

**ЛИТОЛОГИЧЕСКИЕ И МИНЕРАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ
ЭЛЮВИАЛЬНО-ДЕЛЮВИАЛЬНЫХ НАДРУДНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ
И ПРОБЛЕМЫ ИХ ГРАВИТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ ДЛЯ
ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗОЛОТО-СЕРЕБРЯНОГО КОНЦЕНТРАТА.
(На примере рудопроявления Милоградовское, южное Приморье)**

В. М. Ненахов, Ю. Ю. Янникова, Е. В. Ненахова, Р. В. Русанов

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 15 мая 2017 г.

Аннотация: в статье приводятся краткие вещественные (литологические и минералогические) данные по технологической пробе, отобранной из надрудных элювиально-делювиальных отложений зоны «Южная» Милоградовско-золото-серебряного рудопроявления, содержащих повышенные концентрации благородных металлов. В результате гравитационного обогащения на разных видах обогатительного оборудования (концентрационном столе Gemeni, крутонаклонном концентраторе КНК, центробежно-вибрационном концентраторе ЦВК) получены продукты обогащения, изученные на предмет содержания благородных металлов. Установлено, что, не смотря на использование эффективного оборудования и методов гравитационного обогащения, достигнутая 51% степень извлечения не может считаться удовлетворительной. Значительная часть драгметаллов уходит в хвосты обогащения, что связано с тонкодисперсной формой выделения золота и серебра, находящегося в нескрытом состоянии в кварцевых зернах. Сравнение возможностей разных типов оборудования по обогащению изученных отложений подчеркивает вышесказанные стороны концентрационного стола Gemeni.

Ключевые слова: Милоградовское рудопоявление, золото, серебро, гравитационное обогащение.

**THE LITHOLOGICAL AND MINERALOGICAL FEATURES OF SUPRA-ORE
ELUVIAL-DELUVIAL DEPOSITS AND THE PROBLEMS OF THIS GRAVITATIONAL
ENRICHMENT FOR EXTRACTION THE GOLD AND SILVER CONCENTRATE.**

(On the sample of Milogradovo ore manifestation, Southern Primorye)

Abstract: the paper contains brief lithological and mineralogical data obtained from technological sample taken from supra-ore eluvial-deluvial deposits of the zone «Yuzhnaya» belonging to Milogradovo gold-silver ore manifestation that contain increased concentrations of noble metals. The products of concentration obtained in the result of gravitational enrichment on different types of concentrating equipment (concentration table Gemeni, steeply inclined concentrator SIC and centrifugal-vibrational concentrator CVC) were studied for the purpose of noble metals content. Extraction rate 51% can not be considered satisfactory in spite of application of effective equipment and methods. A considerable portion of precious metals comes to the tails. This fact is conditioned by the tiny size of unstripped gold and silver in quartz grains.

Key words: Milogradovo ore manifestation, gold, silver, gravitational enrichment.

Введение

Золото-серебряное месторождение Милоградовское приурочено к Маргаритовской вулканической депрессии кальдерного типа [1, 2, 3], внутри которой выделяется несколько сопряженных кальдер более высоких порядков (Лимовская, Бровкинская, Ново-Петропавловская). Рудопоявление локализовано в пределах Лимовской кальдеры, ограниченной дугообразными разломами [4, 5]. Рудные тела представлены как отдельными кварцевыми жилами, так и зонами прожилкования, наложенными на породы вулкано-

генного комплекса, возраст которых грубо укладывается в интервал от 70 до 50 млн лет [6].

При изучении участка «Южный» Милоградовского золото-серебряного рудопоявления в рыхлых элювиально-делювиальных отложениях были обнаружены повышенные содержания указанных благородных металлов. Встал вопрос о возможном их попутном извлечении на стадии опытно-промышленной отработки, используя наименее затратные способы, к которым относятся различные виды гравитационного обогащения. Для эффективного гравитационного обо-

гащения необходимо знать литологические (гранулометрические) и минералогические параметры как исходного, так и конечного продуктов обогащения. Главным целевым показателем, в соответствии с поставленной задачей, было количественное определение извлекаемых форм драгметаллов гравитационным методом. Помимо самородного золота и серебра, в основном, в виде электрума, в рыхлых отложениях в заметных количествах присутствуют сульфидные (аргентит, акантит) и хлоридные (кераргирит), реже другие минеральные формы серебра. В целях изучения возможностей извлечения и определения баланса полезных компонентов в дезинтегрированной рудной зоне была отобрана технологическая проба, результаты изучения которой приведены ниже.

В исходной технологической пробе по данным пробирного анализа установлены достаточно высокие содержания золота (0,7 г/т) и серебра (212,8 г/т).

Гранулометрический и литологический состав исходного материала

Технологическая проба (981 кг) подверглась изучению на предмет гранулометрического состава, для чего (10кг) были расситована на следующие гранулометрические классы: – 0,07; +0,07-0,1; +0,1-0,14; +0,14-0,25; +0,25-0,5; +0,5-1,0; +1,0-2,5; +2,5. Расситовка осуществлялась на аппарате для ситового анализа Seive Shekers AS 450 фирмы Retsch. Результаты анализа приведены в таблице (Табл. 1).

Таблица 1
Гранулометрический состав
материала технологической пробы

Гранулометрический класс	Весовые проценты, %
-0,07	5
+0,07-0,1	3
+0,1-0,14	10
+0,14-0,25	10
+0,25-0,5	5
+0,5-1,0	7
+1,0-2,5	10
+2,5	50

Материал обогащения не сортирован и состоит из глинистого, алевритового, песчаного, дресвяного и щебнистого материала, причем на долю дресвяного и щебнистого материала приходится более 55 весовых процентов.

Литологический состав обломков представлен на 40% из кварца и на 60% из туфов, в различной степени затронутых метасоматическими процессами (окварцевание, серицитизация, в меньшей степени карбонатизация), при этом, доля кварца в более мелких и тонких фракциях заметно снижается.

Минеральный состав тяжелой фракции элювиально-делювиальных отложений

Минералы тяжелой фракции извлекались из гран-класса -0,5мм, на долю которого приходится 33%.

Материал подвергался обогащению на концентрационном столе Gemini. Полученный концентрат после сушки и последующего квартования до навески 50 грамм, делился в бромформе. Выделенный тяжелый концентрат разделялся с помощью магнита Сочнева на магнитную и немагнитную фракции. Следует отметить, что заметной дифференциации по минеральному составу не отмечено (исключение – магнетит, титаномагнетит). В этой связи описание минералов тяжелой фракции приводится без разделения на группы.

Минералогический анализ производился оптико-визуальным методом (с отбором монофракций под бинокляром Altami, выводом на монитор компьютера и последующей заверкой минералогического состава на микросонде). По результатам количественного минералогического анализа установлены следующие минералы: гранат (гроссуляр) – 21%, эпидот – 20%, пирит (псевдоморфозы гидроокислов железа по пириту) – 22%, коронадит – 9%, флюорит – 5%, хлорит – 5%, англезит – 4%, магнетит – 3%, акантит – 5%, кераргирит – 2%, золото (электрум) – 2%.

В целом, состав соответствует минеральной ассоциации, связанной с кварцевыми жилами в коренном залегании, описанной ранее [6].

Эпидот. Встречается в виде зерен неправильной формы, реже в виде хорошо образованных удлинённых кристаллов моноклинно-призматического облика с характерной штриховкой, ориентированной вдоль удлинения, иногда образующих сростки и пучки. Размеры зерен: 0,05-0,2 мм. Окраска варьируется от очень слабой светло-зеленой и светло-желтовато-зеленой до насыщенной желтовато-зеленой и светло-буровато-зеленой.

Гранат. Образует идиоморфные кристаллы (размером 0,05-0,2 мм) в форме ромбододекаэдров и их сростков (по 2-4 и более индивидов). Встречаются как стекляннопозрачные разновидности, так и замутненные. Окраска в большинстве случаев бесцветна, реже слабая светло-медово-желтая, что, скорее всего, обусловлено повышенными содержаниями железа относительно бесцветных разновидностей.

Флюорит. Встречается в виде зерен неправильной формы размером 0,05-0,2 мм. В редких случаях отмечаются мелкие идиоморфные водяно-прозрачные кубические кристаллы. Окраска зерен в подавляющем большинстве случаев бесцветная, но присутствуют и единичные индивиды светло-фиолетового и светло-зеленого цвета.

Золото (электрум). Для золота характерно чрезвычайное разнообразие форм. Широко распространены выделения неправильной формы: комковидные, пластинчатые, крючковатые, скелетные, губчатые, скрученно-нитевидные (часто в сростаниях с акантитом или коронадитом). Редко отмечаются дендритовидные и проволоковидные образования. При изучении золота под электронным микроскопом в ряде зерен наблюдаются фрагменты кристаллов кубической сингонии (Рис. 1). Часто отмечается зональность, обусловленная наличием зон с различной пробностью

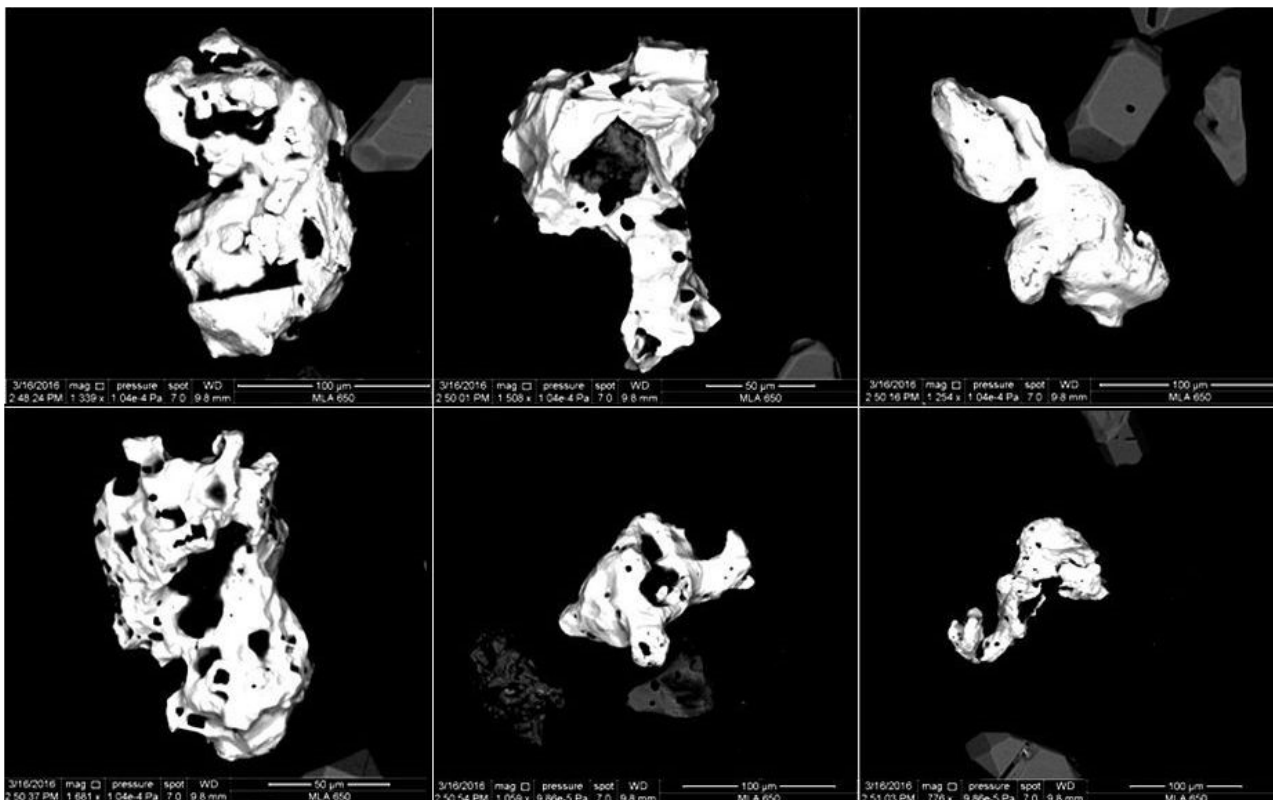


Рис. 1. Морфология гравитационно извлекаемых форм золота.

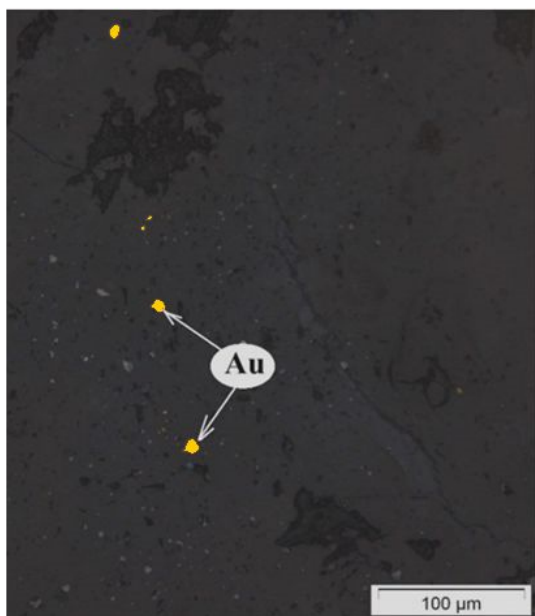


Рис. 2а. Вкрапленность золота в кварце.

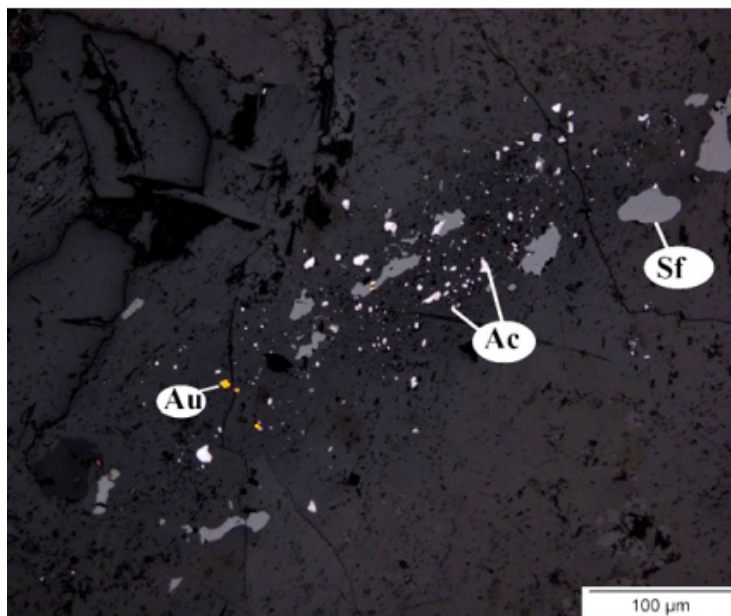


Рис. 2б. Золото-акантит-сфалеритовая сегрегация вытянуто-овальной формы (в отраженном свете).

золота. Размеры зерен – 0,05-0,25 мм с преобладанием 0,1 мм [6]. В тяжелой фракции золотины размером менее 0,05 мм не отмечены. Тем не менее, в аншлифах из кварцевых жил отмечается большое количество тончайших (0,005-0,01) изометричных, неправильной формы выделений золота как в составе сегрегаций с акантитом и сфалеритом, так и в виде самостоятельных зерен (Рис. 2а, б).

Поверхность зерен обычно неровная, изъеденная, с многочисленными углублениями, часто покрытая черными налетами сульфидов серебра. Иногда золото покрыто бурой железистой «рубашкой» и тогда оно может попадать в магнитную фракцию. Пробность золота варьирует в широких пределах. Преобладающая пробность отвечает электруму (50-70% Au), встречается как более высокопробное золото (80-87% Au),

так и более низкопробное, содержащее 44-50% Au.

Кераргирит. Характерной формой выделения кераргирита являются кубические кристаллы размером 0,08-0,25 мм, часто собранные в группы, образуя параллельные или почти параллельные срастания десятков мелких индивидов. Иногда отмечаются мелкие идиоморфные кристаллы кераргирита на поверхности зерен акантита, а также причудливые срастания кераргирита с хлоритом. Помимо кристаллов также образует почковидные и восковидные массы. При изучении зерен кераргирита под электронным микроскопом на отдельных участках восковых масс наблюдаются фрагменты мелких кристаллов кубической сингонии. Цвет поверхности индивидов весьма разнообразен – от белого и светло-серого с буроватым, реже сиреневатым оттенком до темно-серого, иногда почти черного. Характерен восковой, жирный блеск. Однако при раздавливании минерала иглой все зерна обнаруживают серебристо-белую сердцевину с металлическим или алмазным блеском. Часто на гранях кристаллов отмечаются следы разъедания в виде мелких кавернозных углублений.

Акантит. Распространенной минеральной формой серебра Милоградовского рудопроявления является акантит. Он образует выделения неправильной формы, скелетные, редко дендритовидные, обладает характерным графитово-черным цветом и металлическим блеском. Размеры зерен – 0,05 мм – 0,25 мм.

Циркон. Наиболее распространенной формой выделения циркона являются хорошо образованные бесцветные, реже розоватые или желтоватые, прозрачные кристаллы, размером 0,1-0,2 мм, характеризующиеся коэффициентами удлинения порядка 1,5-2,5 (рис. 2). По форме огранки подавляющее большинство кристаллов относится к так называемому цирконовому типу, с хорошо развитыми гранями дипирамиды (111) и призмы (110). Помимо указанной формы отмечается смешанный тип, с преобладанием граней призмы (110) и подчиненным развитием граней призмы (100). Цирконы часто зональные и содержат по несколько удлиненно-призматических затравочных зерен, ориентированных субпараллельно зонам роста кристалла.

Коронадит. Представляет собой сложный оксид свинца и марганца с общей формулой $Pb(Mn^{4+}, Mn^{2+})_8O_{16}$. Встречается в виде зерен неправильной формы (размером 0,05 – 0,3 мм) темно-серой до черной с буроватым оттенком окраски, с тусклым полуметаллическим блеском. Цвет минерала в порошке – коричнево-черный. Характеризуется крайне непостоянным составом.

Англезит. Встречается в виде бесцветных или белых, иногда с желтоватым оттенком, неправильной формы угловатых обломков размером 0,08 – 0,25 мм.

Псевдоморфозы гидроокислов железа по пириту. Неизменный пирит в пробе не отмечался, но широко распространены реликты кристаллов пирита (размером 0,05 – 0,3 мм) в форме кубиков и пентагондодекаэдров с характерной штриховкой на гранях, замещенные гидроокислами железа. Цвет таких псев-

доморфоз - красновато-бурый, темно-бурый.

Магнетит, титаномагнетит. Встречается в виде округлых или неправильной формы обломков, а также хорошо образованных октаэдрических кристаллов серовато-черного до черного цвета. Размеры зерен – 0,05 – 0,2 мм.

Хлорит. Характеризуется слюдоподобными листоватыми, чешуйчатыми и пластинчатыми, а также скрытокристаллическими агрегатами (размером 0,05 – 0,2 мм) темно-зеленой окраски различной интенсивности. Блеск – стеклянный, на плоскостях спайности – перламутровый.

Все описанные минералы при обогащении на концентраторном столе Gemeni переходят в тяжелую фракцию, а так же в промпродукты различной степени концентрации.

Определение обогатимости и степени извлекаемости полезных компонентов гравитационным способом

Проба обрабатывалась в лаборатории ВГУ с использованием гранклассификатора, концентратора Gemeni, центробежно-вибрационного концентратора (ЦВК), а также на крутонаклонном концентраторе (КНК) в МИСиСе. Для контроля выхода драгметаллов использовался пробирный анализ, который выполнялся в аналитическом центре ФГУП ЦНИГРИ. Методика обработки пробы и результаты изучения продуктов обогащения приведены ниже.

Методика обработки технологической пробы. Технологическая проба из элювиально-делювиальных отложений (981,0 кг) подверглась расситовке, дроблению, обработке на Gemeni TABLE MK.2 GT – 250, ЦВК-100-2М, КНК. Алгоритм обработки представлен в виде схемы (Рис. 3).

Расситовка. Технологическая проба в полном объеме (981,0 кг) подверглась мокрой расситовке. Цель мокрой расситовки – максимальное выделение рыхлого материала, эффективного для обогащения и извлечения тяжелой фракции в полевых условиях. Рекомендуемая крупность материала, подаваемого для питания на концентраторный стол GEMENI TABLE MK.2 GT-250, менее 1 мм [7]. Однако, при испытаниях, материал размерностью 1 – 0,5 мм (как правило, обломки пустой породы), обладая высоким весом, заполнял вогнутые желобки (перевернутые рифли) на поверхности деки концентратора, тем самым препятствуя процессу эффективного гравитационного обогащения. С учетом результатов испытаний, была выбрана размерность сита (0,5 мм).

Общий вес фракции (+0,5) составил 662,73 кг, фракции (-0,5) – 311,13 кг. Таким образом, средневзвешенное содержание на весь объем технологической пробы фракции (-0,5) составляет 31,7%, а фракции (+0,5) – 67,6%. При расситовке потери составили 0,7%. Фракция (-0,5), пригодная для извлечения полезных компонентов в полевых условиях (золото, серебро) обрабатывалась на концентраторном столе Gemeni, с доводкой концентрата на ЦВК. Фракция

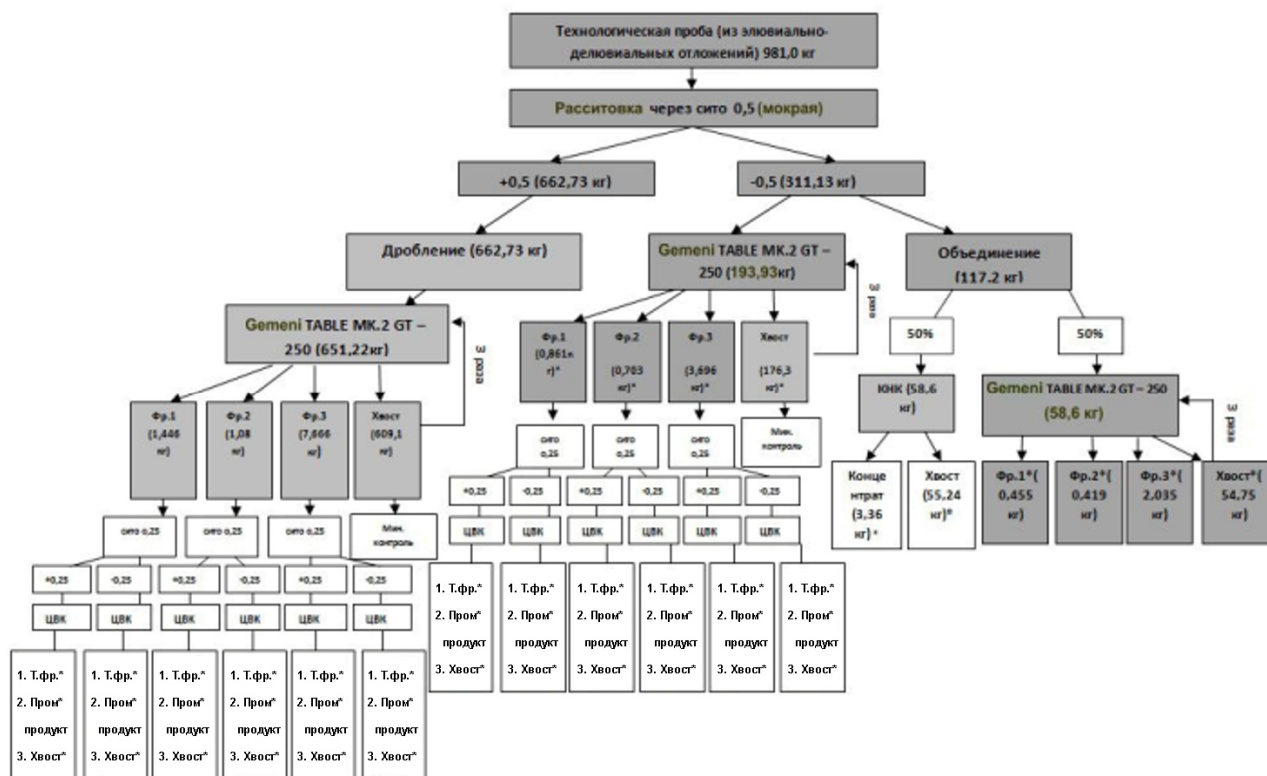


Рис. 3. Алгоритм обработки технологической пробы. * – на данном этапе производился минералогический контроль и пробный анализ.

(+0,5) обрабатывалась по следующей схеме. После мокрой расситовки фракция (+0,5 мм) просушивалась, а затем дробилась на щековой дробилке «БОЙД», с последующим доведением до -0,5 мм с помощью валковой дробилки ДВГ 200х125. Затем осуществлялась контрольная расситовка через сито 0,5 мм, при этом, фракция (+0,5 мм) составила 1,7% (11,5 кг).

С вычетом потерь, на концентрационном столе обогащались 651,22 кг технологической пробы, из-дробленной фракции (+0,5мм).

Обогащение на концентрационном столе Gemeni TABLE MK.2 GT-250

Концентрационный стол Gemeni TABLE MK.2 GT-250 предназначен для мокрого гравитационного обогащения [7]. Интенсивность и амплитуда колебаний в совокупности с изменяемым наклоном деки и набором вогнутых желобков на поверхности деки (перевернутые рифли) специально разработаны для разделения драгоценных металлов, таких как золото, серебро и платина.

Концентрационный стол имеет двойную (зеркально отображенную), незначительно наклоненную поверхность для сепарации. С одного конца подается питание, которое распределяется на две части и движется по направлению к разгрузочному краю деки с помощью возвратно-поступательных движений, создаваемых приводом. На каждой половине деки разгружаются 4 фракции: суперконцентрат (СК), концентрат (К), промпродукт (ПП) и хвосты. На деке имеются желобки

(вместо рифлей), в которых задерживаются частицы тяжелых металлов и направляются в прилегающие концентратные желобки, лежащие вдоль каждой половины деки. Каналы расположены на концах каждого концентратного желобка, и разгрузка осуществляется в продуктовые коробки. Процесс сепарации объясняется тем, что более плотные частицы (частицы с большим удельным весом) перемещаются в нижние слои и концентрируются вдоль желобков и рифлей.

Скорость подачи питания (при заявленной в паспорте концентрационного стола Gemeni до 120 кг/час) была снижена до 40-50 кг/час в стандартном режиме и до 15-20 кг/час в щадящем режиме, исходя из особенностей обогащения тонкозернистого материала, установленных опытным путем.

На концентрационном столе Gemeni в стандартном режиме были обработаны издробленные до фракции (-0,5мм) 651,22 кг технологической пробы и 193,93 кг (из 311 кг) из рыхлой части (фракция -0,5 мм). Остаток рыхлой фракции (-0,5 мм), весом 117,2 кг был перемешан до однородной консистенции и разделен на две равные части. Одна часть (58,6 кг) была промыта на концентрационном столе в щадящем режиме, а вторая (58,6 кг) отправлена на контрольную обработку на крутонаклонном концентрате (КНК).

Выход фракций после обогащения на Gemeni 193,93 кг из рыхлой части технологической пробы (фракции -0,5 мм) составил: тяжелой фракции (суперконцентрат + концентрат) – 1,564 кг (0,9%), промпродукта – 3,696 кг (2,2%), на долю хвостов пришлось

Таблица 2

Результаты обогащения 193,93 кг технологической пробы фракции (-0,5 мм) на концентрационном столе Gemeni в стандартном режиме

Номер пробы	Исходный вес, кг	Содержание фракций								Суммарный вес после обработки, кг	Потери	
		СК		К		ПП		Хвост			кг	%
		г	%	г	%	г	%	кг	%			
Технологическая	193,93	860,9	0,5	702,7	0,4	3696,3	2,2	176,317	90,6	181,577	12,353	6,4

176,317 кг (90,6%). Потери при обработке составили 12,353 кг (6,4%) (Табл. 2).

На пробирный анализ в ФГУП ЦНИГРИ (АЦ) были направлены полученные (после обработки на Gemeni 193,93 кг технологической пробы) супертяжелая (суперконцентрат) - 860,9 г, тяжелая (концентрат) - 702,7 г, промпродукт (ПП) - 3,7 кг и хвост - 176,3 кг, предварительно подвергшиеся делению на делителе RetschTypePT 100, с получением следующих навесок: 1) суперконцентрат (СК) - 97,3 г, 2) концентрат (К) - 74,7 г, 3) ПП - 215,2 г, 4) хвост - 120 г. Фракции 1, 2, 3 были дополнительно расситованы через сито 0,25 мм для установления возможной дифференциации полезных компонентов в соответствующих гранулометрических классах.

Результаты пробирного анализа (Табл. 3) показали, что наибольшая степень концентрации золота и серебра достигнута в гранклассе (-0,25) супертяжелого концентрата и составили соответственно 50,2 и 1532 г/т. В гранклассе (+0,25) содержания золота меньше почти в 4 раза (14,3 г/т), а серебра меньше, чем в 2 (986 г/т), что связано с плотностными характеристиками тяжелых частиц более высокопробного золота, относительная доля которого в тонких размерах более высокая, чем частиц чистого серебра.

Таблица 3

Результаты пробирного анализа продуктов обогащения 193,93 кг технологической пробы фракции (=0,5 мм) на концентрационном столе Gemeni в стандартном режиме

№ п/п	№ пробы	Содержание, г/т	
		Золото	Серебро
1	СК (-0,25 мм)	50,2	1532
2	К (-0,25 мм)	3,8	564
3	ПП (-0,25 мм)	0,6	253
4	СК (+0,25 мм)	14,3	986
5	К (+0,25 мм)	1,14	752
6	ПП (+0,25 мм)	0,6	318
7	Хвост (-0,5 мм)	0,85	285

Распределение продукта по степени концентрации (суперконцентрат - концентрат - промпродукт) составляет 83:6:1 для гранкласс (-0,25) и 24:2:1 (+0,25) для золота и 6:2,2:1 (-0,25); 3:2,4:1 (+0,25) для серебра соответственно. Как видно из приведенных расчетов, золото обогащается более эффективно по сравнению с серебром. Содержания в суперконцентрате в размерном классе (-0,25) для золота в 83 раза выше, чем в

промпродукте; в классе (+0,25) - лишь в 24. Для серебра эти показатели ниже (6 и 3 соответственно).

Анализ содержаний драгметаллов в хвостах обогащения показывает, что серебро в целом извлекается более эффективно по сравнению с золотом, о чем свидетельствуют данные по их содержанию в промпродукте и в хвосте (Au - 0,6 г/т и 0,85 г/т; Ag - от 253 г/т (-0,25) до 318 г/т (+0,25) и 285 г/т соответственно).

В целом, можно сделать выводы об увеличении доли Au содержаний драгметаллов в более тонких гранулометрических классах, а так же о низкой эффективности их извлечения при данном режиме обогащения (слишком высокие содержания золота и серебра в хвосте).

Отобранные на контрольную обработку на Gemeni 58,6 кг технологической пробы (фракции - 0,5 мм) были обогащены в щадящем режиме и дали суммарный выход тяжелой фракции (СК+К) в количестве 0,874 кг (1,5%), промпродукта - 2,035 кг (3,5%), на долю хвостов пришлось 54,75 кг (93,4%). Потери при обработке составили 0,941 кг (1,6%) (Табл. 4).

Пробирному анализу подверглись все продукты после контрольного обогащения 58,6 кг технологической пробы на Gemeni в щадящем режиме (Табл. 5). В щадящем режиме (Табл. 5) эффективность извлечения драгметаллов намного выше и для суперконцентрата по золоту составляет 89,35 г/т, а по серебру 3466 г/т, что по сравнению даже с гранклассом (-0,25; Табл. 3) для Au показатель выше почти в 2 раза (1,78), а для Ag более чем в 2 раза (2,26). Более высокие показатели отмечены и в промпродукте, однако, учитывая содержания драгметаллов в хвосте, степень обогащения тоже не является удовлетворительной.

Дробленый материал (651,22 кг) после обработки на концентрационном столе в стандартном режиме дал суммарный выход тяжелой фракции (СК+К) - 2,526 кг (0,4%), промпродукта (ПП) - 7,666 кг (1,3%), на долю хвостов пришлось 609,135 кг (93,1%). Потери при обработке составили 31,893 кг (4,9%) (Табл. 6). Сравнение содержаний благородных металлов в рыхлой (-0,5) и дробленой частях технологической пробы (Табл. 3 и 6), показывает, что содержания золота в рыхлой части (-0,5) пробы существенно выше, чем в дробленой (+0,5), а серебра ниже почти в 2 раза. Такое изменение соотношений драгметаллов связано, по видимому, с влиянием гипергенных процессов, более интенсивно повлиявших на вынос серебра в рыхлой, более дезинтегрированной части за счет окисления серебросодержащих минералов (акантит, керагарит).

Таблица 4

Результаты контрольного обогащения технологической пробы 58,6 кг фракции (-0,5 мм) на концентрационном столе Gemeni в щадящем режиме

Номер пробы	Исходный вес, кг	Содержание фракций								Суммарный вес после обработки, кг	Потери	
		СК		К		ПП		Хвост			кг	%
		г	%	г	%	г	%	кг	%			
Технологическая	58,6	455,4	0,8	418,7	0,7	2034,6	3,5	54,75	93,4	57,659	0,941	1,6

Таблица 5

Результаты пробирного анализа продуктов контрольного обогащения 58,6 кг технологической пробы на концентрационном столе Gemeni в щадящем режиме

№ п/п	№ пробы	Навеска, г	Содержание, г/г	
			Золото	Серебро
1	СК	152,2	89,35	3466
2	К	152,7	9,39	1720,5
3	ПП	152,6	1,1	645,5
4	Хвост	120	0,83	271

Таблица 6

Результаты обогащения и пробирного анализа издробленной части (651,22 кг) технологической пробы на концентрационном столе Gemeni в стандартном режиме

Номер пробы	Исходный вес, кг	Фракции	Содержание фракций		Суммарный вес после обработки, кг	Потери		Навеска, г	Содержание, г/г	
			г	%		кг	%		Au	Ag
Технологическая	651,22	СК	1446	0,2	619,327	31,893	4,9	158,7	35,96	3076
		К	1080	0,2				155,2	5,29	1645
		ПП	7666	1,3				152,6	0,45	535
		Хвост	609,1	93,1				120	0,27	162

Обработка

на крутонаклонном концентрате (КНК)

В отличие от большинства обогатительного обогащения (в т.ч. Gemeni), принцип действия КНК [8] основан на обогащении в восходящем водном потоке, который в ряде случаев является более эффективным по сравнению с приборами обогащения, основанными на нисходящем водном потоке.

Направленные в МИСиС 56,8 кг технологической пробы, подверглись контрольной обработке на КНК согласно ниже представленной схеме (Рис. 4).

После обогащения на КНК выход концентрата (концентрат + хвосты 2-й стадии) составил 3,363 кг (5,8 %), при повторной обработке которого получили концентрат (суперконцентрат) весом 208,3 г (0,4%) от

исходного материала. Потери были весьма незначительные, поэтому при расчете не учитывались. На пробирный анализ направлялись все продукты, выделенные на КНК (Табл. 7).

Результаты пробирного анализа продуктов обогащения свидетельствуют о более низкой степени обогащения драгметаллами в суперконцентрате КНК даже при двойной промывке. Концентрация может быть сопоставима (выше в 1,5 раза) с концентратом, полученным на Gemeni в щадящем режиме, однако в промпродукте КНК (хвост 2-й стадии), золота на 30% также больше.

Справедливости ради отметим, что оптимальный режим для КНК подобран не был из-за ограниченности по срокам ведения эксперимента.

Таблица 7

Результаты обогащения и пробирного анализа продуктов обогащения технологической пробы 58,6 кг фракции (-0,5 мм) на КНК

№ п/п	Расшифровка	Вес, г	Содержание, %	Навеска, г	Содержание, г/г	
					Au	Ag
1	Суперконцентрат	208,3	0,4	150,0	14,6	1547
2	Выжимки из 1-х хвостов	43,2	0,1	38,2	2,4	875
3	Хвосты концентрата 1-й стадии	55193,5	94,2	150,0	0,92	392
4	Хвосты концентрата 2-й стадии	3155,0	5,4	150,0	1,4	424

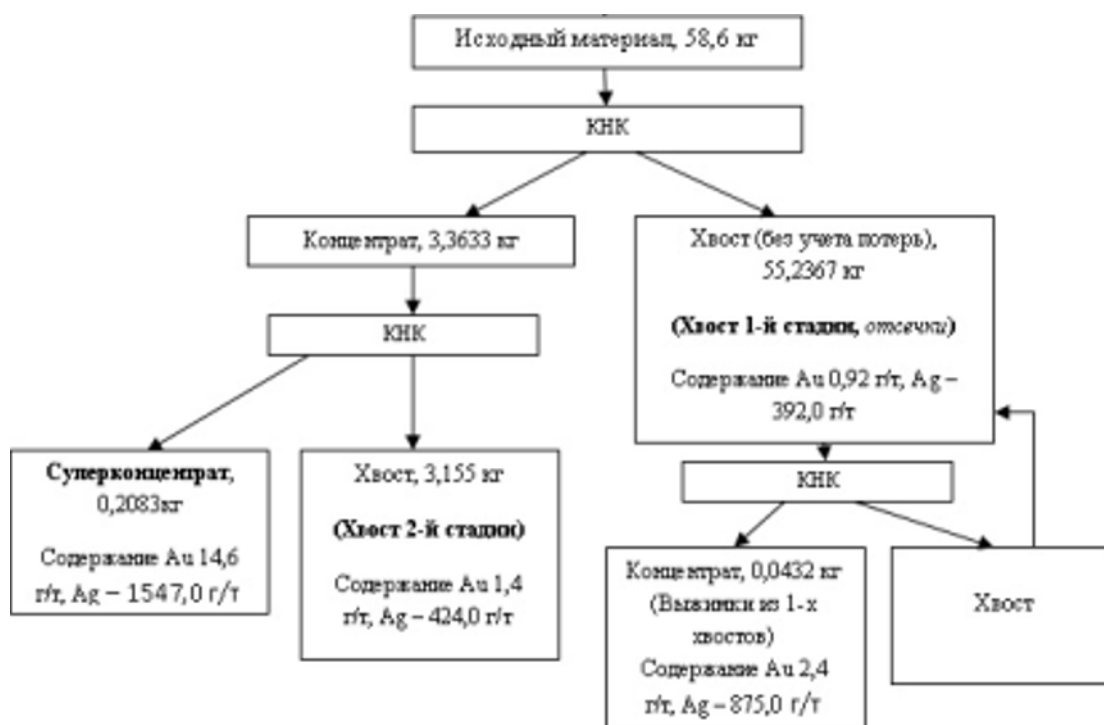


Рис. 4. Схема обработки технологической пробы фракция -0,5 мм на КНК

Обогащение на центробежно-вибрационном концентрате ЦВК-100-2М

Концентрат центробежно-вибрационный ЦВК-100-2М предназначен для высококачественного гравитационного обогащения малообъемных проб мелкозернистого материала (песков и тонкоизмельченных руд), содержащего свободное золото и платину, при проведении геологоразведочных работ с целью выявления и промышленной оценки месторождений, содержащих благородные металлы.

Обработка на ЦВК преследовала цель получения более высокой степени концентрации благородных металлов. Для чего супертяжелая (суперконцентрат), тяжелая (концентрат) и промпродукт были объединены в одну пробу, с последующей расситовкой через сито 0,25 мм, с целью увеличения эффективности обогащения. На ЦВК были отдельно обработаны обе гранулометрические фракции: - 0,25 мм и +0,25 мм (Табл. 8).

Полученные после обработки на ЦВК тяжелая

фракция, промпродукт и хвосты фракции (-0,25 мм) были расситованы через сито 0,14 мм, для установления возможной дифференциации полезных компонентов в соответствующих гранулометрических классах.

Пробирный анализ осуществлялся для всех вышеприведенных продуктов обогащения (Табл. 9).

Данные результаты подтверждают вывод о тяготеции драгметаллов к тонким гранклассам, а именно (0,25-0,14 мм). Лучшие параметры концентраций сопоставимы с суперконцентратом Gemeni в щадящем режиме, превосходя их лишь на 10-12%. Однако ожидаемого результата получено не было. Как по золоту, так и по серебру значительная доля металлов удаляется в хвосты, при этом драгметаллы распределяются в разных продуктах обогащения без ярко выраженной закономерности (Табл. 10). Высокие же концентрации золота и серебра в хвостах свидетельствуют о нецелесообразности использования ЦВК для извлечения драгметаллов из изученного материала.

Таблица 8

Результаты обогащения рыхлой части технологической пробы (фракции 1-3 после Gemeni, 4,96 кг) на ЦВК

Фракция <0,5 (после расситовки)	Фракции (после Gemeni)	Исходный вес, г	Содержание фракций (после ЦВК 100-2М)						Вес после обработки, г	Потери	
			Т. фр.		Промпродукт		Хвост			г	%
			г	%	г	%	г	%			
0,5-0,25	СК	243,1	51,0	21,0	4,8	2,0	118,2	48,6	174,0	69,1	28,4
	К	133,8	48,4	36,2	2,4	1,8	57,3	42,8	108,1	25,7	19,2
	ПП	849,1	53,3	6,3	32,8	3,9	690,0	81,3	776,1	73,0	8,6
Сумма/среднее содержание		1226,0	152,7	12,5	40,0	3,3	865,5	70,6	1058,2	167,8	13,7
-0,25	СК	521,0	57,5	11,0	20,9	4,0	433,2	83,1	511,6	9,4	1,8
	К	500,1	59,7	11,9	19,5	3,9	415,4	83,1	494,6	5,5	1,1
	ПП	2712,7	45,4	1,7	108,6	4,0	2531,0	93,3	2685,0	27,7	1,0
Сумма/среднее содержание		3733,8	162,6	4,4	149,0	4,0	3379,6	90,5	3691,2	42,6	1,1
Итого		4959,8	315,3	6,4	189,0	3,8	4245,1	85,6	4749,4	210,4	4,2

Таблица 9

Результаты пробирного анализа продуктов обогащения рыхлой части технологической пробы на ЦВК

№ п/п	Фракция ЦВК	Гранулометрический класс	Навеска, г	Содержание, г/г	
				Золото	Серебро
1	Тяжелая фракция	+0,25	137,7	23,25	1352
2		-0,14	118,7	113,0	1816
3	Промпродукт	+0,25	35,0	0,57	402,5
4		0,25-0,14	46,2	2,88	552
5		-0,14	92,8	0,72	317
6	Хвост	+0,25	111,6	0,76	393
7		0,25-0,14	139,6	8,04	1399
8		-0,14	143,7	4,08	1153

Таблица 10

Баланс распределения Au и Ag на Gemenі в стандартном режиме

Вес (исходный), кг	Фракция (Gem)	Фракция (гран)	Вес (Gem), кг	Содержание концентрата Gem от исходного, %	Содержание в концентрате		Содержание, г/г	
					Au	Ag	Au	Ag
					г/г	г/г		
193,9	Фр. 1 (суперконцентрат)	+0,25	0,2831	0,1	14,30	986,0	0,0209	1,4394
193,9		-0,25	0,5783	0,3	50,20	1532,0	0,1497	4,5684
193,9	Фр. 2 (концентрат)	+0,25	0,1638	0,1	1,14	752,0	0,0010	0,6352
193,9		-0,25	0,5448	0,3	3,80	564,0	0,0107	1,5844
193,9	Фр.3 (промпродукт)	+0,25	0,9491	0,5	0,60	318,0	0,0029	1,5563
193,9		-0,25	2,8277	1,5	0,60	253,0	0,0087	3,6890
Итого:			5,3468				0,1939	13,4727

Расчет выхода золота и серебра в технологической пробе

Анализ содержаний золота и серебра в разных продуктах и в хвостах обогащения на Gemenі показывает, что извлекаемость составляет порядка 19,5% (194 мг/т) от общего баланса золота, находящегося в исходном материале. По серебру выход составляет 3,4% (13,5 г/т). Расчеты представлены в таблице (Табл. 10). Вместе с тем, в хвостах обогащения остается значительная часть: соответственно около 80% по золоту и 96% по серебру. Это свидетельствует о том, что основная масса металлического золота и серебра (в последнем случае еще и минералы серебра) находятся в тонкодисперсном нескрытом состоянии в кварце, а более крупные зерна имеют ноздреватый, чешуйчатый характер и гравитационными методами обогащения улавливаются не полностью. Удаление в хвосты значительной части драгметаллов, помимо их малого размера, обусловлено, вероятно, еще и присутствием глинистых частиц, с

высокой сорбционной способностью, а также способностью «прилипания» тонких частиц золота к глинистым частицам. Значительная часть тонких частиц драгметаллов, находящихся в нескрытом состоянии в кварцевых частицах (Рис. 2а, б), которые уходят в хвосты при гравитационном обогащении на всех существующих видах обогатительного оборудования. Анализ содержаний золота и серебра в концентрате (фракция 1-3) и в хвостах обогащения на Gemenі показывает, что извлекаемость при щадящем режиме резко повышается и составляет порядка 51% (0,8 г/т) от общего баланса золота, находящегося в исходном материале (1,57 г/т). По серебру выход составляет 19,6% (61,6 г/т). Расчеты представлены в таблице 11. На основании полученных результатов, можно сделать вывод, что, подобрав оптимальный режим при обогащении на гравитационном столе, возможность извлечения золота и серебра возрастает в несколько раз (золота в 2,6 раза, серебра – более чем в 5 раз).

Таблица 11

Баланс распределения Au и Ag на Gemenі в щадящем режиме (58,6 кг фракции -0,5)

Вес (исходный), кг	Фракция (Gem)	Фракция (гран)	Вес (Gem), кг	Содержание концентрата Gem от исходного, %	Содержание в концентрате, г/г		Содержание,	
					Au	Ag	Au	Ag
58,6	фр.1	-0,5	0,4554	0,8	89,35	3466,0	0,6944	26,9354
58,6	фр.2	-0,5	0,4187	0,7	9,39	1720,5	0,0671	12,2931
58,6	фр.3	-0,5	2,0346	3,5	1,10	645,5	0,0382	22,4118
58,6	хвост	-0,5	54,75	93,4	0,83	271,0	0,7755	253,1954
Итого:			57,659				1,5751	314,8357

Сравнительный анализ результатов обогащения на различных видах оборудования (Gemeni, ЦВК, КНК)

Анализ результатов обогащения полезных компонентов на различных видах оборудования показал, что наиболее эффективно золото извлекается на концентрационном столе. Извлекаемость гравитационно обогатимого золота на Gemeni в концентрате в стандартном режиме составляет порядка 19,5%, а в щадящем режиме – 51% по сравнению с 8,1%, полученном на КНК. Однако, извлекаемость серебра на КНК в 2 раза выше при стандартном режиме и сопоставима с выходом на Gemeni в щадящем режиме. Это связано с тем, что значительная часть серебра приходится не на его самородную форму, а на серебро-содержащие минералы (хлораргирит, акантит, аргентит), со значительно более легкими удельными весами. В ЦВК, при обработке тяжелой фракции, содержание золота уменьшается в два раза по сравнению с исходным материалом тяжелой фракции после Gemeni, а серебра - в 5 раз, при этом, содержание в хвосте ЦВК золота (100 мг/т) даже несколько выше, чем в концентрате (96 мг/т), а содержание серебра в хвосте на порядок выше (23,4 г/т), чем его содержание в тяжелой фракции (2,3 г/т). Не вдаваясь в разбор причин низкой эффективности ЦВК, отметим, что, в данном случае, его использование не целесообразно. Отмеченные факты свидетельствуют о том, что, при обогащении на ЦВК происходит выброс в хвосты пористого высокопарусного золота и серебра. Вторым фактором указанного эффекта может служить несколько заниженная плотность золота за счет высокого содержания в нем серебра. Третьим фактором является тонкое распыление драгметаллов в кварце в нескрытом состоянии.

Таким образом, наиболее эффективным способом гравитационного извлечения золота и серебра на изученном объекте следует считать обогащение на Gemeni с подбором оптимального режима. Не исключено, что сходную с Gemeni (и даже превосходящую) эффективность по извлечению золота можно получить и на КНК, путем регулирования скорости подачи водного потока, с получением оптимального режима обогащения, адаптированного для данного материала.

Выводы

Проведенные эксперименты по гравитационному обогащению на различных типах обогатительного оборудования позволяют сделать следующие выводы:

1. Наибольшей степени извлекаемости можно достичь на Gemeni в щадящем режиме обогащения, тем не менее, даже максимальная извлекаемость (Au в 51% и Ag в 19,6%) в этом случае не может служить удовлетворительным показателем.

2. ЦВК, эффективно работающий по извлечению тонких фракций драгметаллов, в нашем случае использовать не рационально, так как из концентрата, полученного на Gemeni он не способен выделить про-

дукт, обогащенный драгметаллами. Главной причиной служит форма выделения серебристого золота (кавернозная, ноздреватая, спиралевидно-чешуйчатая), обладающего повышенной парусностью и удаляющегося вместе с легкой фракцией в хвост.

3. КНК по степени извлечения драгметаллов существенно уступает Gemeni при работе в щадящем режиме, но вполне сопоставим (а по Ag даже превосходит) показатели Gemeni в стандартном режиме. Отметим, что на КНК подбор оптимального режима не осуществлялся, а разделение на обогащенную часть и хвост осуществлялся чисто визуальным контролем, и значит, потенциал эффективности извлечения КНК полностью не исчерпан.

В процессе обработки технологической пробы на различных видах оборудования выяснилось, что основная масса металлического золота и серебра (в последнем случае еще и минералы серебра) гравитационными методами обогащения извлекаются не достаточно эффективно. Удаление в хвосты значительной части драгметаллов, помимо их малого размера, обусловлено, вероятно, присутствием глинистых частиц, с высокой сорбционной способностью, а также способностью «прилипания» тонких частиц драгметаллов к коллоидной взвеси глин. Сказывается и несколько заниженная плотность золота за счет высокого содержания в нем серебра. Главной же причиной не достаточно эффективной извлекаемости является тонкая дисперсность металлов в нескрытом состоянии. Повышение извлекаемости золота и серебра связывается со способами вскрытия тончайших надкластерных выделений драгметаллов из кварцевой матрицы, что предполагает извлечение до размерности менее 50 микрон, а это требует дополнительных затрат и применения спецоборудования с использованием на финальной части методов цианирования или кучного выщелачивания.

Работа выполнена при финансовой поддержке АО «Приморзолото».

ЛИТЕРАТУРА

1. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России: в 2х кн. / Под редакцией А. И. Ханчука // Владивосток: Дальнаука, 2006. – С. 573–981.
2. Михайлов, В. А. Магматизм вулканотектонических структур южной части Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса. – Владивосток: ДВО АН СССР, 1989. – 172 с.
3. Ростовский, Ф. И. В кн.: Рудные месторождения континентальных окраин. Владивосток: Дальнаука, 2001. – С. 333–340.
4. Сахно, В. Г. Первые данные U-Pb датирования вулканических пород Восточно-сихотэ-Алинского пояса / В. Г. Сахно, В. В. Акинин // Доклады Академии наук. – 2008. – Т. 418. – № 2. – С. 226–231.
5. Сахно, В. Г. Уран-свинцово-изотопное датирование магматических комплексов Милоградовского золото-серебряного месторождения (Южное Приморье) / В. Г. Сахно, Ф. И. Ростовский, А. А. Аленичева // Доклады Академии наук. – 2010. – Т. 433. – № 2. – С. 219–226.

6. *Ненахова, Е. В.* Минеральный состав руд и условия формирования кварцевых жил с золотосеребряной минерализацией милогордовского рудопроявления (Приморский край) / *Е. В. Ненахова* // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. – Сер.: Геология. – 2016. – № 4. – С. 62–67.

7. Инструкция по эксплуатации и техническому обслуживанию концентрационного стола GEMENI TABLE МК.2 GT-250 / Редакция 2. «Коралайна Инжиниринг» – 2010.

8. Патент RU 2 428 257 С2 / Стрижко В. С., Журавлев В. И., Шехирев Д. В., Думов А. М., Редькин С. А.

Воронежский государственный университет

Ненахов Виктор Миронович, декан геологического факультета, доктор геолого-минералогических наук, профессор
E-mail: deanery@geol.vsu.ru
Тел.: +7 (473) 2-208-989

Янникова Юлия Юрьевна, бакалавр кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и геоэкологии
E-mail: miss.yannikova@mail.ru
Тел.: +7 999-720-97-34

Ненахова Екатерина Викторовна, аспирант кафедры минералогии, петрографии и геохимии
E-mail: nev_vsu@mail.ru
Тел.: +7 920-462-37-86

Русанов Ростислав Владимирович, магистрант кафедры общей геологии и геодинамики
E-mail: rostislav_rusanov_1993@mail.ru
Тел.: +7 915-583-75-90

Voronezh State University

Nenakhov V. M., Dean of the Faculty of Geology, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor
E-mail: deanery@geol.vsu.ru
Tel.: +7 (473) 2-208-989

Yannikova Y. Y., Bachelor of the Hydrogeology, Engineering Geology and Geoecology Department
E-mail: miss.yannikova@mail.ru
Tel.: +7 999-720-97-34

Nenakhova E. V., Postgraduate Student of the Mineralogy, Petrography and Geochemistry Department
E-mail: nev_vsu@mail.ru
Tel.: +7 920-462-37-86

Rusanov R. V., Master of the General Geology and Geodynamics Department
E-mail: rostislav_rusanov_1993@mail.ru
Tel.: +7 915-583-75-90