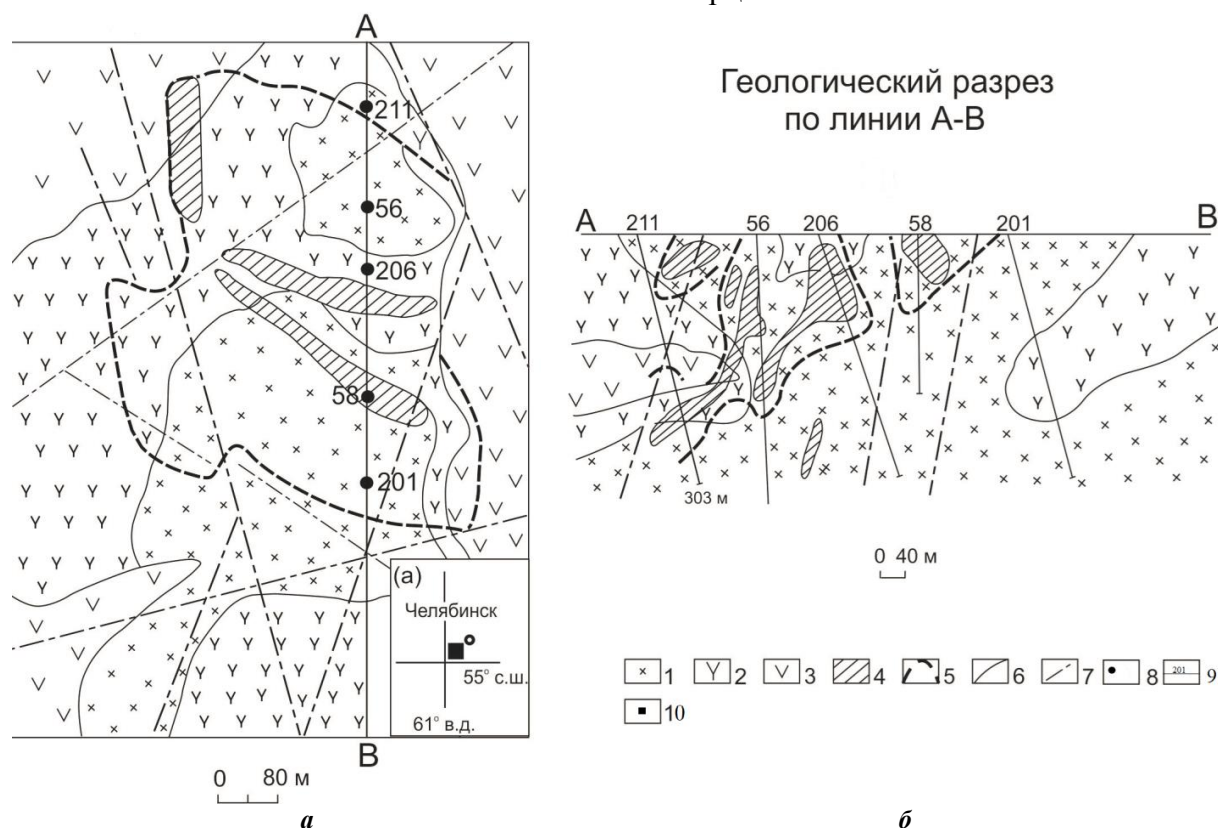


Рис. 1. Схематическая геологическая карта (а) и геологический разрез (б) Березняковского месторождения (по А.И. Грабежеву и др., 2000):

1 – кварцевые диоритовые порфириты; 2 – субвулканические кварцевые андезитовые порфириты; 3 – туфы осадочно-вулканогенной толщи D₃-C₁; 4 – рудные тела; 5 – контур рудной зоны (на рис. 1, а) и зоны умеренного развития белых слюд (обычно в ассоциации с хлоритом) без карбоната (на рис. 1, б); 6 – геологические границы пород; 7 – разрывные нарушения; 8–9 – скважины колонкового бурения (8 – на рис 1, а; 9 – на рис. 1, б); 10 – место расположения Березняковского месторождения

мощностью до 200 м. Среди них находятся тела слюдисто-кварцевых и пиррофиллит-кварцевых метасоматитов мощностью от 1–2 до 60 м [1]. Пиррофиллит-кварцевые метасоматиты сопряжены с рудными телами. В тектонических зонах расщепления метасоматитов слюды представлены гидропарагонитом и парагонит-сметтитом, содержащим 11–27% монтмориллонитовых слоев, причем они образуются позже в ходе гипогенной гидратации, накладываясь на слюды калиевого и натриевого составов. В краевой части ореола измененных пород развиты хлорит-карбонат-слюдисто-кварц-альбитовые и далее карбонат-хлоритовые пропилиты.

Прожилково-вкрапленные золотые руды локализованы в линейных зонах субширотного и северо-западного простираний, а также в виде штокверка [1]. Рудные тела характеризуются крайне невыдержанной мощностью и изменчивым содержанием золота, форма их линейно-вытянутая, часто извилистая, линзовидная, столбообразная, длина – до 300 м, мощность – от 0,3 до 92,0 м. Преобладает субширотное и северо-западное простирание рудных тел при крутом (40–80°) падении на север и северо-восток. Содержания золота в рудных телах изменяются от 1 до 59 г/т, серебра – от 3 до 40 г/т. В зонах золоторудных тел отмечаются высокие концентрации Cu, Zn, Ag, Sn и повышенные содержания Pb, As, Sb, Se, Te.

Метасоматические изменения вмещающих пород. В результате проведенных петрографических исследований измененных рудовмещающих пород установлено, что они представлены метасоматитами слюдисто-кварцевого, пиррофиллит-кварцевого и реже карбонат-слюдисто-кварцевого составов. В ходе метасоматических изменений часто сохраняются реликтовые порфирировая и бластопорфирировая структуры, при этом полевые шпаты практически полностью замещены. По структурным особенностям выделяются две разно-

видности метасоматитов: преобладающие с более микрозернистой структурой, замещенной вторичными продуктами основной массы, образующиеся предположительно по кварцевым андезитовым порфирирам или по кварцевым диоритовым порфирирам в краевой части их тела, где породы менее раскристаллизованы (рис. 2), и с более крупнозернистой структурой базиса, образованные по кварцевым диоритовым порфирирам (рис. 3). Породы катаклазированы, разбиты трещинами. В менее измененных разновидностях сохраняются единичные порфирировые вкрапленники кварца, порфирировые вкрапленники, предположительно плагиоклаза (45–50%), полностью замещены микрочешуйчатым слюдистым агрегатом, сохраняются лишь их контуры, замещены также и зерна плагиоклаза в основной массе (в целом слюдистый агрегат может составлять до 65–70%). Судя по результатам рентгенографического структурного анализа, выполненного в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, слюды представлены пиррофиллитом, из глинистых минералов есть также гидрослюда – иллит.

В основной массе (45–50%) преобладает микрозернистый кварцевый агрегат (размеры зернышек кварца – 0,002 мм и меньше, а в более крупнозернистой разновидности метасоматита – 0,05 мм в поперечнике) с небольшой примесью слюды, замещившей плагиоклазы. Обильная вкрапленность пирита тяготеет к замещающим плагиоклаз слюдистым скоплениям. Структура основной массы микролепидогранобластовая либо бластогипидиоморфнозернистая, бластоаплитовая.

Встречается также брекчия, состоящая из обломков слюдисто-кварцевых метасоматитов, по границам обломков развиты мелкие зернышки рудных минералов и полосы слюдистого агрегата. Иногда в тектонических зонах отмечается более интенсивное развитие карбоната, его скопления составляют 45–50%

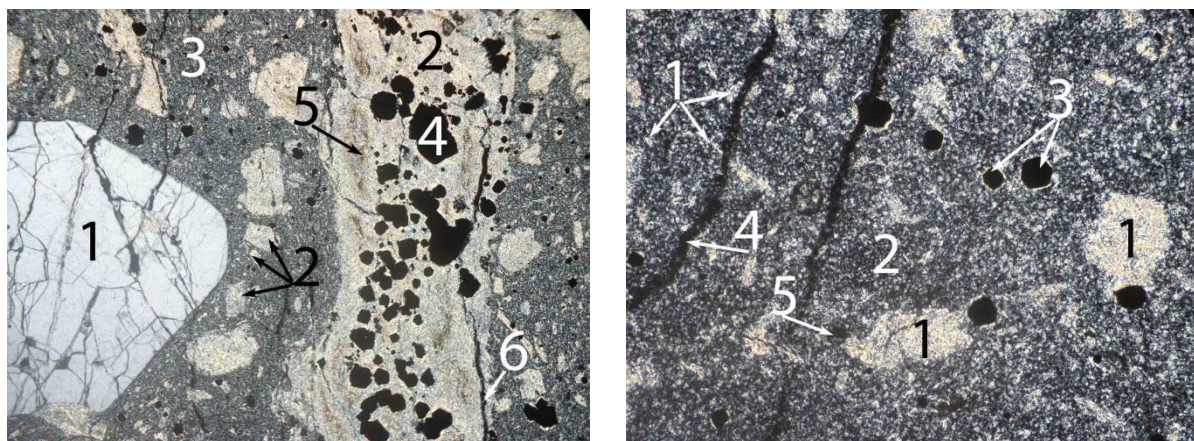


Рис. 2. Метасоматит слюдисто-кварцевый состава с обильной вкрапленностью пирита. Прозрачный шлиф:

а – общий вид породы в шлифе: 1 – порфировый вкрапленник кварца; 2 – микрочешуйчатый слюдяной агрегат, в котором преобладает иллит, заместивший порфировые вкрапленники полевых шпатов и полевой шпат в основной массе; 3 – микрозернистый кварцевый агрегат с примесью чешуек слюды; 4 – вкрапленность пирита, приуроченная к скоплениям слюдяного агрегата (по замещенным порфировым вкрапленникам); 5 – гидроксиды железа; 6 – рудное вещество по трещинке. Поле зрения по горизонтали 4 мм. Николи +;

б – основная масса: 1 – мелкие порфировые вкрапленники и зерна в основной массе, полностью замещенные слюдяным агрегатом, в котором преобладает иллит; 2 – микрозернистый кварцевый агрегат с примесью чешуек слюды; 3 – вкрапленность пирита; 4 – трещины, заполненные рудным веществом; 5 – дефекты шлифа. Поле зрения 0,8 мм. Николи +

площади шлифа, отмечаются также прожилки карбоната мощностью до 5 мм и прожилки хлорит-пирит-лимонит-кварц-карбонатного состава. Карбонат

замещает псевдоморфозы слюдяного агрегата, развитого по полевым шпатам. В этих участках увеличивается количество глинистых минералов. При более

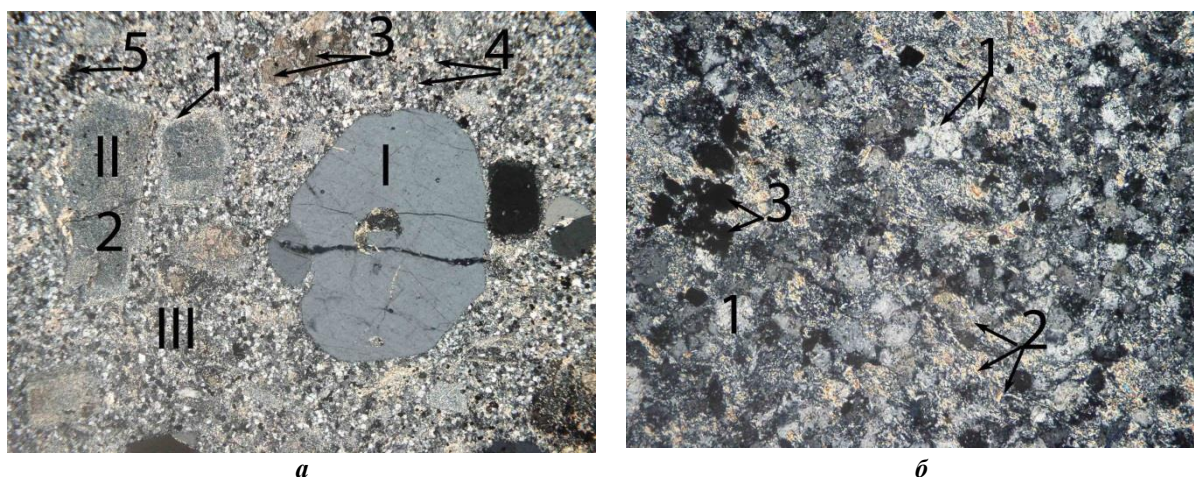


Рис. 3. Метасоматит карбонат-слюдисто-кварцевый состава, образованный по кварцевым диоритовым порфиритам. Прозрачный шлиф:

а – общий вид породы в шлифе: I – порфировые вкрапленники кварца; II – полностью замещенные порфировые вкрапленники полевых шпатов и биотита; III – замещенная основная масса; минералы: 1 – чешуйки пирофиллита (?) по краю замещенных порфировых вкрапленников; 2 – микрочешуйчатая глинисто-слюдяная масса (иллит и др.); 3 – карбонат; 4 – микрозернистый кварц в основной массе; 5 – мелкие зернышки рудных минералов. Поле зрения по горизонтали 4 мм. Николи +;

б – основная масса: 1 – мелкие изометричные зернышки кварца; 2 – микрочешуйчатый слюдяной агрегат (иллит, пирофиллит ?); 3 – кристаллики пирита. Поле зрения по горизонтали 0,8 мм. Николи +

интенсивных изменениях контуры порфировых вкрапленников сглаживаются, исчезают, слюдястый агрегат начинает развиваться в виде многочисленных полосок, приуроченных к микротрещинам (рис. 4). К ним же приурочена и вкрапленность рудных минералов, которая становится более обильной. Возрастают размеры чешуек слюды (пирофиллита), и сокращается примесь глинистых компонентов. Структура породы – гломеробластовая в скоплениях и полосах, сложенных слюдястым агрегатом, микролепидобластовая в кремнистом агрегате с преобладающими зернышками кварца (0,001–0,004 мм) и редкими чешуйками слюды, микролепидогранобластовая.

Складывается впечатление, что пирофиллит образуется позже иллита, замещая его, то есть процесс аргиллизации, типичный для эпитермальных месторождений золота, является более ранним, видимо, прерудным. Предыдущими исследователями отмечались мусковит, парагонит и К-На-

промежуточная слюда, часто гидратированные. Натриевые слюды более распространены в западной части месторождения [1, 4], в технологической пробе, изученной нами, содержания их весьма незначительны.

Пирофиллит-кварцевый метасоматит имеет следующий состав: микрозернистый кварцевый агрегат (45–50%); сферолитоподобные агрегаты, предположительно пирофиллита с размерами от 0,01 до 0,06 мм, образующие мелкие хаотично расположенные скопления (45%); кварц в более крупных зернах, возможно, отчасти являющихся реликтами порфировых вкрапленников; рудные образования, среди которых пирит (5%) и другие сульфиды (2–3%) (рис. 5). Структура – гетеробластовая, гломеробластовая. Сферолитовые агрегаты пирофиллита включают мелкие кристаллы пирита.

Умеренно-сульфидная рудная минерализация в метасоматитах наблюдается в виде рассеянной вкрапленности, тонких прожилковидно-вкрапленных,

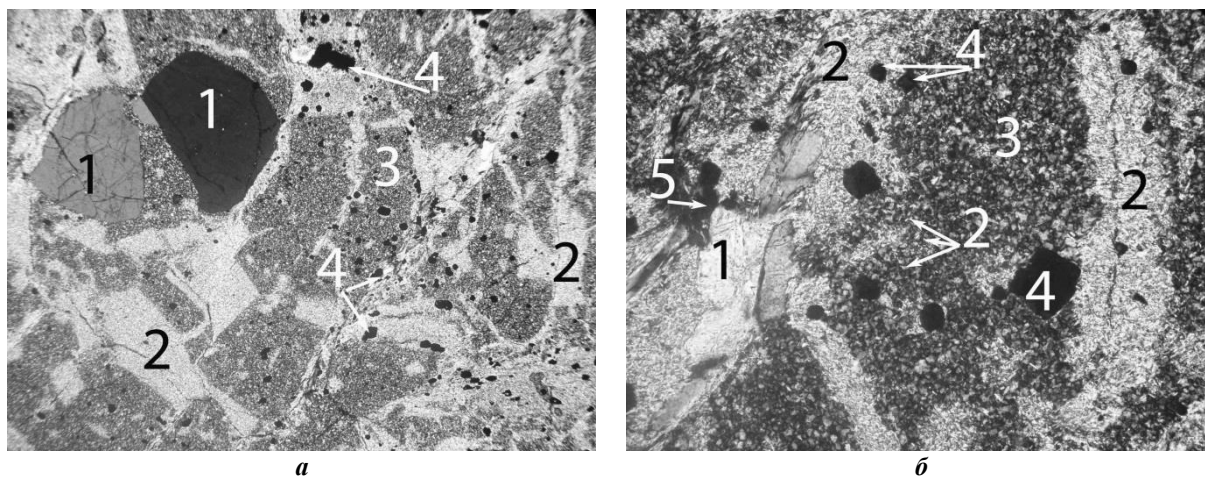


Рис. 4. Метасоматит слюдясто-кварцевого состава с вкрапленностью пирита. Прозрачный шлиф:
 а – вид породы в шлифе с полем зрения по горизонтали 4 мм: 1 – реликты порфировых вкрапленников кварца; 2 – слюдястый агрегат, заместивший порфировые вкрапленники, зернышки полевых шпатов в основной массе и развитый по трещинам вместе с пиритом и кварцем; 3 – микрозернистый кварцевый агрегат по основной массе с единичными чешуйками слюды; 4 – вкрапленность пирита. Николи +;
 б – вид породы в шлифе с полем зрения по горизонтали 0,8 мм: 1 – вторичный кварц, развитый по трещинам вместе с пиритом, пирофиллитом и иллитом; 2 – микрочешуйчатые пирофиллит и иллит, приуроченные к трещинам и заместившие полевые шпаты в основной массе; 3 – микрозернистый кремнистый агрегат с примесью чешуек слюды; 4 – мелкая вкрапленность пирита; 5 – пустоты. Николи +

пятнистых (гнездовидных) выделений, преимущественно пирита с примесью блеклых руд, сфалерита, сульфидов свинца.

В зонах рассланцевания и дробления слюды часто представлены гидропарагонитом и парагонит-сметтитом, которые замещают первичные слюды [1]. Термодинамические параметры образования слюдисто-кварцевых метасоматитов: $T = 380\text{--}320^\circ$, $P = 0,8\text{--}1,2$ кбар, рудная ассоциация (золото, электрум, теллур, теллуриды Au, Ag, Pb, Bi) образовалась при $T = 260\text{--}360^\circ$ и $P = 0,1\text{--}0,4$ кбар; монтмориллонитизация слюд происходила при $T = 160\text{--}240^\circ$ и $P = 0,1\text{--}0,4$ кбар [1].

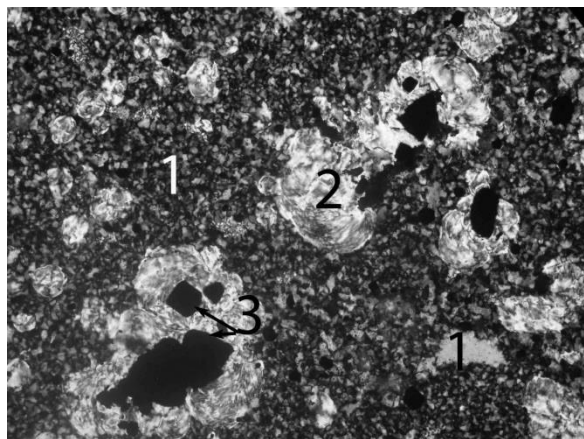


Рис. 5. Пиррофиллит-кварцевый метасоматит с сульфидной минерализацией.

Прозрачный шлиф:

1 – микрозернистый кварцевый агрегат с примесью слюды; 2 – розетковидные, сферолитоподобные агрегаты пиррофиллита; 3 – пирит. Поле зрения по горизонтали – 0,8 мм. Николи +

Особенности вещественного состава руд. По результатам ранее проведенных работ [1] было установлено, что рудная минерализация на Березняковском месторождении формировалась в две стадии: раннюю пиритовую и позднюю полиметаллическую. Пирит первой стадии широко развит как в пределах рудных тел, так и вне их, сопряжен

с метасоматическими изменениями пород. Полиметаллическая стадия развита повсеместно в зонах прожилкового окварцевания и карбонатизации, обнаруживая при этом существенные вариации минерального состава. В ней выделяются три парагенетических ассоциации рудных минералов: золото-полиметаллическая, золото-теллуридно-полиметаллическая и теллуридно-полиметаллическая. Количественно основные минералы всех трех парагенезисов представлены блеклой рудой, сфалеритом, халькопиритом, пиритом и галенитом. Отмечается самородное золото двух генераций, характерных для золото-полиметаллического и золото-теллуридно-полиметаллического парагенезисов соответственно [4].

По другим, более новым данным выделены три рудные стадии [10]: пиритовая (вкрапленность пирита в кварцсерицитовых метасоматитах), основная рудная или теллуридно-полиметаллическая и галенит-сфалеритовая. В пределах основной рудной стадии выделяются три подстадии: энаргитовая, блеклорудно-теллуридная и золото-теллуридная [10].

По результатам проведенного нами рентгеноструктурного анализа (табл. 1) основную массу технологической пробы первичных руд составляют в порядке убывания: кварц, пиррофиллит, иллит, серицит, парагонит, из рудных минералов – пирит, блеклые руды, сфалерит, галенит, халькопирит. Среди рудных минералов преобладает пирит, доля которого в пробе составляет до 10 массовой доли (м.д.) %. Суммарная доля минералов меди – блеклых руд, вторичных сульфидов меди, сульфосолей – около 0,6 м.д. %. Сфалерита – не более 0,4 м.д. %, галенита – 0,1–0,15 м.д. %. Полезные компоненты (золото и серебро) представлены самородным золотом, а также аккумулируются в теллуридах золота, серебра, несколько меньше – в блеклых рудах.

Таблица 1
Минеральный состав
исходной пробы руды

| Минералы и группы минералов | Массовая доля, % |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Породообразующие и жильные минералы | |
| Кварц | 35–40 |
| Слюдистые и гидрослюдистые (пирофиллит, иллит, серицит, парагонит) | 50,00 |
| Хлорит (редко) | – |
| Плагиоклазы (альбит) | <0,5 |
| Карбонаты (анкерит) | 1,00 |
| Рудные минералы | |
| Пирит | 9,20 |
| Блеклые руды (теннантит, тетраэдрит, теллуристая блеклая руда), менее – вторичные сульфиды меди | 0,60 |
| Сфалерит | 0,40 |
| Гидроксиды железа | знаки (<0,2–0,5%) |
| Халькопирит | единичные знаки |
| Апатит, сфен, лейкоксен, циркон | |
| Галенит | знаки |
| Золото, серебро | знаки |

Кварц в пробе представлен идиоморфными и гипидиоморфными зернами с размерами до 1,0–2,0 мм и их сростками со слюдистыми минералами и сульфидами.

Слюдоподобные и гидрослюдистые минералы *пирофиллит*, *иллит*, *серицит*, небольшое количество *парагонита* присутствуют в виде самостоятельных тонкозернистых призматических, чешуйчатых зерен и агрегатов, а также сростков с кварцем и сульфидами. Иллит и серицит, кроме того, отмечаются в виде практически полных псевдоморфоз по плагиоклазу (альбиту). Размеры слюдистых минералов в сростках – сотые и преимущественно тысячные доли миллиметра.

Карбонаты (преимущественно *анкерит*) встречаются в виде единич-

ных мелких зерен и тонкозернистых агрегатов. Часты сростки с породообразующими минералами: кварцем, слюдами, хлоритом. По карбонатам редко отмечается слабая лимонитизация.

Пирит, как отмечалось выше, составляет основную массу сульфидов. Он развивается в виде вкрапленности, пятнистых скоплений зернистых порфиروбластических агрегатов, «сферических» и ажурных скоплений (рис. 6, 7). Размеры зерен – от тысячных долей миллиметра до 0,5 мм. Наиболее распространены зерна и агрегаты размером от менее 0,1–0,05 мм до 1–5 мкм (II генерации). Формы зерен пирита идиоморфные, гипидиоморфные (пентагондодекаэдры, кубы и их комбинации), фрамбоидальные. Характерны порфиробластические, пойкилобластические ситовидные, микропойкилитовые структуры с тонкими включениями кварца, галенита, халькопирита, блеклых руд. Отмечены решетчатые (по пластинчатой отдельности крупных зерен), зональные структуры, иногда центральные части заполнены кварцем. По составу пирит несколько обогащен серой (55,2%). По периферии зерен и агрегатов, трещинам, зонам роста пирит иногда несколько обогащен мышьяком (около 1%). Зерна и агрегаты пирита в зонах смятия и развития прожилков катаклазированы, корродированы слюдистыми минералами, карбонатом. По трещинкам и периферийным зонам отмечаются агрегаты силикатов (кварца, слюдистых минералов, чаще пирофиллита) и блеклых руд, сульфосолей, сфалерита. В пирите встречаются тонкие (менее 1–5 мкм) включения галенита, блеклых руд, энаргита, халькопирита, теллуридов, селенидов, оксидов титана, золота (рис. 8, табл. 2). Тонкие кристаллическизернистые выделения микрозернистого пирита обнаружены в блеклых рудах, вторичных сульфидах меди, секут сфалерит. Изученный пирит можно отнести к дорудному и рудному, т.е. I и II генерации (по [9, 10]).

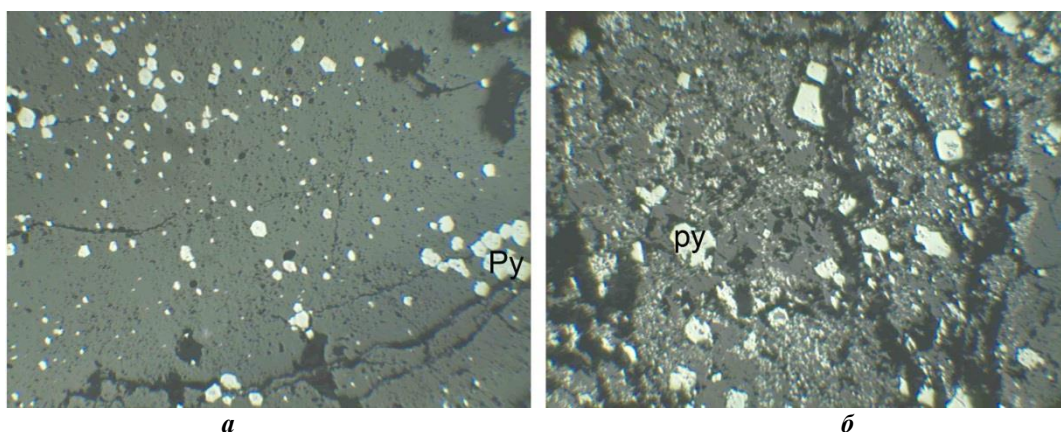


Рис. 6. Формы выделения пирита в метасоматите слюдисто-кварцевого состава:
 а – вкрапленные фрамбоидальные выделения пирита; б – тонкозернистая, порфиробластическая структура пирита в метапрожилковидных выделениях кварца. Полированный штупф, микроскоп. Поле зрения – 2,4 мм. Николи II

Халькопирит выявлен по микро-трещинам в виде тонких ксеноморфных включений, преимущественно в пирите.

Предположительно, он находится в ассоциации с блеклой рудой и сфалеритом.

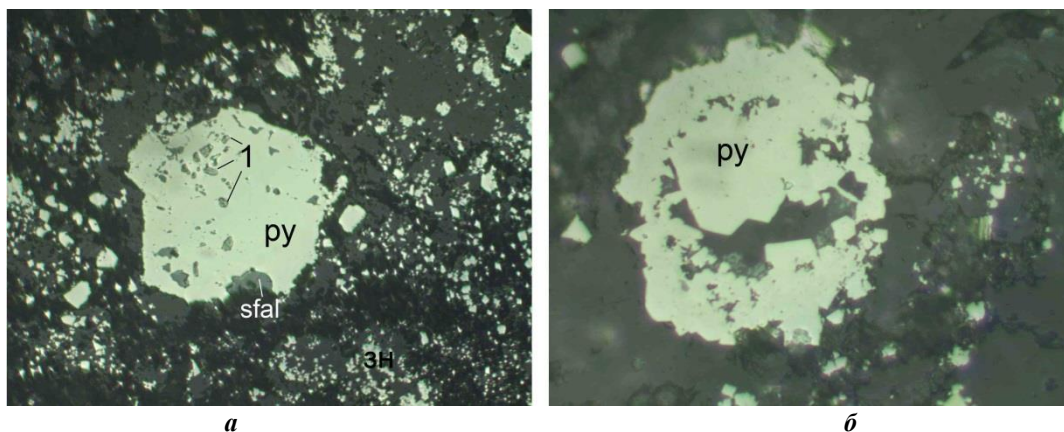


Рис. 7. Формы выделения пирита в кварцево-слюдистых метасоматитах:
 а – тонкозернистая, порфиробластическая структура пирита I генерации (поле зрения 0,6 мм); б – ажурный, «сферический» агрегат пирита II генерации (поле зрения 0,15 мм). Полированный штупф. Николи II

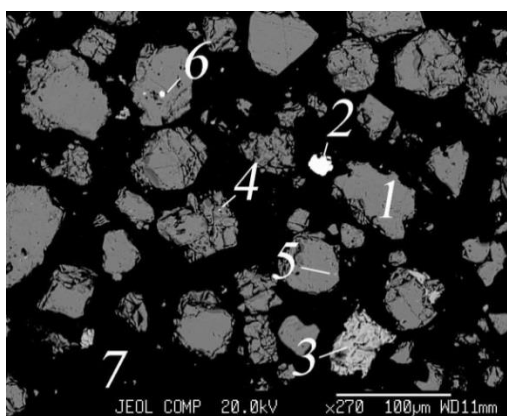


Рис. 8. Минеральный состав флотоконцентрата в брикетном анилифе: среди обломков пирита (1, серый) отмечается тонкое зерно золота (2, белое), блеклая руда (3, теннантит); в пирите видны тонкие включения золота (4), теннантита (5, менее 1–2 мкм) и галенита (6, менее 5 мкм), 7 – балзам (цемент). Обратнорассеянные электроны

Таблица 2

Состав тонких включений в пирите кварц-сульфидного флотоконцентрата из исходной руды (микрозондовый анализ)

| Элемент, массовая доля, % | Номер проб и минерал | | | | |
|---------------------------|----------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------|--------------------------------|
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | близок силъваниту | галенит с алтаитом и примесью Sb | клаусталит (PbSe), предположительно, часть Se находится в самородной форме | самородный свинец | серебросодержащая блеклая руда |
| Au | 38,16 | – | – | – | – |
| Ag | 10,36 | – | – | – | 11,5 |
| Pb | – | 60,87 | 35,11 | 100 | – |
| Te | 51,49 | 21,58 | – | – | – |
| Cu | – | – | – | – | 31,4 |
| Se | – | – | 57,46 | – | – |
| Sb | – | 4,85 | – | – | 6 |
| As | – | – | – | – | 18,8 |
| S | – | 12,7 | 6,12 | – | 31,8 |
| Fe | – | – | 1,31 | – | – |

Блеклые руды наиболее распространены после пирита. При исследовании на микрозонде исходных руд и флотоконцентратов исходных руд (золото-кварцевых медьсодержащих пиритовых) по частоте встречаемости преобладают блеклые руды, менее отмечаются минералы сульфосолей группы: фаматинит-люционит, энаргит. Выделения блеклых руд представляют собой ксеноморфные, тонко прожилковидные агрегаты, часто отмечаются в виде тонких включений по трещинкам, интерстициям, по периферии агрегатов пирита. Блеклые

руды ассоциируют со сфалеритом, корродируют пирит. В блеклых рудах отмечаются включения теллуридов (рис. 9).

Блеклые руды неоднородны по составу. Представлены они в основном *теннантитом*, в единичных случаях – *тетраэдритом*, который отмечается в теннантите в виде полос или пятен (осветленных в обратнорассеянных электронах). Детальное описание блеклых руд сделано О.Ю. Плотинской [10], которая выделяет четыре генерации блеклых руд.

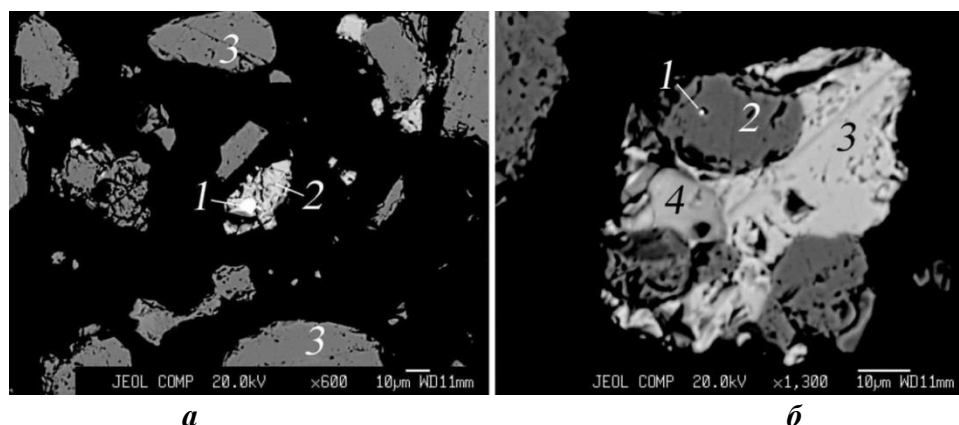


Рис. 9. Минеральный состав блеклой руды в илифах:

а – овальное включение алтаита (1) размером 7–10 мкм в блеклой руде (2). 3 – агрегаты пирита; *б* – тонкое включение галенита (1) с алтаитом (<1 мкм, белый) в пирите (2, серый) в сростании с блеклой рудой (3, светло-серое) и сфалеритом (4, серый). Обратнорассеянные электроны

По результатам наших исследований на микрозонде, пределы колебаний основных элементов в мышьяковистой блеклой руде (теннантите) составляют, м.д. %: Fe – 0,47–6,56; Cu – 31,89–42,8; Zn – 1,35–7,53; S – 26,89–33,36; As – 15,47–25,46; Sb – 4,26–13,23; в сурьмянистой блеклой руде (тетраэдрите): Fe – 0–3,57; Cu – 33,89–37,83; Zn – 4,84–8,98; S – 25,88–27,00; As – 6,38–12,97; Sb – 11,57–21,69. Характерной особенностью является постоянное присутствие цинка. Отмечены единичные тонкие агрегаты серебросодержащих (Ag – до 11,5 м.д. % (см. табл. 2)) и висмутсодержащих блеклых руд (Bi – 22,03 м.д. %, примеси – около 1,5–3,9%). В одном случае обнаружена примесь молибдена (до 5,1%). По блеклым рудам наблюдается гипогенное замещение вторичными сульфидами меди. По составу вторичные сульфиды меди близки дигениту, ковеллину, гириту (доля Cu составляет 56,60–74,62; Fe – от 0,87 до 1,8 м.д. %). Вторичные сульфиды развиваются как в виде агрегатов раскрошенной, ячеистой структуры по всему выделению блеклой руды, так и в виде прожилковидных, зональных, ажурных, каемчатых агрегатов по блеклой руде, сфалериту, иногда галениту.

Выявлены сложные сульфосоли, по составу железо-сурьмяные оксисоли, предположительно относящиеся к группе валлериита.

Сурьмянистые и мышьяковистые сульфосоли типа фаматинита-люционита (определены рентгеноструктурным анализом) встречаются реже блеклых руд, отмечены в ассоциации с блеклыми рудами, сфалеритом, пиритом; сохраняют повышенные доли цинка до 10,3% (как и блеклые руды).

Сфалерит ассоциирует с пиритом и блеклыми рудами, часто по трещинам и по периферии агрегатов сфалерита развиваются вторичные минералы Cu (рис. 10). Размер зерен, пятнистых, прожилковидных агрегатов сфалерита

колеблется от 1–10 до 100 мкм (единичные). Сфалерит часто изоморфен по отношению к блеклой руде, отмечаются зерна с частичными или полными гексагональными ограничениями. В целом состав сфалерита достаточно однородный и близок к теоретическому. Массовая доля (в % для всех перечисленных ниже элементов) Zn изменяется в пределах от 58,87 до 62,75 со средним значением 61,16; S – от 33,16 до 35,59, среднее – 34,82; Fe – от 0,0 до 2,2, среднее – 0,8; доля Cu несколько повышена, изменяется от 1,49 до 5,77, среднее – 3,23. Сфалерит маложелезистый, иногда появляются примеси As (9,57) и Sb (18,53), обогащен медью, отмечены зоны Cu (до 35,31), Zn (до 41,97). Аналогично выделениям блеклой руды сфалерит также разбит тонкими трещинками, по которым развиваются блеклые руды, вторичные сульфиды меди.

Для *галенита* характерны тонкие овальные включения в пирите (рис. 11) и блеклой руде. Отмечены сростки галенита с золото-теллуридами, самородным серебром (см. рис. 11, б). Состав включений галенита в пирите отражен в табл. 2. Наиболее часто галенит ассоциирует с теллуридами свинца (алтаитом), возможно присутствие самородного теллура. Отмечается ассоциация галенита с селенидами: клаусталитом и, предположительно, самородным селеном. Алтаит, вероятно, находится в галените в виде эмульсионных вростков. Включения галенита – менее 20 мкм; алтаита и клаусталита – 5–10 мкм и менее. Состав плюмботеллуридов и клаусталита близок к теоретическому (табл. 3). В случае захвата матрицы отмечается присутствие Fe и S. Присутствует самородный свинец.

Основным полезным компонентом в первичных рудах является *золото*. По данным пробирного анализа среднее содержание золота в руде составляет 2,4 г/т. Основная масса металла присутствует в самородной форме в виде

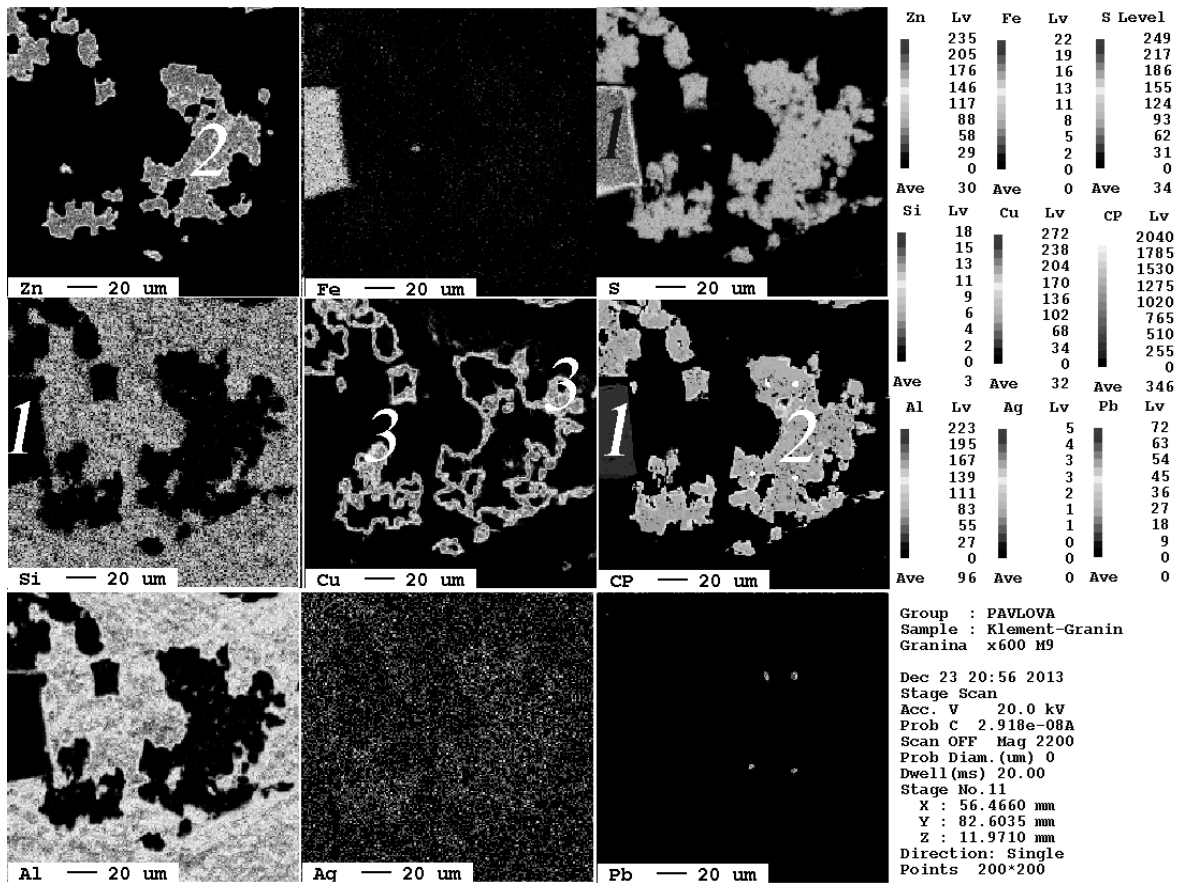


Рис. 10. Формы выделения рудных минералов в рентгеновских лучах: пирит (1) в ассоциации со сфалеритом (2) в кварц-полевошпат-слюдистой массе, дигенит с ковеллином (3) образуют каемки вокруг сфалерита. CP – обратнорассеянные электроны. Справа – шкалы интенсивности рентгеновского излучения заданного элемента (от черного (минимальное) до красного (максимальное))

от весьма высокопробного до чистого (рис. 12, а). Часть золота представлена его теллуридами (табл. 4). По грануло-

метрической характеристике золото относится к ультратонкодисперсному (менее 0,05 мкм), при этом доля тонкодис-

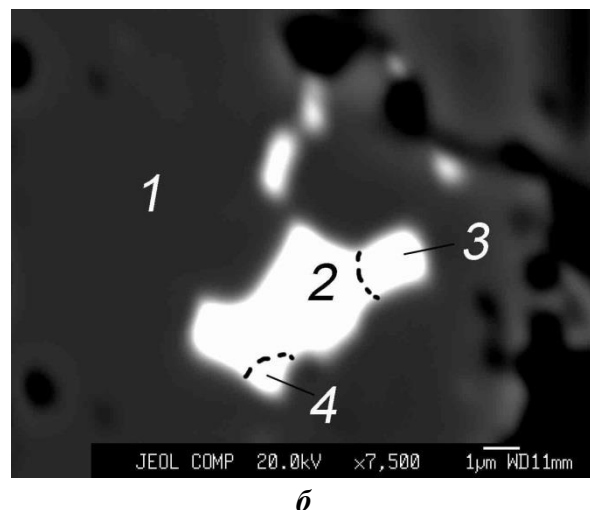
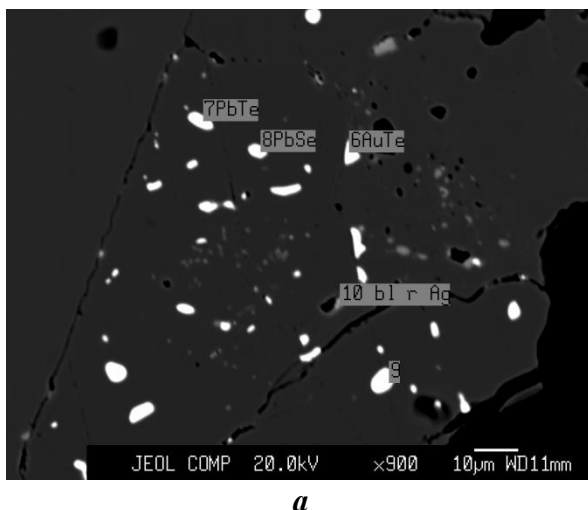


Рис. 11. Минеральные ассоциации в первичных рудах месторождения:

а – включения золото-теллурида (сильванит? т. б), стибно-сульфо-теллурида свинца (т. 7), креннерита (т. 8), самородного свинца (т. 9), серебросодержащего теннантита (т. 10) в пирите; б – в пирите (1, темно-серый) отмечен агрегат галенита (2, белый) в сростке с золото-теллуридом (3, белый) и, предположительно, с самородным серебром (4, белый). Обратнорассеянные электроны

Таблица 3

**Результаты микрозондового анализа плюмботеллуридов и селенида
из кварц-пиритового флотоконцентрата исходной руды**

| Номер eds_sqт | Элемент, массовая доля, % | | | | | Минерал, агрегат |
|------------------|---------------------------|-------|------|-------|-------|------------------------------------------------|
| | Pb | Fe | S | Te | Se | |
| 77_1 | 82,1 | 3,1 | 14,7 | – | – | галенит с включениями пирита |
| 94_6 | 48,9 | 8,63 | 10 | 32,4 | – | алтаит, захват матрицы (пирита) |
| 95_7 | 54,4 | 5,3 | 5,6 | 34,7 | – | алтаит, захват матрицы (пирита) |
| 96_8 | 45,2 | 10,83 | 13,1 | 30,9 | – | алтаит, захват матрицы (пирита) |
| 97_9 | 67,72 | – | – | 32,3 | – | алтаит (в галените) |
| 140 | 70,91 | – | – | 29,08 | – | алтаит с галенитом? (в пирите) |
| 197 | 64,79 | – | – | 35,21 | – | алтаит (в сростании с галенитом, энаргитом) |
| 203 | 62,95 | – | – | 37,05 | – | алтаит (в сростании с пиритом) |
| 264 | 62,68 | – | – | 37,31 | – | алтаит (в блеклой руде) |
| 257 | 70,37 | – | – | 29,63 | – | алтаит (~1 мкм) на границе пирита и теннантита |
| 53 | 72 | – | 8 | – | 17,06 | галенит с клаусталитом |

персного золота размером 3–25 мкм составляет около 10% [8]. Отмечено изометричное выделение золота с неровными краями, структура зерна ультратонкозернистая размером 17×20 мкм. Для определения состава и распределения химических компонентов в этом агрегате золота (рис. 12, б) были проведены измерения по площадной сетке. Колебания доли золота в агрегате выявленного зерна незначительны – от 94,776 до 99,938 м.д. % (средний состав Au – 98,4 м.д. %); отмечена примесь Fe – от 0,062 до 5,25 м.д. %. Кроме того, определено золото по составу чистое (Au – 100 м.д. %) и весьма высокопробное, почти чистое (Au – 94,34; Ag – 5,66 м.д. %). В теллуридах доля золота – от 11 до 29%. В золоте отмечены тонкие включения кварца, алюмосиликатов и оксидов титана.

Основная масса золота находится в сростках с сульфидами, сульфосолями, а также с кварцем, пирофиллитом и гидрослюдистыми минералами (серицитом, иллитом). По данным рациональ-

ного анализа золота, свободного от сростков (амальгируемого), в руде нет. Около 80% золота в исходной руде находится в цианируемой форме.

Попутным компонентом золота является *серебро*, среднее содержание которого составляет 6,5 г/т. Визуально, под микроскопом, серебросодержащих минералов не выявлено, однако при изучении на микрозонде отмечены серебросодержащие блеклые руды, теллуриды серебра (гессит) и серебровисмутный теллурид свинца (группы радклиджит $PbBi_2Te_2$ – вольтинскит $Ag-BiTe_2$). Серебро ассоциирует с самородным золотом, галенитом, отмечено в виде примесей (сотые доли) в пирите. Предположительно, основная масса находится в виде ультратонкодисперсных включений самородного серебра в сульфидах, сульфосолях, о чем косвенно свидетельствуют данные сцинтилляционного и рационального анализов. По гранулометрической характеристике все серебро относится к тонкодисперсному и ультратонкодисперсному.

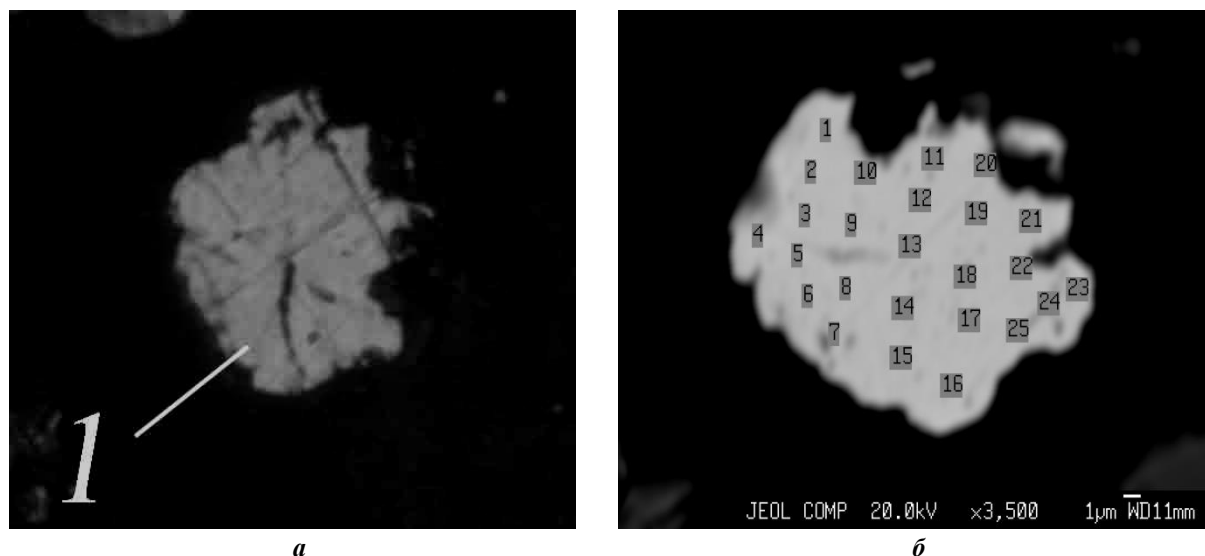


Рис. 12. Кварц-сульфидный флотоконцентрат в брикетном анилифе:
а – агрегат золота 17×20 мкм. Микроскоп. Николи II. Поле зрения рисунка 40 мкм;
б – точки измерения состава (1–25). Обратнорассеянные электроны

Таблица 4

Предварительные результаты микрозондового анализа золото- и серебросодержащих минералов из кварц-пиритового флотоконцентрата исходных руд

| Номер eds_sqt | Элемент, массовая доля, % | | | | | | Минерал |
|------------------|---------------------------|------|------|-------|-------|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | Pb | Fe | S | Te | Au | Ag | |
| 200 | – | – | – | – | 100 | – | Золото чистое |
| 61 | – | – | – | – | 94,34 | 5,66 | Золото весьма высокопробное, почти чистое |
| 57 | – | – | – | 61,2 | – | 38,8 | Гессит |
| 98_10 | 35,92 | 12,3 | 13,0 | 30,7 | 8,0 | – | Алтаит и, вероятно, теллурид золота в галените |
| 80_3 | – | 36,9 | 46,3 | 13,2 | 3,6 | – | Теллурид золота в пирите |
| 99_11 | – | – | – | 71,0 | 29,0 | – | |
| 81_4 | – | – | – | 74,1 | 25,9 | – | Теллурид золота в пирите. Отмечается превышение Te, возможно Te в самородной форме |
| 36 | – | – | – | 71,8 | 28,2 | – | Теллурид золота |
| 39 | – | – | – | 71,5 | 25,40 | – | Теллурид золота с примесью меди (Cu – 2,30%) |
| 199 | – | – | – | 88,84 | 11,16 | – | Золото (или теллурид золота) и самородный теллур в пирите |
| 202 | 22,04 | – | – | 48,83 | – | 9,90 | Минерал группы радклиджит PbBi ₂ Te ₂ – волынскит AgBiTe ₂ (Bi –19,23%) |

Заключение. В изученной нами центральной части месторождения выделяются, по сути, аргиллизиты гидрослюдистой фации с преобладающей в

их составе гидрослюдой иллитом. По аргиллизитам развиваются преимущественно пиррофиллит-кварцевые метасоматиты. Складывается впечатление,

что пиррофиллит образуется позже иллит-а, замещая его, то есть процесс аргиллизации, типичный для эпиптермальных месторождений золота, является более ранним, видимо, предрудным. На синрудном этапе для участка месторождения, изученного нами, типичны пиррофиллит-кварцевые метасоматиты. На пострудном этапе, возможно, происходит поздняя гипогенная гидратация слюд и еще более поздняя карбонатизация.

Околорудные метасоматиты Березняковского месторождения являются типичными для месторождений порфировой рудной формации. Аналогичную картину, например, можно наблюдать на площади Их Салаа (Центральная Монголия) с золотосодержащим молибден-медно-порфировым оруденением, где проявлены пропилитизация с преобладающей альбит-кальцит-хлоритовой фацией, аргиллизация с доминирующей гидрослюдистой фацией, участки с рудной минерализацией находятся в поле развития аргиллизитов и сопровождаются кварц-серицитовыми метасоматитами [7].

Рудные минералы Березняковского месторождения представлены золотом, серебром, пиритом, блеклыми рудами (теннантитом, тетраэдритом, теллуристой блеклой рудой), сфалеритом, галенитом, халькопиритом, вторичными сульфидами меди, гидроксидами железа. Основную массу выявленных рудных минералов можно отнести к теллуридно-полиметаллической стадии (блеклорудно-теллуридной и золото-теллуридной подстадиям). Незначительно присутствует материал энэргитовой подстадии и галенит-сфалеритовой стадии. Основная часть золота отмечается в самородной форме, незначительная – в виде теллуридов золота. Часто золото находится в сростках с сульфидами, сульфосолями, а также с кварцем, пиррофиллитом, серицитом, иллитом.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта № 02.G 25.31.0075 в рамках Постановления Правительства Российской Федерации № 218 от 09.04.2010 г.

Библиографический список

1. Береняковское золоторудное месторождение (Южный Урал, Россия) / А.И. Грабежев, В.Н. Сазонов, В.В. Мурзин, В.П. Молошаг, В.И. Сотников, Н.С. Кузнецов, Б.А. Пужаков, Б.Г. Покросовский // Геология рудных месторождений. 2000. № 1. С. 38–52.
2. Грабежев А.И., Молошаг В.П. Оруденение Томинского медно-порфинового узла // Доклады РАН. 1993. № 3 (330). С. 349–351.
3. Зональность рудоотложения и метасоматизма в Штьявницком рудном поле (Центральная Словакия) / В.Д. Русинов, В.А. Коваленкер, И. Матюшева, В.Б. Наумов // Геология рудных месторождений. 1993. № 3. С. 246–261.
4. Коробейников А.Ф., Грабежев А.И. Золото и платиновые металлы в медно-молибден-порфировых месторождениях // Известия Томского политехнического университета. 2003. № 5 (306). С. 24–32.
5. Кривцов А.И., Мигачев И.Ф., Минина О.В. Минералого-геохимические типы руд медно-порфировых месторождений – золотоносность и зональность // Геохимия. 1985. № 10. С. 1417–1429.
6. Кривцов А.И., Мигачев И.Ф., Попов В.С. Медно-порфировые месторождения мира. М.: Наука, 1986, 236 с.
7. Куликова З.И., Спиридонов А.М. Золотосодержащее молибден-медно-порфировое оруденение площади Их Сала // Золото северного обрамления Пацифика: тез. докл. II Междунар. горно-геолог. форума, посвящ. 110-летию со дня рожд. Ю.А. Билибина. Магадан: Изд-во СВКНИИ ДВО РАН, 2011. С. 121–123.

8. Лодейщиков В.В., Васильева А.В. Методические рекомендации по типизации руд, технологическому опробованию и картированию коренных месторождений золота. Иркутск: Изд-во ОАО «Иргиредмет», 1997. 164 с.

9. Минералогия и условия образования руд Березняковского рудного поля (Южный Урал, Россия) О.Ю. Плотинская, Е.О. Грознова, В.А. Коваленкер, К.А. Новоселов Р. Зелтманн // Геология рудных месторождений. 2009. Т. 51. № 5. С. 414–443.

10. Плотинская О.Ю. Вариации составов блеклых руд месторождения Березняковское (Южный Урал) // Роль минералогии в познании процессов рудообразования: мат-лы годичной сессии минералогического общества, посвящ. 110-летию со дня рожд. акад. А.Г. Бетехтина. Москва: Изд-во ИГЕМ РАН, 2007. С. 257–260.

11. Прокофьев В.Ю., Бортников Н.С., Зорина Л.Д. Золото-порфировые месторождения Монголо-Охотской зоны // Новые и нетрадиционные типы месторождений полезных ископаемых Прибайкалья и Забайкалья: мат-лы Всерос. науч.-практ. конф. Улан-Удэ: Изд-во ЭКОС, 2010. С. 138–141.

12. Сазонов В.Н., Мурзин В.В., Григорьев Н.А. Березняковское золото-порфировое месторождение. Екатеринбург: Уро РАН, 1994. 48 с.

13. Сазонов В.Н., Мурзин В.В., Григорьев Н.А. Воронцовское золоторудное месторождение – пример карлинского типа на Урале, Россия // Геология рудных месторождений. 1998. № 2. С. 157–170.

14. Тейлор Х.П. Изотопы кислорода и водорода в гидротермальных рудных месторождениях // Геохимия гидротермальных рудных месторождений. М.: Мир, 1982. С. 200–232.

15. Bartos P.J. Prograde and retrograde base metal lode deposits and their relationships to underluing porphyry copper deposits // *Econ. Geol.*, 1989. V. 84, № 6. P. 1671–1683.

16. Einaudi M.T. Environment of ore deposition at Cerro de Pasco, Peru // *Econ. Geol.*, 1977. V. 77. P. 893–924.

17. Hedenquist J.W., Arribas A., Reynolds T.J. Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system: Far Southeast-Lepanto Porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines // *Econ. Geol.*, 1998. V. 93. № 4. P. 373–404.

18. Epithermal gold deposits: Styles, characteristics and exploration / J.W. Hedenquist, E. Izawa, A. Arribas, N.C. White // *Resource Geology special Publication*. 1996. № 1.

19. Lowell L.D., Guilbert J.M. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits // *Econ. Geol.* 1970. V. 65. I. 3. P. 373–408.

20. Sillitoe R.N. The porphyry-epithermal transition // *Report. Geol. Surv. Jap.* 1992. V. 61. I. 15. P. 3135–3144.

21. The Bereznyakovskoye gold and southern Ural, Russia / B. Lehmann, J. Heinhorst, U. Hein, M. Neumann, J.D. Weisser, V. Fedosejev // *Mineralium Deposita*. 1999. V. 34. № 3. P. 241–249.

22. Vertical ore-metasomatic of the Tominsk porphyry copper ore field (Southern Urals, Russia) / A.I. Grabezhev, O.V. Rusinova, A.P. Zhukhlistov, V.V. Murzin // *Geology of Ore Deposits*. 1995. V. 37. № 6. P. 436–445.

Рецензент кандидат геолого-минералогических наук, профессор Иркутского государственного технического университета Г.Д. Мальцева