УДК 553.3/4:553.411

А.П.ВАХРУШЕВА, *аспирант, apvah@nickel.spb.ru*
С.В.СЕНДЕК, *канд. геол.-минерал. наук, профессор, grmpi@spmi.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный университет

A.P.VAKHRUSHEVA, *post-graduate student, apvah@nickel.spb.ru*
S.V.SENDEK, *PhD in geol. & min. sc., professor, grmpi@spmi.ru*
Saint Petersburg State Mining University

ВНУТРИРУДНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ И ПРИРОДНЫЕ ТИПЫ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД

В большеобъемных золоторудных месторождениях типа штокверков и минерализованных зон в углеродистых сланцевых комплексах пород в связи с длительностью и многостадийностью рудообразующих стадий первичные прожилково-вкрапленные руды могут подвергаться внутрирудным метаморфическим преобразованиям. Под воздействием метаморфизма происходит перегруппировка форм золота в рудах с образованием более крупных выделений. Это существенно способствует извлечению золота из руд. Метаморфизованные прожилково-вкрапленные руды должны объединяться в единый промышленный тип природных разновидностей золотосодержащихся минеральных ассоциаций месторождений.

Ключевые слова: месторождения золота, масса золота, распределения массы золота и числа проб, типы руд.

ORE-FORMING METAMORPHISM AND NATURAL TYPES OF GOLD-BEARING ORES

A primary vein-disseminated ores of major gold deposit with stockworks and crushed veins in carbonaceous shale rocks can be exposed to metamorphism what with duration and multiplicity of ore-forming stages. A regrouping of gold takes place in ores with formation of lager gold grain under the influence of metamorphism. A metamorphosed vein-disseminated ores should be united in one whole industrial type.

Key words: gold deposits, weight of gold, distribution of gold weight and number of samples, native types of ores.

Промышленные большеобъемные золоторудные месторождения морфологически принадлежат к штокверковым рудным телам и минерализованным зонам дробления и смятия преимущественно в терригенных черносланцевых породных комплексах. Особенность этих месторождений заключается в длительности и многочисленности рудообразующих минеральных ассоциаций, формирующих природные типы руд.

Основу руд составляют прожилково-вкрапленные кварц-карбонат-альбит-серицит-хлоритовые жильные и мелкие пирит-арсенопиритовые рудные минералы в дислоцированных и гидротермально преобразованных породах. Рудные минералы общим объемом до 5 % распределены в виде тонких прожилков и вкраплений по зонам рассланцевания пород. На этом фоне формируются более поздние по времени образования минеральные ассоциации в виде метасоматического окварцевания первичных оруденелых пород с новыми генерациями пиритов, арсенопиритов, появляются новообразования блеклой руды, сфалерита, галенита. Еще более поздние стадии развиваются по типу метасоматических преобразований ранних парагенезисов минералов с одновременным

телескопированием новых ассоциаций минералов в виде относительно маломощных стержневых жил. Эти жильные тела в силу меняющихся режимов деформационных преобразований могут совпадать по направлениям с ранними структурами или занимать другие структурные позиции.

Жильным телам обычно свойственно альбит-карбонат-кварцевое или существенно кварцевое объемное заполнение рудными минералами с существенно полиметалльным парагенезисом: пиритом, арсенопиритом, шеелитом, молибденитом, блеклыми рудами, галенитом, сфалеритом, халькопиритом, сульфосолями свинца и меди. Концентрация рудных минералов на массу жил не превышает 3-7 %. Весьма показательно текстурно-структурное разнообразие жил от массивных однородных до крайне сложных: брекчиевых, брекчиевидных, сложно полосчатых с включениями породных отслоений вдоль контактов жил, с пересечениями ранних генераций минералов поздними жилками и прожилками подобного же минерального состава.

Все это свидетельствует о неодноактной природе и длительности собственно кварцевожильных образований [8-10]. Современные исследования газово-водных и минерально-геохимических составов кварцевых жильных образований Нежданинского и Наталкинского золоторудных месторождений [2, 6] обнаруживают значительные изменения физико-химических условий образования минералов жил.

Золото в рудах рассматриваемых месторождений многоформно. Значительная часть его представлена дисперсными и тонкими срастаниями с пиритом и арсенопиритом ранних продуктивных ассоциаций, часть в виде тонких и мелких зерен присутствует в полиметалльной минеральной массе и меньшая по массе золота часть присутствует в свободной форме в жильных минералах в виде мелких, редко средних зерен. Именно тонкое и дисперсное золото, тесно связанное с пирит-арсенопиритовой прожилково-вкрапленной минерализацией в углеродистых дислоцированных породах, определяет эти руды как упорные по извлечению из них золота. Неслучайно на первых этапах изучения и эксплуатации большеобъемных месторождений промышленный интерес представляли собственно кварцево-жильные тела и зоны, в которых золото присутствовало в более высоких концентрациях и в виде свободных легко извлекаемых зерен. Формационный и промышленный тип месторождений рассматривался как золото-кварцевая формация [3].

Современная оценка этих месторождений прежде всего базируется на суммарном запасе золота в рудах различных природных типов. Поскольку основу руд составляют бедные по концентрации золота (не более 2-3 г/т) и к тому же упорные типы, их выделение и объемное оконтуривание как рудных тел представляет первостепенную геологическую задачу. Отработка подобных руд потребует их селективного извлечения и использования нетрадиционных технологий получения золота.

На практике выделение различных типов руд из штокверковых и минерализованных зон достаточно сложно, поскольку в процессе многостадийного рудообразования первично сформированные прожилково-вкрапленные руды подвержены внутрирудным метаморфическим преобразованиям без четко выделяемых геологических границ. Можно в той или иной степени оценивать интенсивность метасоматического окварцевания, дислоцированность и рассланцованность первичных руд, новообразования рудных минералов, но выделять по этим изменениям природные типы руд без четко выраженных геологических границ не представляется возможным. Значительно важнее оценить характер преобразования первичных руд под действием интрарудных процессов и поведение золота в этих преобразованиях.

В качестве примера изучения внутрирудных метаморфических изменений первичных прожилково-вкрапленных руд нами рассмотрено Нежданинское золоторудное месторождение. Главное рудное тело месторождения – это рудная зона № 1, представленная круто наклоненной к западу минерализованной зоной среди пермских песчанистых алевролитов и аргиллитов. Рудная зона прослежена по простиранию более чем на

5 км, эрозионным срезом и горными выработками вскрыта на глубину более 1 км. Мощность колеблется от нескольких метров до 25-30 м в раздувах. По природе рудная зона – это многоактные сбросо- и превалирующие взбросо-сдвиги [7, 13].

Основу рудной зоны составляют рассланцованные, местами брекчированные углеродистые алевролиты. В них отмечается очень тонкая по рассланцеванию вкрапленность пирита и арсенопирита, сопровождаемая иногда редкими тонкими прожилками карбонат-кварцевого и альбит-кварцевого состава с редкими зернами пирита (рис.1).

Последующие преобразования этих руд выражаются в развитии метасоматического окварцевания по трещиноватым и брекчированным рудоносным алевролитам с образованием тонкосетчатых кварцевых прожилков и стяжений неправильных конфигураций либо в относительно равномерном метасоматическом оквацевании, которое пропитывает массу брекчированной руды, придавая рудам более светлый оттенок (рис.2).

Наиболее значительные изменения первичных руд сопровождаются почти полным структурно-вещественным преобразованием пелитоморфного вещества рудных алевролитов тонкой мозаикой ксеноморфных кварцевых зерен, придающих рудам роговиковый, а порой и кварцитоподобный облик, на фоне которого видны теневые включения первичных незамещенных кварцем рудных породных образований и минералов (рис.3).

Отмеченные изменения первичных прожилково-вкрапленных руд встречаются по всему вертикальному разрезу рудной зоны, но на самых верхних горизонтах они менее объемны по сравнению с нижними горизонтами штолен, где они выражены полнее.

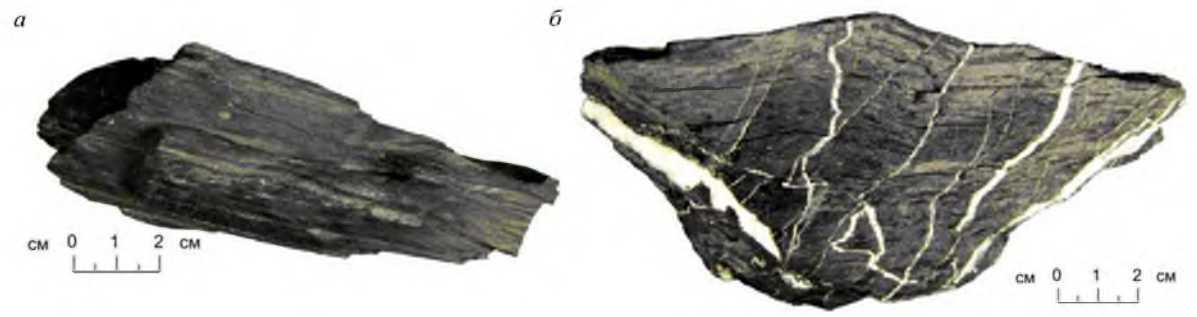


Рис.1. Образцы оруденелых алевролитов с тонкой пирит-арсенопиритовой минерализацией: *а* – видна тонкая более светлая кварцевая и кварц-сульфидная прожилковатость по рассланцованности; *б* – поперечные к рассланцованности карбонат-кварцевые и альбит-кварцевые прожилки

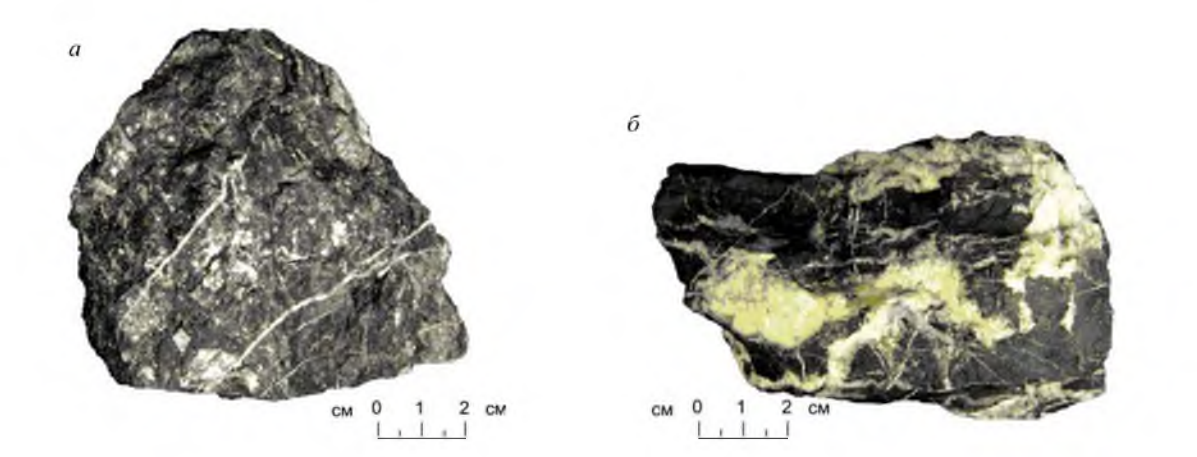


Рис.2. Образцы метасоматически окварцованных прожилково-вкрапленных руд: *а* – окварцевание по всей массе брекчированной прожилково-вкрапленной руды; *б* – окварцевание по прожилкам

Под микроскопом в этих рудах в пределах эрозионного среза обнаруживается хорошо выраженная зональность, заключающаяся в том, что с глубиной, на более низких горизонтах, в рудной массе появляются минеральные новообразования в виде тонкого метасоматического и сетчато-прожилкового кварца с альбитом, карбонатами, серицитом, хлоритом. Отмечены следы разложения ранних сульфидов с образованием новых генераций более крупных зерен пирита и арсенопирита (рис.4).

Как уже отмечалось, золотоносность прожилково-вкрапленных руд связывается с пирит-арсенопиритовой минерализацией: по данным многих исследователей, в пиритах концентрация золота достигает десятков, а в арсенопиритах – сотен граммов на тонну. Наши наблюдения по изучению соотношений по массе сульфидных минералов и валового золота, приходящихся на пробу-протолочку из отобранной руды, свидетельствуют, что при относительно невысокой концентрации минералов тяжелых фракций (не более 3-5 %) существует прямая положительная корреляция между возрастающей массой сульфидов в руде и концентрацией золота в пробах. Но если общая масса сульфидных минералов превышает 5-7 % и более, концентрация золота в подавляющем числе проб резко убывает и на этом фоне из нескольких десятков проб выделяются однадве, в которых концентрация золота может вырасти на порядок. Подобные дисперсии

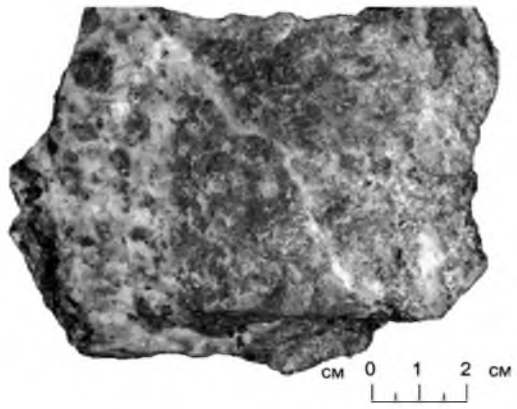


Рис.3. Образец интенсивно метасоматически окварцованной прожилково-вкрапленной руды. Видны теневые (более темные) первичные рудоносные алевролиты в окварованной массе

означают, что природа прожилково-вкрапленных руд, в частности на Нежданинском месторождении, многогранна и присутствие в этих рудах золота разноформно.

Можно предполагать, что золото в первичных прожилково-вкрапленных рудах чрезвычайно тонкое и дисперсное, присутствует, возможно, на уровне наночастиц в оруденелом сланцевом углеродистом субстрате и находится в структурах пиритов и арсенопиритов [5], что и обусловливает упорность руд по извлечению золота. По данным работы [1], золото в прожилково-вкрапленных рудах углеродистых сланцевых пород с пирит-арсенопиритовым содержанием (месторождения Бакырчик, Кумтор, Амантайтау, Даугызтау и др.) представлено миграцион-

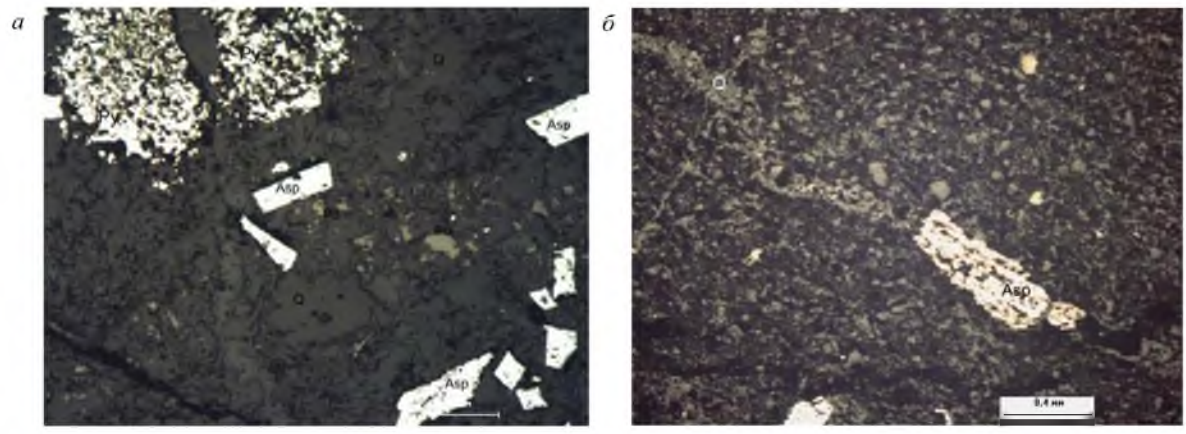


Рис.4. Структуры разложения ранних пиритов (в левом верхнем углу) и арсенопиритов (*а*) и частично корродированные кристаллы арсенопирита (*б*). Полированные аншлифы

но-способными формами (ионной и коллоидной), преобладающими над собственно самородным золотом в отношении 85-90 и 10-15 % соответственно. Возможно, на Нежданинском месторождении мы имеем аналогичную ситуацию. Поэтому крайне важно проанализировать возможные преобразования золота в процессе внутрирудного метаморфизма.

Понятно, что мы не располагаем данными о первичных количественных соотношениях форм золота в прожилково-вкрапленных рудах. Однако если проанализировать объемные количества однотипной руды от мало измененных до более метаморфизованных руд, можно оценить характер внутренних преобразований первичных руд. Эти преобразования могут удалять растворенное золото из руд, что снизит средние значения концентрации золота в измененной руде. Если в изменившихся рудах средние концентрации золота увеличатся, то можно утверждать, что внутрирудные метаморфические процессы сопряжены с привносом дополнительного золота. По степени изменчивости этих концентраций можно судить о масштабе выноса или привноса золота.

Наконец, возможен вариант, когда в изменившихся рудах средние концентрации золота будут стабильными. В этом случае крайне важно оценить внутреннее перераспределение масс золота, если таковое состоялось, и направление этого перераспределения.

Инструментом для выявления подобных преобразований является анализ большого количества бороздовых проб, отобранных из однотипных руд в процессе разведочных работ. Основополагающим принципом этого анализа является утверждение о функциональной зависимости распределений золота в рудах как отражения генетической природы рудообразования [4, 11, 12]. Анализ распределения концентраций золота в рудах, массовых долей золота по классам концентраций и количества проб, приходящихся на эти классы, определяет специфическую внутреннюю структуру распределений названных параметров, свойственных данному природному типу руды.

Методология подобного анализа изложена в работах [11, 12]. Отметим, что все значения рассматриваются на градуированной шкале классов концентраций золота в рудах *c*. Шкала логарифмическая нормальная или двоичная шкала классов содержаний золота в пробах. Во всех случаях анализируются распределения по шкале классов содержаний золота:

Класс	*c*, г/т
1	Меньше 0,25
2	Больше 0,25-0,5
3	Больше 0,5-1
4	Больше 1-2
...	...
13	Больше 512-1024
14	Больше 1024-2048

Все данные заносятся в специальную таблицу, где для каждого класса подсчитывается число проб *n* и сумма длин бороздовых проб *m* (в метрах). Кроме того, обязательно вычисляются массовые значения классов *mc* в миллиграммах на тонну (метрограммах). Учитывая, что объемные параметры сравниваемых и анализируемых массивов руд могут разниться, удобнее число проб *n* и массу золота *mc* отображать в процентах по отношению к общей сумме этих параметров.

На Нежданинском месторождении нами взято для сравнения три уровня вертикальной вскрытости рудной зоны 1: штольня 5, располагающаяся в 200-300 м от поверхности, штольня 2 ниже еще на 300 м и самая нижняя штольня 1. Все три штольни имеют многокилометровую длину по простиранию рудной зоны. На всем протяжении рудная зона была поинтервально опробована на полную мощность, в том числе с геологической привязкой проб к тем или иным типам руд, составляющих эту рудную зону. По данным бороздового опробования месторождения получены десятки тысяч пробирных анализов руд. Такой объем фактического материала исключает возможность случайных и неопределенных суждений.

Данные опробования (см. таблицу) свидетельствуют, что средние концентрации золота в анализируемых штольневых гори-

Распределение масс золота по штольневым горизонтам в первичных прожилково-вкрапленных рудах

Класс концентраций золота	Штольня 5, N = 432, l = 411,35 м, c = 1,28 г/т				Штольня 2, N = 539, l = 505 м, c = 1,69 г/т				Штольня 1, N = 871, l = 823,45 м, c = 1,52 г/т			
	Число проб n		mc		Число проб n		mc		Число проб n		mc	
	по классам	% к общему	мг/т	% к общему	по классам	% к общему	мг/т	% к общему	по классам	% к общему	мг/т	% к общему
1	82	19	15,82	3,0	73	13,5	14,02	1,6	166	19	10,48	0,8
2	73	16,9	28,39	5,4	90	16,7	33,84	3,9	189	21,7	74,83	5,9
3	92	21,3	74,35	14,1	102	18,9	74,67	8,7	202	23,2	143,34	11,4
4	95	22	142,1	27,0	114	21,1	161,24	18,8	171	19,6	237,87	18,9
5	76	17,6	198,61	37,7	113	21	308,09	36,0	94	10,8	240,19	19,1
6	13	3	57,08	10,8	37	6,9	182,49	21,3	34	3,9	170,59	13,5
7	1	0,2	10,56	2,0	9	1,7	93,68	10,95	8	0,9	150,85	11,9
8	–	–	–	–	1	0,2	17,08	2,0	3	0,3	39,50	3,1
9	–	–	–	–	–	–	–	–	4	0,4	188,26	14,9
Всего	432	100	526,91	100	539	100	855,11	100	823	100	1259,91	100

Примечание. N – общее число проб; l – общая длина проб.

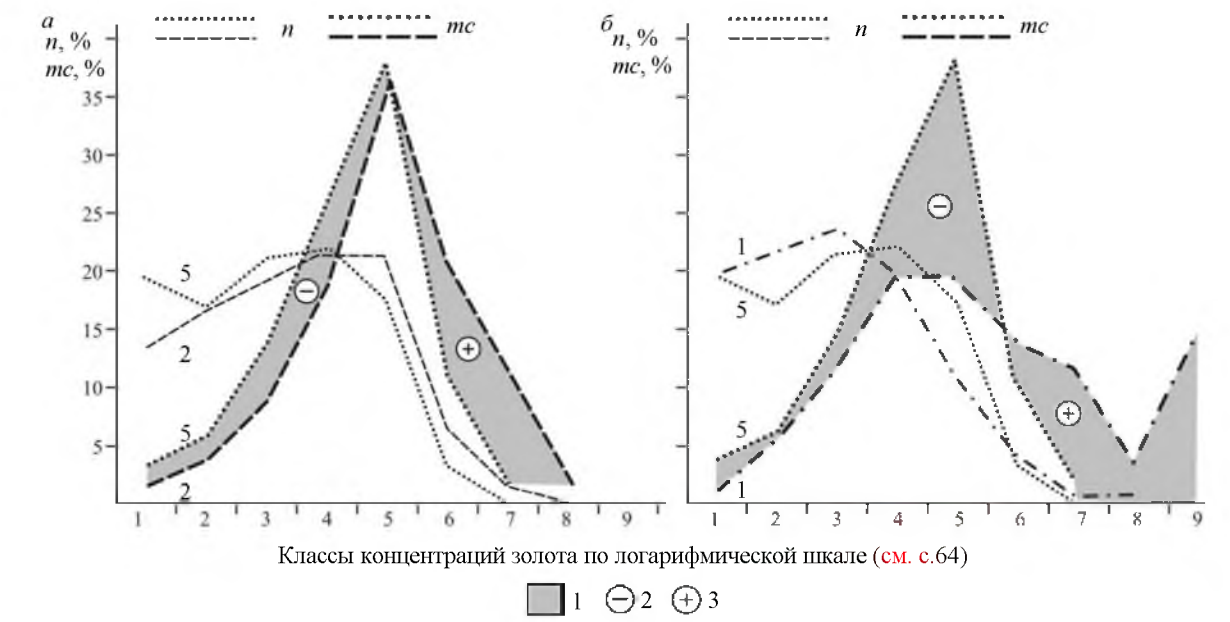


Рис.5. Распределение числа проб и масс золота в первичных прожилково-вкрапленных рудах Нежданинского месторождения: *а* и *б* – сопоставление распределений по штольням 5 и 2 и 5 и 1 соответственно (номера штолен указаны на кривых)

1 – масса золота; 2 и 3 – вынос и привнос

зонтах прожилково-вкрапленных руд весьма близки. Если принять, что концентрация золота в 1,28 г/т на уровне штольни 5 является эталонной для данного типа руд, то концентрации золота 1,52 и 1,69 г/т могут в процессе метаморфических преобразований иллюстрировать привнос дополнительного золота к первичным рудам в количестве до 15-20 %. Но даже в этом случае 80-85 % валового золота сохраняется в полном объеме первичной руды, и именно преобразование этого золота определяет промышленный тип руды в результате внутрирудного метаморфизма.

Из приведенных расчетов видно, что при общей схожести распределений масс золота (метрограммов) по классам содержаний, конфигурация кривых распределения

массы золота и числа проб последовательно изменяются от верхнего уровня (штольня 5) к нижнему (штольня 1). Это выражается в направленном снижении максимума распределения и росте дисперсии. От верхнего горизонта к нижнему массы золота перемещаются из низких классов содержаний к более высоким, с образованием единичных проб с более высокими содержаниями золота (рис.5).

Если между штольнями 5 и 2 еще сохраняется масштабность распределений метрограммов по классам (рис.5, *а*), то на нижнем уровне (штольня 1) массовость перегруппировки первичного золота существенна: исчезает максимум в классе 5 за счет перегруппировки золота в классы 7-9, а в классах 4 и 5 формируется одинаковая по значимости масса золота, равная 19 % (рис.5, *б*).

Выводы

1. В процессе формирования многостадийных большеобъемных месторождений типа минерализованных зон и штокверков в углеродистых сланцевых комплексах пород образованные ранние прожилково-вкрапленные упорные руды под действием более поздних минералообразующих стадий подвергаются интрарудным метаморфическим преобразованиям. Эти преобразования возникают даже под воздействием непродуктивных на золото минерализационных стадий. Преобразования выражаются прежде всего в появлении прожилкового и метасоматического окварцевания руд, разложении и перекристаллизации ранних золотосодержащих пиритов и арсенопиритов.

2. Под воздействием внутрирудного метаморфизма в прожилково-вкрапленных рудах происходит направленное изменение форм нахождения золота за счет его перегруппировки. Исчезают тонкие, подвижные в условиях перегруппировки формы золота с одновременным образованием более крупных частиц золота.

3. В результате интрарудных метаморфических преобразований прожилково-вкрапленные руды могут существенно терять свойство упорности по извлечению золота. Они могут и должны объединяться с другими природными типами (прожилково-кварцевыми и жильными с сульфосольно-полиметаллными ассоциациями золота) в единый геолого-промышленный тип руды. В этом случае принципиально меняется подход к геолого-промышленной оценке месторождений подобного типа и, в частности, бортовому оконтуриванию промышленных руд по признакам внутрирудных метаморфических преобразований, примером чему является история переоценки запасов руд Наталкинского месторождения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абдулин А.А.* Наноминералогия золота золоторудных месторождений основных промышленных типов / А.А.Абдулин, В.Н.Матвиенко, В.А.Нарсеев // Отечественная геология. 2000. № 3. С.20-40.

2. *Гамянин Г.Н.* Нежданинское золоторудное месторождение – уникальное месторождение Северо-Востока России / Г.Н.Гамянин, Н.С.Бортников, В.В.Алпатов. М., 2000. 252 с.

3. Золоторудные гиганты России и мира / М.М.Константинов, Е.М.Некрасов, А.А.Сидоров и др. М., 2000. 272 с.

4. *Канцель А.В.* Функция распределения металла в рудах как генетическая характеристика процесса рудообразования // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1966. № 10. С.18-30.

5. Наночастицы в процессе разрушения и вскрытия геоматериалов / В.А.Чантурия, К.Н.Трубецкой, С.Д.Викторов, И.Ж.Бунин. М., 2006. 216 с.

6. Наталкинское золоторудное месторождение мирового класса: распределение РЗЭ, флюидные включения, стабильные изотопы кислорода и условия формирования руд (Северо-Восток России) / Н.А.Горячев, О.В.Викентьева, Н.С.Бортников и др. // Геология рудных месторождений. 2008. Т.50. № 5. С.414- 444.

7. Нежданинское рудное поле / В.М.Яновский, Н.П.Касаткина, А.А.Скобелев, Б.В.Рогачев // Геология золоторудных месторождений Востока СССР. М., 1988. С.7-27.

8. Полиформационное золоторудное месторождение / Г.Н.Гамянин, М.К.Силичев, Н.А.Горячев, Н.А.Белозерцева // Геология рудных месторождений. 1985. № 5. С.86-89.

9. *Сендек С.В.* О признаках золотоносности кварцев в связи с их интраминерализационным преобразованием (на примере Нежданинского месторождения) / С.В.Сендек, Л.Н.Черник // Записки Ленинградского горного института. 1973. Т.65. Вып.2. С.43-52.

10. *Сендек С.В.* Характерные особенности Нежданинского золоторудного месторождения как представителя крупных золотопроявлений типа минерализо-

ванных зон / С.В.Сендек, С.М.Сычев // Уникальные месторождения полезных ископаемых России. Закономерности формирования и размещения: Сб. статей. СПб, 1996. С.30-38.

11. *Сендек С.В.* Структура запасов металла как следствие генетических особенностей рудообразования // Записки Горного института. СПб, 1993. Т.137. С.28-38.

12. *Сендек С.В.* Проявление энтропийного закона распределения массы золота при формировании промышленного оруденения // Записки Горного института. СПб, 2009. Т.183. С.112-126.

13. *Силичев М.К.* Геологическое положение и особенности структуры Нежданинского золоторудного месторождения // Геология рудных месторождений. 1970. Т.12. № 2. С.96-102.

REFERENCES

1. *Abdulin A.A.* Nanomineralogy of gold deposits of basic industrial types / A.A.Abdulin, V.N.Matvienko, V.A.Narseev // Native geology. 2000. N 3. P.20-40.

2. *Gamyanin G.N.* Nezhdaninsky gold deposit – unique deposit of Northeastern Russia / G.N.Gamyanin, N.S.Bortnikov, V.V.Alpatov. Moscow, 2000. 252 p.

3. Gold giants of Russia and the World / M.M.Konstantinov, E.M.Nekrasov, A.A.Sidorov, etc. Moscow, 2000. 272 p.

4. *Kantsel A.V.* Function of a metal distribution in ores as a genetic characteristic of the ore-forming process // Journal of the Russian Academy of Sciences. Ser. Geol. 1966. N 10. P.18-30.

5. Nanoparticles during destruction and opening of geomaterials / V.A.Chanturiya, K.N.Trubetskoy, S.D.Viktorov, I.Z.Bunin. Moscow, 2006. 216 p.

6. Natalka gold deposit of a world class: distribution of rare earth elements, fluid inclusions, stable isotopes of oxygen and a conditions of ore formation (Northeast of Russia) / N.A.Goryachev, O.V.Vikentyeva, N.S.Bortnikov et al. // Geology of ore deposits. 2008. Vol.50. N 5. P.414-444.

7. Nezhdaninsky ore field / V.M.Yanovsky, N.P.Kasatkina, A.A.Ckobelev, B.V.Rogachev // Geology of gold deposits of the East of the USSR. Moscow, 1988. P.7-27.

8. Multy-stage gold deposit / G.N.Gamyanin, M.K.Silichev, N.A.Goryachev, N.A.Belozertseva // Geology of ore deposits. 1985. N 5. P.86-89.

9. *Sendek S.V.* About guides to auriferous quartzes what with inter-mineral transformations (as exemplified by Nezhdaninsky deposit) / S.V.Sendek, L.N.Chernik // Proceedings of Leningrad Mining Institute. 1973. Vol.65. N 2. P.43-52.

10. *Sendek S.V.* Characteristics of Nezhdaninsky deposit as representative of large gold ore occurrences with crushed veins / S.V.Sendek, S.M.Sychev // Unique deposits of useful mineral in the Russia. Regularities of formation and distribution. Saint Petersburg, 1996. P.30-38.

11. *Sendek S.V.* Structure of metal stocks as consequence of genetic features of mineralization // Proceedings of Mining Institute. Saint Petersburg, 1993. Vol.137. P.28-38.

12. *Sendek S.V.* Manifestation of entropy law of distribution of gold weight at ore-formation // Proceedings of Mining Institute. Saint Petersburg, 2009. Vol.183. P.112-126.

13. *Silichev M.K.* Geological position and features of structure Nezhdaninsky gold deposit // Geology of ore deposits. Moscow, 1970. Vol.12. N 2. P.96-102.