О МЕТОДИКЕ ИЗУЧЕНИЯ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПОИСКОВЫХ РАБОТ (НА ПРИМЕРЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ЛОГ 26 ТОПОЛЬНИНСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ, АЛТАЙСКИЙ КРАЙ)

В.А.Рожченко
с. Малоенисейское

В золотосодержащих рудах золото присутствует главным образом в самородном виде. Оно обычно содержится в кварце и сульфидах, но может присутствовать и в других породообразующих минералах, часто в рассеянном тонкодисперсном состоянии.

При проведении геологоразведочных работ, конечным результатом которых является подсчет запасов или оценка прогнозных ресурсов золота, изучение золотосодержащих руд регламентировано Методическими рекомендациями [Методические рекомендации…, 2007], которые разработаны Федеральным государственным учреждением «Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых» (ФГУ ГКЗ) и утверждены распоряжением МПР России от 05.06. 2007 г. № 37-Р.

Методы изучения золотосодержащих руд подробно изложены в книге «Методика исследования золотосодержащих руд» [Зеленов, 1978], которая и по сей день является практическим руководством по изучению вещественного состава и технологических свойств золотосодержащих руд.

Предварительная оценка промышленной значимости руд начинается на поисковой стадии изучения, при проведении которой изучается масштаб оруденения, вещественный состав и, в меньшей степени, технологические свойства потенциально золотых руд.

Примером изучения вещественного состава и технологических свойств золотосодержащих руд на поисковой стадии могут являться руды проявления Лог 26, которое находится на ЮВ Топольнинского рудного поля, в Солонешенском районе Алтайского края. Топольнинское рудное поле является составной частью Ануйского медно-золоторудно-россыпного узла Северо-Алтайского золоторудного пояса.

Первые признаки золоторудной минерализации в левом борту лога № 26 были выявлены в 1954 г. Е.Е. Перфиловым. С 1954 по 2002 гг. изучение руд и рудовмещающих пород осуществлялось периодически по общеизвестной методике, при этом химический состав руд и пород изучался с применением полуколичественного спектрального, спектрохимического и пробирного анализов бороздовых и керновых проб, а минеральный состав изучался в шлифах, аншлифах и шлихах [Розен, 1957; Рузаев и др., 2002]. Промышленные концентрации золота были выявлены в роговиках, ороговикованных алевролитах, мергелях, ороговикованных алевролитах с линзами известняков, в скарнированных известняках и андезитах. Минеральный состав руд: кварц, полевой шпат, слюды, кальцит, гранат, эпидот, пироксен, везувиан, скаполит. Из рудных минералов были выявлены пирит, халькопирит, арсенопирит и галенит. В совокупности их количество не превышало 0,2 %. Спорадически отмечались тетрадимит, бисмутит, халькозин, киноварь, хромит, шеелит, гематит, касситерит, висмутин. Золото самородное установлено в микротрещинах породообразующих минералов и частично изучено [Рузаев и др., 2002].

В 2001 г. вещественный состав и технологические свойства руд проявления Лог 26 были изучены Иркутским научно-исследовательским институтом благородных и редких металлов и алмазов (ОАО «ИРГИРЕДМЕТ») [Коган и др.,2001].

Объектом изучения была лабораторная проба массой 289 кг, отобранная из золотосодержащей руды, вскрытой канавой 201 в инт. 1,0-17,0 м в северной части проявления. Мате-

риал пробы состоял из скарноподобной породы и роговика с незначительной примесью диоритового порфирита. Содержание золота 3,3-3,8 г/т, серебра < 2 г/т. По результатам химического и фазового анализа, в пробе не обнаружены: $S_{общ.}$,$S_{окисл.}$,$S_{сульф.}$,Sb, Pb, Ni. Содержание Co, WO_3, Cu, Se, Te, Sn составило < 0,001 %, а остальных элементов (%): Zn – 0,007, Bi – 0,002, Mo – 0,001, Cd – 0,005, Ba – 0,032, As – 0,001, $Fe_{общ.}$ – 5,31, $Fe_{окисл.}$ – 1,25. Кроме того, в пробе содержатся (%): SiO_2 – 47,14, Al_2O_3 – 13,00, CaO – 19,63, Fe_2O_3 – 7,59, MgO – 3,57, MnO – 0,14, TiO_2 – 0,72, K_2O – 3,80, Na_2O– 2,82, P_2O_5 – 0,21. Минеральный состав пробы (%): диопсид – 64,8; кварц – 12,0; гранаты – 9,5; полевые шпаты, плагиоклазы, слюды и каолин в совокупности – 8,0; амфиболы с хлоритом – 4,2; оксиды железа и марганца – 1,2; апатит, сфен, флюорит, циркон, барит, шеелит и эпидот в совокупности – 0,3. По результатам фазового анализа, общее количество цианируемого золота в руде составляет 94 %, в том числе свободного амальгамирующегося - 57,6 % и в сростках – 36,4 %. Золото тонковкрапленное в породообразующих минералах составляет 6 %, а золото, заключенное в сульфидах, не выявлено.

В изученной пробе весовое количество свободного золота в классе крупности +0,074... -2 мм составляет 44,1 %, а в классе -0,074 мм – 55,9 %.

Таким образом, по результатам химического, фазового и минералогического анализов, в пробе не были обнаружены сульфиды и теллуриды, то есть по признаку наличия промышленно ценных компонентов руда монометальная. Золото присутствует в самородном виде и ассоциирует со всеми породообразующими минералами, его проба от 890 ‰ до 978 ‰ (6 определений). В золоте постоянно присутствует серебро от 1,91 до 2,11 % и медь от 0,01 до 0,02 %. Извлечение золота в концентрат при гравитационном обогащении руды, измельченной до 2 мм, составило от 37,63 до 45,05 %, а при обогащении материала крупностью -0,2мм – 55,25 %. После цианирования хвостов гравитации общее извлечение золота составило 95,52 %. При сорбционном цианировании исходной руды извлекается 94-95 % золота, при кучном выщелачивании – 56-61 %. Для переработки руд рекомендовано два варианта технологических схем: гравитация плюс цианирование хвостов гравитации и сорбционное цианирование исходной руды [Коган, 2001].

В 1996 – 2013 гг. сотрудниками Алтайской государственной академии образования имени В.М.Шукшина (АГАО) в Солонешенском рудном районе были выполнены научно-исследовательские работы, в том числе «Исследование закономерностей формирования редкометалльного и золото-черносланцевого оруденения» [Гусев и др., 2013]. Исследователями «…изучены более детально рудовмещающие породы, магматизм и минерализация месторождения Лог № 26, что позволило рассматривать его как весьма перспективный золото-черносланцевый объект. Золотоносные породы представляют собой скарноиды…» [Гусев и др., 2013, с. 173]. В осадочных породах установлен углерод органический ($C_{орг}$) в количестве от 0,3 до 1,5 %, сапропелевого типа, обладающий адсорбционными свойствами. В ороговикованных и метасоматически измененных породах содержание $C_{орг}$ уменьшается до 0,1 – 0,9 %. В рудах и во вмещающих породах выявлены и изучены три генерации пирита, галенит, две разновидности арсенопирита, халькопирит, халькозин, борнит и тетрадимит, а общее количество сульфидов не более 2 %. В перечисленных минералах количественно определены элементы – примеси, включая и золото, о котором более подробно будет изложено ниже.

В 2012-2014 гг. в Топольнинском рудном поле были продолжены поисковые работы на золото ОАО «Горно-Алтайскаяэкспедиция», в том числе в пределах проявления Лог 26 было пройдено 6 канав суммарной протяженностью 825,4 м, пробурено 4 скважины общим объемом 990,7 м, продолжалось изучение вещественного состава золотосодержащих руд [Рожченко и др., 2014].

По результатам выполненных и с учетом предшествующих работ, уточнено геологическое строение проявления, получены дополнительные данные по вещественному составу золотосодержащих руд и оценены прогнозные ресурсы золота категории P_1.

Проявление Лог 26 локализовано в северо-восточной части Нижнекараминского тектонического блока, сложенного осадочными карбонатно-терригенными породами полатин-

Рис. 1. Схематический геологический план проявления Лог 26 (а) и геологический разрез по линии А–Б (б).

1-6 - полатинская свита раннего силура: 1 – известняки белые и светло-серые, мраморизованные, 2 – известняки углеродистые, 3 – известняки детритовые светло-серые, 4 – мергели, 5 – алевролиты, аргиллиты, 6 – алевролиты и аргиллиты ороговикованные; 7-12 -дайки топольнинского габбро-гранодиорит-гранитового комплекса среднего девона: 7 – гранит-порфиры, плагиогранит-порфиры, риолиты, риодациты, 8 – гранодиориты, гранодиорит-порфиры, тоналиты, тоналит-порфиры, 9 – диориты, кварцевые диориты, диоритовые порфириты, кварцевые диоритовые порфириты, 10 – диоритовые порфириты ороговикованные, 11 – долериты и долериты субщелочные, 12 – дациандезиты ороговикованные; 13 – роговики; 14 – скарноиды; 15 – геологические границы; 16 – золоторудные тела.

ской свиты раннего силура, прорванными дайками различного состава (рис. 1). Карбонатно-терригенные отложения имеют крутое (60–85°) юго-западное падение. Дайковые тела топольнинского габбро-гранодиорит-гранитового комплекса среднего девона преимущественно субслойные, редко СВ простирания. Породы в разной степени подвергнуты контактово-метаморфическим и, частично, метасоматическим изменениям.

Выходы золоторудных тел прослеживаются на приводораздельном склоне ЮЗ экспозиции и в водораздельной части между логом № 26 и руч. Рыбный; простирание СЗ. Оруденение приурочено к интервалу перехода терригенных отложений к толще известняков. Данный интервал характеризуется фациальной изменчивостью пород.

По результатам проведенных работ, оконтурено 8 рудных тел, в том числе 6 с кондиционными ресурсами. Рудные тела прослежены по простиранию канавами через 15-200 м, скважинами через 20-200 м, а по падению – от 15 до 230 м.

Из 6 рудных тел 4 пластообразной и 2 линзообразной формы. Их простирание от СЗ до ССВ, падение крутое (60-85°) ЮЗЗ. Длина рудных тел от 200 до 800 м, истинная мощность от 0,9 до 4,6 м. Золоторудные тела не имеют четких геологических границ и выделяются по данным опробования, они не выдержанные по простиранию и по мощности, выклинивание постепенное, по отношению к вмещающим породам они согласные или контактовые. Погружение рудных тел ССЗ. В зоне гипергенеза они дезинтегрированы и частично лимонитизированы до глубины 1-10 м от поверхности. Содержание золота в рудных пересечениях от 0,54 до 7,25 г/т, а в рудных телах – от 1,25 до 2,59 г/т, среднее – 2, 01 г /т. Содержание серебра в рудных пересечениях < 0,20 г/т. Прогнозные ресурсы золота категории P_1 – 6,99 т. По характеристикам изменчивости основных свойств оруденения [Методические рекомендации…, 2007,с. 47] проявление Лог 26 относится ко второй группе сложности геологического строения.

Имеющиеся конкретные золоторудные пересечения свидетельствуют о том, что около 90 % прогнозных ресурсов золота локализовано в рудных телах, сложенных породами, отнесенными к скарноидам [Окулов и др., 2016, с. 60], которые состоят преимущественно из диопсида, граната, кварца и полевых шпатов, в подчинении амфиболы, хлорит, эпидот, цоизит, кальцит, пренит. Редко отмечается неравномерная вкрапленность сульфидов (пирит, арсенопирит, халькопирит, борнит, халькозин, блеклая руда) и теллуридов в количестве не превышающем 0,5 %. Структура скарноидов гранобластовая и микрогранобластовая, текстура полосчатая, пятнистая; отмечаются фрагменты слойков мраморизованного известняка, мергеля, алевролита углеродистого, песчаников, то есть пород, по которым, видимо, скарноиды образовались.

Скарноиды визуально, а также по минеральному и химическому составу, схожи с роговиками и весьма существенно отличаются от скарнов, которые в Топольнинском рудном поле распространены на участках Сухая грива, Чертова Грива, Чертова Яма и Кирпичный. Это отличие подтверждается результатами химического анализа керновых и бороздовых проб, содержащих золото от 0,18 до 9,32 г/т. (табл. 1).

Около 10 % прогнозных ресурсов золота локализовано в жильно-прожилковых зонах [Окулов и др., 2016, с. 61] измененных риолитов, риодацитов и кварцевых монцодиорит-порфиритах. В перечисленных породах отмечаются различно ориентированные прожилки кварца в количестве от 1 до 5 % от объема породы, а также отмечается единичная вкрапленность пирита и арсенопирита.

Таким образом, руководствуясь методическими рекомендациями [Методические рекомендации…, 2007], по минеральному составу можно выделить два типа руд. Руды, представленные скарноидами, следует условно отнести к золото-силикатному типу [Методические рекомендации…, 2007, с. 7], а руды, представленные вулканическими породами с жильно-прожилковыми зонами, – к золото-кварцевому или золото-сульфидно-кварцевому типу [Методические рекомендации…, 2007, с. 4].

Определение содержания золота методом предварительного гравитационного концентрирования было проведено в ОАО «Западно-Сибирский испытательный центр» (ОАО

1. Химический состав золотосодержащих скарноидов, роговиков и скарнов Топольнинского рудного поля.

Наименование пород	Количество проб, шт.	Среднее содержание, в мас. %											
		SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	$S_{общ.}$
Скарноиды	33	44,28	0,55	11,05	6,94	3,41	0,20	4,45	24,96	0,76	0,99	0,12	0,10
Роговики	6	44,26	0,67	12,88	7,37	3,18	0,14	4,86	22,60	0,63	1,99	0,14	0,10
Скарны	45	40,06	0,22	7,91	16,61	2,25	1,13	1,55	28,92	0,08	0,14	0,06	0,10

«ЗСИЦ», г. Новокузнецк). Исследованиям было подвергнуто 5 хвостов обработки бороздовых проб массой от 4,4 до 4,7 кг, отобранных из золото-силикатных руд с содержанием золота по пробирному анализу от 0,54 до 8,74 г/т (среднее 2,79 г/т). По результатам испытаний, содержание золота в хвостах составило от 0,36 до 7,85 г/т (среднее 2,35 г/т), а его выход в концентрат – от 16,73 до 35,43 % (средний 30,52 %), что несколько ниже показателей технологической пробы [Коган и др., 2001 г.].

Самородное золото изучалось сотрудниками ФГУП ЦНИГРИ на монтированных аншлифах [Окулов и др., 2016]. Изучению были подвергнуты частицы золота, выделенные из 13 шлихов, полученных путем промывки хвостов обработки 7 бороздовых и 6 керновых проб, отобранных из золото-силикатных руд. Содержание золота в бороздовых пробах от 0,56 до 8,74 г/т, а в керновых – от 1,44 до 2,94 г/т. Частицы золота размером от 0,1 до 1,0 мм комковидной, интерстициальной и трещинно-прожилковой формы, его проба от 798‰ до 976‰ (9 определений). В золоте постоянно присутствует серебро от 6,29 до 20,14 мас. % и теллур от 0,015 до 0,055 мас. %, а частота встречаемости других элементов (As, Sb, Sn, Cu, Zn, Pb, Hg, W, Pt, Pd) колеблется от 89 до 22 %.

Из 15 определений пробы золота (с учетом технологической пробы) частота встречаемости пробы 798 ‰ составляет около 7 %, а в остальных случаях она от 890 до 978 ‰. Химический состав руд изучался на 11 групповых пробах, составленных из 53 рядовых проб (табл. 2).

Групповые пробы были проанализированы количественным химическим и фазовым анализом в ОАО «Западно-Сибирский испытательный центр» (ОАО «ЗСИЦ», г. Новокузнецк), а силикатный анализ выполнен в ООО «Химико-аналитический центр Плазма» (г. Томск).

Всего, с учетом 16 бороздовых проб, вошедших в состав технологической пробы, аналитическим исследованиям было подвергнуто 37,4 % от общего количества рядовых проб, участвующих в оценке прогнозных ресурсов золота категории P_1. Результаты анализов в табл. 3. Сульфидные формы мышьяка и сурьмы не определялись по причине их малого общего содержания.

2. Распределение групповых и рядовых проб по типам руд

Тип руды	Количество групповых проб, шт.			Количество рядовых проб, шт.		
	Всего	В том числе из проб		Всего	В том числе	
		бороздовых	керновых		бороздовых	керновых
Золото-силикатный	7	4	3	28	21	7
Золото-кварцевый	4	-	4	25	-	25
Итого	11	4	7	53	21	32

3. Химический состав минеральных типов золотосодержащих руд проявления Лог 26

Компоненты	Руды золото-силикатные			Руды золото-кварцевые		
	Содержание, в мас. %; Au, Ag и Hg, в г/т					
	от	до	среднее	от	до	среднее
Au	0,68	3,60	1,89	0,68	1,40	0,80
Ag	< 2,00	< 2,00	< 2,00	< 2,00	< 2,00	< 2,00
SiO_2	37,38	49,95	43,86	59,45	74,97	67,00
Al_2O_3	6,71	12,95	11,11	11,64	13,64	12,82
TiO_2	0,298	0,670	0,562	0,265	0,660	0,416
Fe_2O_3	4,13	7,37	6,61	2,99	7,25	4,70
FeO	1,53	3,99	3,12	2,55	5,12	3,48
CaO	21,21	32,48	25,73	2,10	11,08	7,65
MgO	2,32	5,46	4,42	0,94	3,09	1,14
MnO	0,126	0,226	0,168	0,054	0,122	0,095
Na_2O	0,305	1,08	0,60	2,26	2,99	2,71
K_2O	0,275	1,990	1,084	2,75	4,11	3,18
P_2O_5	0,061	0,138	0,114	0,088	0,135	0,103
S общая	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
S сульфид.	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Cu общая	0,005	0,046	0,012	0,010	0,025	0,018
Cu первичных сульфидов	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Cu вторичных сульфидов	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Pbобщий	< 0,02	< 0,03	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Pbсульфид.	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Zn общий	0,005	0,048	0,013	0,005	0,007	0,006
Zn сульфид.	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Fe общее	2,90	4,97	4,54	2,08	4,92	3,26
Fe пирита	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15
As	0,001	0,025	0,004	0,001	0,001	0,001
Sb	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Bi	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Mo	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Se	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Te	0,0013	0,0023	0,0016	0,0012	0,0019	0,0017
Hg	0,01	0,14	0,038	0,02	0,06	0,035
C орг.	0,03	0,23	0,12	0,01	0,15	0,07
C общий	0,20	4,36	1,33	0,04	0,39	0,20
CO_2	0,61	15,14	4,41	0,10	0,88	0,48

Из таблицы 3 следует, что выделенные два типа руд различаются не только по минеральному составу, но и по количеству некоторых химических компонентов (Au, SiO_2, CaO, MgO, Na_2O, K_2O, $C_{орг}$, $C_{общ}$, CO_2). По содержанию SiO_2 руды золото-силикатные близки к рудам вышеописанной технологической пробы (SiO_2от 37,38 до 47,14 %), но существенно отличаются от золото-кварцевых руд, в которых SiO_2от 59,45 до 74,97 %. Содержание серы общей и сульфидной находится на уровне чувствительности анализа. Различие по качеству и количеству компонентов, входящих в состав сульфидов и теллуридов в золото-силикатных и золото-кварцевых рудах, практически отсутствуют. Весьма низкие содержания попутных полезных компонентов и вредных примесей, часто на уровне или ниже порога чувствительности химического анализа, свидетельствуют об относительной монометальности руд, то есть руды существенно золотые.

Руды первичные и руды из зоны поверхностного гипергенеза по химическому составу (табл. 4) различаются незначительно. Содержание серы сульфидной в тех и других рудах

4. Химический состав первичных золотосодержащих руд
и руд из зоны поверхностного гипергенеза

Компоненты	Руды первичные (7 групповых проб)			Руды из зоны гипергенеза (4 групповые пробы)		
	Содержание, в мас. %; Au, Ag и Hg, в г/т					
	от	до	среднее	от	до	среднее
Au	0,68	3,60	1,45	0,68	3,04	1,57
Ag	< 2,00	< 2,00	< 2,00	< 2,00	< 2,00	< 2,00
S общая	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
S сульфид.	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Cu общая	0,005	0,046	0,018	0,005	0,012	0,007
Cu первичных сульфидов	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Pbобщий	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,03	< 0,02
Pbсульфид.	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Zn общий	0,005	0,009	0,007	0,005	0,048	0,017
Zn сульфид.	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Fe общее	2,08	4,96	3,88	2,90	4,97	4,42
Fe пирита	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15
As	0,001	0,025	0,004	0,001	0,001	0,001
Te	0,0012	0,0019	0,0016	0,0013	0,0023	0,0016
Hg	0,01	0,14	0,044	0,01	0,04	0,025
C орг.	0,01	0,15	0,06	0,12	0,23	0,18
C общий	0,04	0,85	0,36	0,90	4,36	1,90
CO_2	0,10	2,90	1,10	2,64	15,14	6,29
CaO	2,10	27,60	15,81	21,21	32,48	25,02

находится на уровне чувствительности анализа, что свидетельствует о весьма низком общем количестве сульфидов. В первичных рудах следует ожидать незначительное количество сульфидов железа, меди и мышьяка, а также теллуридов. В рудах из зоны гипергенеза увеличение углерода органического может свидетельствовать о наличии в пробах растительных остатков, а повышенные концентрации CO_2и CaO – о присутствии натечных форм кальцита.

На основании вышеизложенного можно заключить, что количество сульфидов и теллуридов ожидается одинаково низким в первичных золото-силикатных и в золото-кварцевых рудах, глубина зоны выветривания не превышает 10 м и ею можно пренебречь, основным полезным ископаемым является золото, содержание которого в минералах изучено А.И. Гусевым и др. [Гусев и др., 2013], в рудах отсутствуют попутные полезные компоненты и вредные примеси. Вышеперечисленные факты позволяют составить общий предварительный баланс распределения золота в рудах по формам минеральных соединений. Для составления баланса использован перечень основных минералов (табл. 5), входящих в состав руд, в том числе сульфидов и теллуридов, определенных по результатам петрографических и минераграфических исследований. Затем, с учетом результатов вышеприведенного химического, фазового анализов и теоретического содержания элементов в минералах, расчетным путем определено количество каждого сульфида и тетрадимита. Среднее количество молибденита в руде 0,01%, но он в таблицу не включен по той причине, что в нем не определялось содержание золота, которое в каждом минерале принято по данным А.И.Гусева и др. [Гусев и др., 2013, с. 171, 175, 177], которыми было выявлено три генерации пирита, в том числе и фрамбоидальный, в расчет включено содержание золота в пирите III, а также ими установлено две разновидности арсенопирита с содержанием золота в одном 45 и 125 г/т, а во второй – 1400 г/т, в расчет принято среднее содержание золота 742,5 г/т. На основании перечисленных данных составлен предварительный баланс распределения золота в рудах (табл. 5), исходя из его среднего содержания 2,01 г/т, которое апробировано в ФГУП ЦНИГРИ по состоянию на 01. 01. 2015 года.

5. Предварительный баланс распределения золота в рудах проявления Лог 26 по формам минеральных соединений

№ п/п	Наименование минералов и их химические формулы	Количество в золотосодержащей руде, %			Содержание Au в минерале, г/т (c)	Содержание Au в руде, г/т $\frac{nxc}{100}$	Количество Au в руде, %
		от	до	среднее (n)			
1	Пирит FeS_2	0,16	0,16	0,16	10,1	0,016	0,80
2	ГаленитPbS	0,011	0,035	0,014	3	0,0004	0,02
3	Арсенопирит FeAsS	0,002	0,05	0,006	742,5	0,045	2,24
4	Халькопирит $CuFeS_2$	0,0003	0,027	0,0084	5	0,0004	0,02
5	Халькозин Cu_2S	0,0025	0,027	0,0084	180	0,015	0,75
6	Борнит Cu_5FeS_4	0,0003	0,027	0,0085	85,6	0,007	0,35
7	Итого	0,176	0,326	0,205		0,084	4,18
8	Тетрадимит Bi_2Te_2S	0,003	0,006	0,004	1800	0,07	3,48
9	Итого (стр. 7+8)	0,179	0,332	0,209		0,154	7,66
10	Породообразующие			99,791		1,856	92,34
11	Всего (стр. 9+10)			100		2,01	100

Таким образом, расчетные данные показывают, что среднее количество сульфидов и теллуридов в руде в совокупности не превышают 0,3 % и на их долю приходится 7,8 % всего золота, а 92,2 % самородного золота находится в породообразующих минералах, и тем самым уточнены выводы, сделанные сотрудниками ОАО «ИРГИРЕДМЕТ» в 2001 г. [Коган и др., 2001]. Уточнение заключается в том, что в зоне поверхностного гипергенеза золотосодержащие руды практически монометалльные, а ниже этой зоны в руде появляется незначительное количество сульфидов и теллуридов.

Объемная масса руд определена на 56 образцах методом гидростатического взвешивания, в том числе на 16 образцах с предварительным парафинированием, и составляет для золото-силикатных руд (40 образцов) от 2,94 до 3,21 т/м^3, средняя – 3,07 т/м^3, а для золото-кварцевых руд (16 образцов) – от 2,61 до 2,79 т/м^3, средняя – 2,66 т/м^3.

Основные выводы по изучению золотосодержащих руд проявления Лог 26 соответствуют методическим рекомендациям [Методические рекомендации…, 2007, с. 28, 29] и сводятся к следующему:

– в результате изучения вещественного состава руд предварительно установлены две их природные разновидности – золото-силикатные и золото-кварцевые руды, отличающиеся химическим, минеральным составом, структурно-текстурными особенностями и величиной объемной массы;

– предварительно изучены технологические свойства золото- силикатных руд, переработка которых возможна по двум схемам: гравитация плюс цианирование хвостов гравитации или сорбционное цианирование исходной руды;

– золото-кварцевые руды, содержащие $SiO_2 > 60$ %, $Al_2O_3 < 13$ %, As < 0,8 % и Sb < 0,3 %, могут использоваться в качестве флюса на металлургических заводах [Методические рекомендации…, 2007,с. 31, 34, 35];

– предварительно выделенные две разновидности руд могут являться и самостоятельными промышленными (технологическими) типами, селективная отработка которых возможна открытым способом, а схемы их раздельной переработки уточнятся при проведении оценочных и разведочных работ.

В 2012-2014 гг. соисполнителем гос. контракта по объекту «Поиски золота в пределах Топольнинского рудного поля (Алтайский край)» являлся «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (НИ ТПУ) по разделу «Изучение вещественного состава руд и околорудных метасоматитов золоторудных проявлений Топольнинского руд-

ного поля (Алтайский край)». Сотрудниками университета под руководством д-ра геол.-мин. наук В.Г. Ворошилова в золотосодержащих рудах и во вмещающих породах проявления Лог 26 частично изучены породообразующие минералы, сульфиды, теллуриды и составлена схема последовательности минералообразования участка Лог 26 [Логвиненко, Тимкин, 2014].

Опыт изучения руд золота и вмещающих пород рудопроявлений Топольнинского рудного поля на поисковой стадии позволяет рекомендовать изучение их вещественного состава по нижеописанной методике.

На начальной стадии изучения определяется сам предмет изучения, т.е. по результатам пробирного анализа рядовых бороздовых и керновых проб оконтуриваются золоторудные пересечения с использованием кондиций, применительных к данному региону, а также по результатам спектрального анализа рядовых проб предварительно определяется химический состав руд.

Золоторудные пересечения изучаются макроскопически непосредственно в горных выработках и в керне скважин. В процессе изучения отбираются образцы, которые должны представлять все разнородные составляющие руды (первичные и окисленные минералы, вмещающие породы, сростки минералов). Образцы также необходимы для определения объемной массы руды. Из наиболее характерных образцов изготавливаются шлифы прозрачные, прозрачно-полированные и полированные (аншлифы), которые затем изучаются под микроскопом.

Часто шлифы, изготовленные из образцов, не являются представительными для всего золоторудного пересечения и тем более для руд всего рудопроявления, поэтому в процессе их изучения целесообразно ограничиться качественным определением минералов, в том числе и качественной характеристикой самородного золота. Количество минералов лучше определять на брикетных шлифах, изготовленных из измельченного материала руд групповых проб, которые являются представительными для изучения минерального, химического состава руд и фазового анализа рудного золота.

«Порядок объединения рядовых проб в групповые, их размещение и общее количество должны обеспечивать равномерное опробование основных разновидностей руд на попутные компоненты и вредные примеси и выяснение закономерностей изменения их содержаний по простиранию и падению рудных тел» [Методические рекомендации…, 2007, с. 25].

Масса одной групповой пробы складывается из совокупности масс отдельных навесок, необходимых для проведения лабораторных исследований, которые, согласно Методическим рекомендациям [Методические рекомендации…, 2007], должны сводиться к следующему:

- для изучения минерального состава руд достаточно изготовить два брикетных шлифа, из которых один прозрачный, а второй полированный (аншлиф), и для этого потребуется 100-150 г материала руд, измельченного до 2 мм;

- для проведения фазового анализа рудного золота необходимо 0,8-1,0 кг материала руд с размером частиц не более 2 мм;

- химический, фазовый анализ руд и пробирный анализ на платиноиды возможен из навески массой 300-500 г, истертой до 0,074 мм;

- определение содержания основных компонентов (золота и серебра) целесообразно проводить с предварительным гравитационным концентрированием, которое позволяет существенно увеличить точность определений. Для проведения такого анализа В.И.Зеленов считает, что достаточно 1-2 кг [Зеленов, 1978, с.45], а по данным ФГУП ЦНИГРИ – необходима навеска массой не менее 4 кг [Методика…, 2009, с.6], что возможно только при анализе бороздовых проб, а при отборе одной рядовой пробы из половинки керна диаметром 59 мм и длиной 1 м ее масса составит всего около 3,5 кг, и если групповая проба будет представлена одной такой пробой, то ее масса будет не более 2,8 кг и для проведения анализа по предлагаемой методике возможно использовать навеску только массой 1-1,2 кг, измельченной до 0,1 мм.

Таким образом, масса одной групповой пробы должна составлять не менее 2,8 кг, а ее максимальная масса может доходить до 6 кг, и тогда возможно определение золота и серебра с предварительным гравитационным концентрированием из навески массой 4-5 кг.

Как правило, групповые пробы должны составляться из дубликатов рядовых керновых и бороздовых проб. В процессе обработки от каждой рядовой пробы оставляется дубликат массой около 500 г для возможного проведения рядового пробирного анализа на золото и серебро, а также внутреннего и внешнего геологического контроля. Но вышеуказанной массы одного дубликата недостаточно для проведения исследований по предлагаемой методике, а оставление дубликатов большой массы связано с неоправданными затратами на их хранение. Поэтому для составления групповых проб предлагается использовать «хвосты» обработки рядовых проб.

Таким образом, по результатам микроскопического изучения всех шлифов, в том числе и брикетных, будет определен петрографический, минеральный состав руд, будут описаны отдельные минералы и дана количественная оценка их распространенности, а также будут изучены «текстурные и структурные особенности руд (форма и размер минеральных частиц, характер вкрапленности минералов и срастания минеральных образований); наличие в руде различных генераций минералов; степень и характер изменений руд, происшедших в результате различных природных процессов; наличие микровключений других минералов; характеристика золота (форма, размер, структура и состояние поверхности частиц, ассоциация с другими минералами, наличие теллуридов» [Зеленов, 1978, с. 62] и будут предварительно определены минералы – носители золота, попутных полезных компонентов и вредных примесей.

Примерная схема обработки групповой пробы массой 3,2 кг приводится на рис.2.

«Микроскопическое изучение, как правило, позволяет уверенно диагностировать все наиболее распространенные в золотых и комплексных золотосодержащих рудах минералы» [Зеленов, 1978, с. 62].

Определение химического состава отдельных минералов, в том числе и золота в минералах, производится микрозондовым анализом, а растровое электронное микроскопическое исследование позволяет выявить неоднородности химического состава минералов. Изучение самородного золота с размером частиц менее 0,01 мм возможно с применением электронного микроскопа.

Для изучения химического состава руд необходимо определить перечень анализируемых компонентов по результатам спектрального анализа рядовых проб, а также с учетом химического состава изученных минералов, входящих в состав руды. Наиболее распространенный набор компонентов для определения химическим и фазовым анализом следующий: SiO_2, Al_2O_3, CaO, MgO, MnO, FeO, Fe_2O_3, TiO_2, K_2O, Na_2O, P_2O_5, H_2O, п.п.п, CO_2, $Fe_{общ.}$, $Fe_{сульф.}$, $S_{общ.}$, $S_{сульф.}$, $Cu_{общ.}$, $Cu_{сульф.}$, $Pb_{общ.}$, $Pb_{сульф.}$, $Zn_{общ.}$, $Zn_{сульф.}$, $As_{общ.}$, $As_{сульф.}$, $Sb_{общ.}$, $Sb_{сульф.}$, Bi, Mo, Se, Te, Hg, $C_{общ.}$, $C_{орг.}$. При наличии платиноидов (Os, Ir, Pt) они определяются пробирным анализом.

Определение содержания золота и серебра с предварительным гравитационным концентрированием позволит не только увеличить точность определений, но и косвенно определить в каждой пробе количество крупного ($\geq$0,07 мм) свободного золота, которое будет находиться в гравиконцентрате, а в хвостах будет золото мелкое и тонкодисперсное, связанное с минералами. При этом вычисление содержания золота в руде возможно по одной из двух нижеприведенных формул, предложенных В.И. Зеленовым [Зеленов, 1978, с. 45] (1) и ФГУП ЦНИГРИ [Методика…, 2009, с. 7,9] (2):

$$\alpha = \frac{\beta Y + \theta(100 - Y)}{100}, \qquad (1)$$

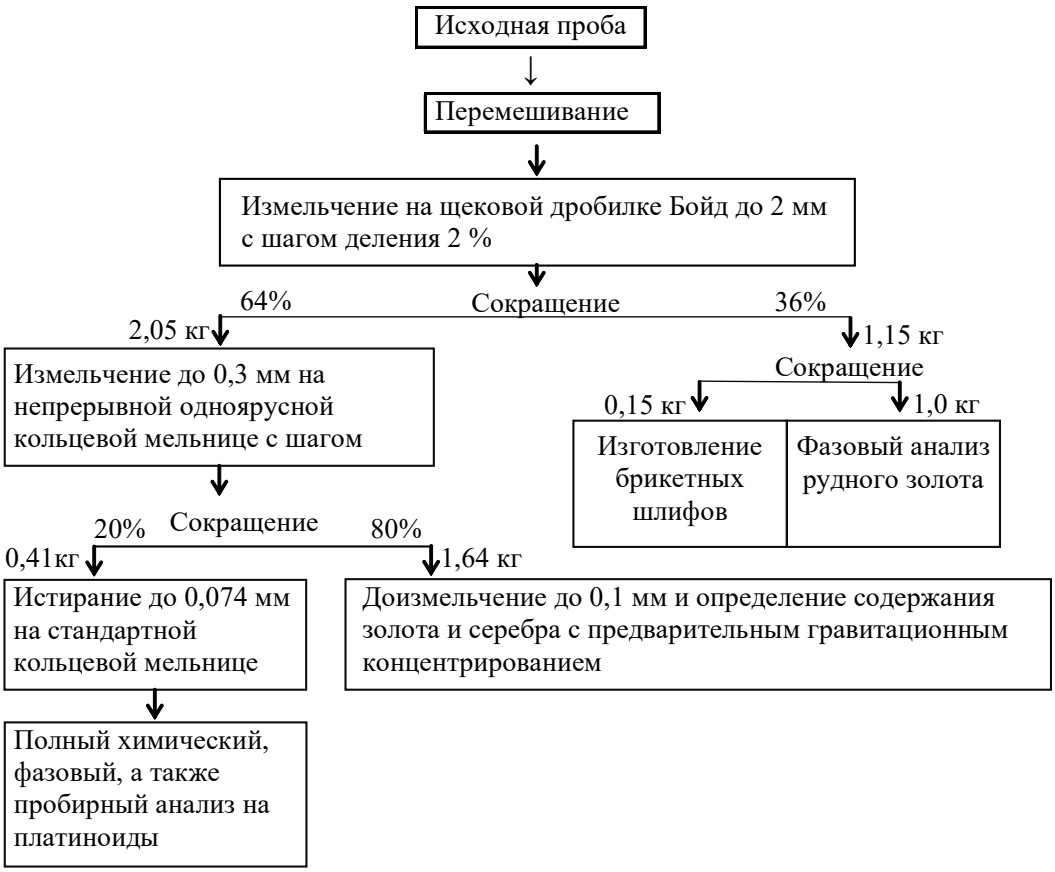

Рис. 2. Примерная схема обработки групповой пробы массой 3,2 кг.

где α, β, θ – содержание золота соответственно в исходной руде, концентрате и хвостах, г/т; Y – выход концентрата, %.

$$\alpha = \frac{m_к}{m_р}\beta_к + (1 - \frac{m_к}{m_р})\beta_{хв}, \qquad (2)$$

где: α – содержание золота в исходной руде, г/т; $m_р$ – масса руды, направленная на гравитационное концентрирование, кг; $m_к$ – масса гравитационного концентрата, кг; $\beta_к$ – содержание золота в концентрате гравитации, г/т; $\beta_{хв}$ – содержание золота в хвостах гравитации, г/т.

Фазовый анализ рудного золота позволяет определить формы нахождения золота (свободное амальгамирующееся, в сростках, с кислоторастворимыми покрытиями, заключенное в сульфидах и в кварце) и характер его связи с рудообразующими компонентами.

При низких содержаниях золота в руде полностью изучить его в шлифах практически невозможно, поэтому такое золото можно изучить, предварительно выделив его из шлихов, полученных путем промывки остатков хвостов обработки бороздовых и керновых проб, из которых были составлены групповые пробы. В этом случае представляется возможным изучить размеры и формы частиц крупного и мелкого золота, структуру частиц, химический состав золота и определить пробу отдельных его частиц, состояние поверхности частиц золота, включения в золоте, наличие сростков, размеры сростков и виды срастаний.

Изучение макросостава самородного золота проводится с применением микрозондового анализа и использованием микрорентгеноспектрального анализатора. Для анализа используются монтированные аншлифы. Изучение внутреннего строения зерен в монтированных аншлифах возможно с использованием структурного травления среза золотин «цар-

ской водкой». Анализ распределения основных примесей в самородном золоте и определение состава микровключений осуществляется при помощи сканирующего электронного микроскопа с анализирующей приставкой.

По результатам вышеприведенных исследований будет определено наличие и промышленная значимость основных, попутных полезных компонентов и вредных примесей, а также определена степень окисления руд и, с учетом петрографических и минераграфических исследований, фактического или теоретического содержания элементов в минералах, возможно, расчетным путем, уточнение количества минералов, в том числе и минералов-носителей золота, с составлением предварительного баланса распределения основных, попутных полезных компонентов и вредных примесей в руде по формам минеральных соединений.

Вышеописанная методика изучения вещественного состава золотосодержащих руд позволяет объективно и качественно изучить руды, оконтуренные даже в единичных пересечениях, с получением их предварительной промышленной характеристики. Данная методика, возможно, с уточнениями и дополнениями, может быть использована для изучения любых золотосодержащих руд при проведении поисковых, оценочных и разведочных работ.

Для изучения технологических свойств руд на поисковой стадии стандартом Российского геологического общества [Стандарт…, 1998] рекомендуется малообъемное технологическое опробование (МТО). «Задачей МТО является предварительное определение технологических свойств потенциальных руд с целью оценки промышленной значимости объектов и выбор наиболее перспективных для дальнейшего изучения. В зависимости от изученности объекта, в т.ч. установленной изменчивости вещественного состава полезного ископаемого, его масштаба, для МТО отбираются малые технологические (по всему объекту или его части без предварительной оценки вещества) и/или минералого-технологические (по природным разновидностям полезного ископаемого) пробы» [Зеленов, 1978, с. 18]. Масса одной пробы на поисковой стадии может составлять 5-10n кг [Стандарт…, 1998, с. 18].

Количество проб должно соответствовать числу природных типов руд, выделенных по результатам изучения их вещественного состава. Надо полагать, что на поисковой стадии при наличии одного, наиболее распространенного, типа руд достаточно двух малообъемных проб. Отбор одной пробы возможен бороздовым способом из окисленных руд, вскрытых канавами, а вторую пробу необходимо отобрать из второй половинки керна скважин, вскрывших первичные руды.

В заключении необходимо отметить, что сама идея описанной методики изучения золотосодержащих руд не нова и может быть использована для составления методик изучения на поисковой стадии любых руд.

Литература

Гусев А.И., Гусев Н.И., Табакаева Е.М. и др. Петрология и рудоносность магмо-рудно-метасоматических систем Солонешенского рудного района Алтая. Бийск.: АГАО им. В.М. Шукшина, 2013.

Зеленов В.И. Методика исследования золотосодержащих руд. М.: Недра, 1978.

Коган Д.И., Храмченко С.И., Комлева М.Д., Кин Л.В., Серебренников Д.А., Маринюк З.А., Цыкунова Г.В. Отчет о научно-исследовательской работе «Оценка технологических свойств золотосодержащих руд Топольнинского месторождения». – Иркутск.: ОАО «ИРГИРЕДМЕТ», 2001.

Логвиненко О.В., Тимкин Т.В. Вещественный состав и последовательность минералообразования рудопроявления Лог 26 Топольнинского золоторудного поля (Горный Алтай) // Вестник Томского государственного университета, 2014, № 383, с. 212 – 220.

Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Золото рудное. М., 2007.

Методика гравитационного концентрирования свободного золота при подготовке к анализу проб руд благородных металлов. М.: ФГУП ЦНИГРИ, 2009.

Окулов А.В., Шатилова Л.В., Рожченко В.А. Минералого-геохимическая характеристика золоторудных проявлений Топольнинского рудного поля // Руды и металлы, 2016, № 1, с. 52-62.

Рожченко В.А., Карабицина А.И., Котенко С.А. Отчет о результатах работ по объекту «Поиски золота в пределах Топольнинского рудного поля (Алтайский край)» за 2012-2014 гг. Кн. 1. – Малоенисейское: ОАО ГАЭ, 2014.

Розен М.Ф. Основные результаты работ Ануйской геологоразведочной партии за годы 1951-1956. Т. 1-2. Бийск, 1957.

Рузаев В.С., Семенцов Б.Г., Бедарев Н.П. Геологическое строение и золотоносность Топольнинского рудного поля в Горном Алтае. Отчет о поисках в Топольнинском рудном поле и поисково-оценочных работах на участках Лог 26, Баяниха и Сухая Грива, проведенных в 1996-2001 гг. – Малоенисейское, 2002.

Стандарт Российского геологического общества. СТО Рос Гео 09 – 001 – 98. Твердые полезные ископаемые и горные породы. Технологическое опробование в процессе геологоразведочных работ. Общие требования. М., 1998.