Научная статья
УДК 553; 622.2

Оценка эффективности технологий извлечения тонкого золота на примере титаномагнетитовых пляжевых россыпей западного побережья Камчатки

В.Е.КУНГУРОВА

Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

Как цитировать эту статью: Кунгурова В.Е. Оценка эффективности технологий извлечения тонкого золота на примере титаномагнетитовых пляжевых россыпей западного побережья Камчатки // Записки Горного института. 2021. Т. 252. С. 840-853. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.6

Аннотация. Проанализирован материал по золотоносности прибрежно-морских отложений западного побережья Камчатки, кратко охарактеризован ресурсный потенциал. Представлен обзор технологических оценок золота, полученных в результате изучения золотоносных проб, отобранных на перспективных участках прибрежно-морской полосы: от р. Большая Воровская на севере до мыса Левашова на юге. Использованы фондовые материалы, дополненные собственными исследованиями. Опробованы золотоносные отложения с очень мелким (0,05-0,1 мм) и мелким (0,1-1,0 мм) золотом, составляющим 94,6 %, а также пробы, где кроме мелкого присутствует золото размером до 2 мм и более. Содержание свободно извлекаемого золота достигало 91,9 %. В случае значительных запасов золота в россыпях открываются перспективы их промышленной разработки. Проведенные эксперименты по обогащению золотоносных прибрежно-морских отложений Западной Камчатки указывают на возможность извлечения из них свободного золота и других ценных компонентов. Наиболее эффективными для их добычи являются гравитационные технологии и современное оборудование, разработанное ОАО «Иргиредмет» и ЗАО «ИТОМАК». Экономически выгодным также может стать обогащение золотоносных образований с одновременным получением из них сразу нескольких полезных компонентов, что возможно с использованием фторидной технологии.

Ключевые слова: Западная Камчатка; прибрежно-морские россыпи золота; мелкое золото; обогащение; технологии извлечения

Благодарность. Исследование выполнено в рамках государственного задания по теме НИР № AAA-A17-117051910007-8.

Принята: 30.11.2021

Онлайн: 17.02.2022

Опубликована: 27.12.2021

Введение. В мире растет добыча золота, алмазов, монацита, циркона, рутила, магнетита и других полезных ископаемых из комплексных прибрежно-морских россыпей [4, 8, 17, 18]. Россыпное золото обнаружено на берегах США, Канады, Турции, Панамы, в странах Юго-Западной Африки, Австралии и др. [9, 16, 19, 21]. Исследования по изучению и разработке подобных россыпей, особенно тех, которые находятся в пределах шельфовой зоны, – актуальны. В России потенциальным резервом золота являются запасы шлихового, гравитационно-извлекаемого мелкого и тонкого золота в отложениях побережья Западной Камчатки. В силу того, что Камчатка в 70-80-е гг. 20 в. не рассматривалась как еще один промышленный район – источник металлических руд и драгоценных металлов, – не было дано объективной оценки золотоносности прибрежно-морских отложений. Изучение перспективных участков на предмет выявления промышленных россыпей было прекращено. Но ревизия проведенных ранее исследований, дополненных новыми, позволяют пересмотреть перспективы освоения и добычи золота на этих площадях.

Рис.1. Схематическая геологическая карта Западной Камчатки [13]

1-10 – кайнозой: нерасчлененные голоценовые отложения – аллювиальные, пролювиальные, болотные, морские (1); верхнечетвертичные – аллювиальные, озерно-аллювиальные, морские, ледниковые (2); среднечетвертичные – ледниковые, флювиогляциальные, морские (3); верхнеплиоцен-эоплейстоценовые прибрежно-морские и аллювиально-морские отложения (4); четвертичные вулканиты (5); верхне-неогеновые отложения (6); нижне-неогеновые отложения (7); палеогеновые образования (8); черепановский вулканический комплекс палеогена (9); тектоно-гравитационные микститы эоцена (10); 11 – верхний мел-палеоцен: кирганинская свита; 12 – верхний мел: квахонская, хозгонская и кунунская свиты; 13 – ирунейская свита; 14 – алисторская и химкинская свиты (а) и комагматичные им субвулканические интрузивы (б); 15 – хейванская свита; 16 – андриановская свита; 17 – верхний протерозой: камчатская серия; 18 – коллаковская серия; 19-23 – интрузивные комплексы: кайнозойский гранодиоритовый лавкинский (19); кортландит-ортопироксенит-габбро-норитовый дукукский (палеоцен-эоценовый?) (20); верхнемеловые левоандриановский (21); плагиигранит-гранодиоритовый кольский (22); нижнемеловой кругогоровский гнейсо-гранитовый (23); 24 – кальдера вулкана Хангар; 25 – разломы; 26 – границы: Камчатского срединного массива (а) и верхнемеловых пород, окаймляющих Камчатский срединный массив (б); 27 – участки с россыпным золотом; 28 – шлиховой ореол золота Западно-Камчатского побережья и шельфа; 29 – россыпи: непромышленные (а), промышленные (б); 30 – места отбора и номера технологических проб, отобранных в 1998 (а) и 1967 гг. (б); 31 – в 1969 (а) и 1985 гг. (б); 32-37 – коренные источники золота (формационные типы): золото-кварцевый малосульфидный (32); золото-кварц-сульфидный (33); золото-сульфидный: медно-никелевый (34); медно-рудный (35); золото-полисульфидно-кварцевый: медно-молибденный (36), молибден-вольфрам-редкометалльный (37)

Постановка проблемы. Дальний Восток, в том числе западное побережье Камчатского п-ва, – большой резерв перспективных геологических объектов. Большинство из них легкодоступны, что обеспечивает экономическую целесообразность их изучения и последующего освоения. Объектом исследований являются пляжевые золотосодержащие отложения южной части Западно-Камчатского побережья (рис. 1).

Решение проблемы их эффективного освоения требует выделения перспективных площадей, ревизии имеющихся данных и выполнения исследований по обоснованию выбора методов и аппаратов для максимального извлечения металла. По оценкам российских исследователей, разработка россыпей с мелким и тонким золотом может быть рентабельной, начиная с содержаний свободного (извлекаемого) золота 100 мг/м³ и более [12]. Рассмотрены вопросы применения существующих технологий извлечения мелкого и тонкого золота с использованием зарубежных и отечественных аппаратов различных конструкций [1, 10, 14, 15, 20, 22].

Исследование имеет практическое значение – создание предпосылок для переоценки объекта с целью комплексного освоения без нанесения серьезного ущерба окружающей среде, организация добычи золота, а также других сопутствующих полезных компонентов – титаномагнетита, ильменита, граната – прежде всего на юго-западном побережье Камчатки.

Методология. В 1997-2000 гг., а затем в 2015 и 2019 гг. Научно-исследовательским геотехнологическим центром ДВО РАН совместно со специалистами АмурКНИИ ДВО РАН были проведены работы для уточнения перспектив и оценки промышленной значимости прибрежно-морских золотоносных образований с позиций возможности применения передовой технологии их переработки. В 1967-1985 гг. сотрудниками лаборатории обогащения золотых песков Центрального научно-исследовательского геологоразведочного института цветных и благородных металлов (ЦНИГРИ) были проведены исследования валовых проб по определению технологических видов золота, форм его нахождения, опробованы различные методики извлечения металла, предложена технология обогащения пляжевых золотоносных отложений.

Проанализирован накопленный опыт и рассмотрены возможные варианты последующего использования технологий как при опробовании титаномагнетитовых золотоносных отложений Западной Камчатки, так и при добыче ценных компонентов.

Первые исследования по разработке методов извлечения мелкого и тонкого золота из пляжевых и морских отложений западного побережья Камчатки были проведены в лаборатории обогащения золотых песков ЦНИГРИ. В 1967 г. исследованы три валовые пробы, отобранные из морских пляжевых золотоносных образований южной части Западной Камчатки (Горюшкина С.Я., 1969). Место отбора – шурфы с глубины 0,0-0,5 м; вес проб – 0,4-0,5 т. Золото находится в основном в классе –0,3+0,1 мм, представлено тонкими чешуйками толщиной до 10 мк. После обработки содержания золота в тяжелой фракции составили 3850, 2480, 1970 мг/т. Концентрация золота в песках в переводе на объем горной породы – около 2,56 г/м³. Полученные данные могут стать основанием для разработки подобных золотоносных образований, поскольку в Австралии разрабатывается россыпь со средним содержанием 0,162 г/м³ [18], а в США при благоприятных геологических условиях – 0,055 г/м³ [17].

В ходе исследований материала этих проб были сопоставлены различные методы извлечения полезных компонентов (см. таблицу).

Извлечение мелкого и тонкого золота из пляжевых и морских отложений западного побережья Камчатки

Показатели, %	Методы извлечения полезных компонентов (навеска 10 кг)		
	Двухдиафрагмовая отсадочная машина (с вертикальной диафрагмой): величина ячейки сита 0,59 мм, с гематитовой постелью крупностью –3+1 мм	Суживающийся шлюз: производительность установки 4 т/м ² /ч, степень разжижения Т:Ж = 1:2, угол наклона шлюза 160°	Винтовой сепаратор: производительность 40 кг/ч, степень разжижения Т:Ж = 1:5
Содержание тяжелой фракции в концентрате	24-56	16-40	36
Извлечение тяжелой фракции в концентрат	76	69-89	90
Выход промпродукта	20	25	30
Выход концентрата	7,9-20	8,5-28	12,5
Извлечение золота из песков	67	70	63

Таким образом, золото извлекалось на различных аппаратах на 63-70 %, но при перерешивке хвостов извлечение золота в концентрат повышалось до 88 %.

В 1969 г. обработали 10 валовых проб весом по 0,5 т и одну технологическую пробу весом 4 т. При исследовании обогатимости проб пляжевых отложений установлена возможность переработки песков с предварительным выделением продуктивного класса –0,3 мм методом грохочения и последующим гравитационным и флотационным извлечением золота из подрешетного продукта с одновременным извлечением титаномагнетита и граната.

Обработка проб показала, что золото в них мелкое, тонкочешуйчатое, крупностью до 0,3 мм, которое достаточно полно извлекается центробежной сепарацией (до 95-96 %). Лабораторией обогащения для обработки проб в полевых условиях было рекомендовано использовать установку ПОУ-4.

В пробах определено: «свободное» золото, улавливаемое гравитационными методами обогащения, – от 2,8 до 77 % (в среднем 35 %); «свободное тонкое» золото, сносимое с гравитационных приборов и улавливаемое только методами амальгамации и цианирования, – от следов до 49,5 % (в среднем 10 %); «связанное» золото, находящееся в закрытых сростках с пустой породой, – от 23 до 95 % (в среднем 55 %); «тонкодисперсное» золото, равномерно распределенное в отходящих продуктах слива, – следы.

При двойной центробежной сепарации в головку концентрата выделялось 91,13 % золота. Извлечение золота центробежной сепарацией составляло 95-96 % от всего свободного золота.

В 1985 г. в Тульском филиале ЦНИГРИ (Астафьева Г.И., 1985) были исследованы четыре пробы, отобранные из пляжной зоны в районе устья р. Кяхта (рис. 1). Объем проб по 0,2 м³ каждая. Обогащение производилось на передвижной обогатительной установке ПОУ4-2М, оснащенной барабанным дезинтегратором и двумя последовательно установленными центробежными сепараторами (основным и контрольным). Материал проб был легкопромывистым.

Ситовой анализ шлихового золота показал присутствие в пробах (№ 1 и 2) из морских отложений мелкого золота (10,75-13,41 %), весьма мелкого (62,32-80,43 %), тонкого (8,7-22,46 %) и пылевидного (следы – 1,81 %). Весьма мелкое золото преобладало и его можно было извлекать только в обогатительных аппаратах с центробежными или вибрационными полями или их сочетаниях. Полное содержание золота – 318 и 380 мг/м³, свободно извлекаемого – 9 и 28 мг/м³, свободного тонкого золота – 59 и 72 мг/м³. На существовавшем уровне развития технических средств оно не извлекалось, но при этом являлось резервом золотодобычи будущего. Было рекомендовано обрабатывать аналогичные пробы при разведочных работах по схеме, включающей грохочение, концентрацию в центробежных или вибрационных аппаратах.

В пробах из пролювиально-делювиальных образований (ТП 609-1 и 801-1) содержалось 14,94-44,5 % крупного золота, 6,86-8,03 % среднего, 31,68-52,03 % мелкого. Средняя масса зерен составляла 0,595 и 0,979 мг, проба – 950 и 920 ‰, содержание – 2585 и 4764 мг/м³, в том числе свободно извлекаемого 91,9 и 91,6 %. Материал проб легкообогащаемый. Практически все золото из проб извлекается гравитационными методами. В случае значительных запасов золота в россыпях, представленных подобными пробами, открываются перспективы их промышленной разработки. При необходимости выделения магнетита, ильменита и граната обогащение рекомендовалось выполнить методами доводки: магнитными, электромагнитными и электрическими.

Для обработки геологоразведочных золотосодержащих проб в производственных условиях было рекомендовано использование передвижной обогатительной установки ПОУ-4М для извлечения «свободного золота» в пробах с повторным пропуском эфельной фракции через центробежный сепаратор.

В 2011 г. в лаборатории ООО «Русская Корона» были проведены тестовые испытания золотосодержащих песков. В результате из исходной пробы весом примерно 16 кг получено 0,252 г концентрата с содержанием золота ≥ 10 %. Предлагалось применить сухую технологию извлечения, которая позволит вести добычу круглый год. Методика сухого обогащения песков включала классификацию пробы с выделением классов крупности –0,315 мм и выделение из них немагнитной фракции на валковом магнитном сепараторе и электростатическую сепарацию немагнитной фракции на электростатическом сепараторе СЭ-24/30.

Золотоносность проявлена почти на всей территории Западно-Камчатской равнины, включая современный пляж и прилегающий шельф (рис.1) [6]. Коренные источники золота расположены в пределах Камчатского срединного массива, примыкающего к низменности с востока (рис.1). Это преимущественно рудопоявления и пункты минерализации с относительно крупным золотом (максимальные содержания золота до 65,4 г/т).

Нередко на небольшом расстоянии от них залегают промышленные аллювиальные россыпи золота. По водотокам прослежены многочисленные шлиховые ореолы золота – от истоков рек до их впадения в Охотское море.

В береговой зоне обнажаются ледниковые и водно-ледниковые образования с относительно высокими (до 365 мг/м³) [7] концентрациями металла, а также аллювиальные отложения с содержаниями золота 280-460 мг/м³.

В современных прибрежно-морских пляжевых отложениях вдоль побережья Западной Камчатки вытянут ореол рассеяния золота протяженностью примерно 300 км и шириной до 40 м с содержанием металла от 30 мг/м³ до нескольких граммов на метр кубический (рис.1).

На поверхности пляжа зафиксированы небольшие участки накопления естественного шлиха гранат-магнетитового состава с присутствием золота (рис.1-3):

- вблизи уреза воды в виде пятен длиной 10-50 см, шириной 1-5 см с содержанием золота 15-50 мг/м³;
- у основания второй аккумулятивной террасы в виде полос шириной до 1 м, длиной до 10 м с содержанием золота от 20 до 120 мг/м³;
- у основания клифа, где развиты средне-мелкозернистые пески с магнетит-пироксен-гранатовой ассоциацией, зафиксированы ореолы шириной 2-3 м, протяженностью до сотни метров, мощностью 5-20 см; среднее содержание золота колеблется в пределах 40-190 мг/м³, достигая в некоторых пробах десятков граммов на метр кубический (2695, 18275, 37821 мг/м³) (см. рис.2, 3) [6-8].

По степени литодинамической активности выделены пляжи нескольких типов, которые характеризуются различной золотоносностью. Узкие пляжи шириной до 30 м (рис.3, а) имеют мощность пляжевых отложений от 0,1 до 1,5 м. У основания клифа замечены естественные гранат-магнетитовые шлихи как на поверхности (с высокими содержаниями золота – > 1000 мг/м³) (см. рис.2), так и по всему разрезу (до плотика). В пробах, отобранных через 0,25 м, обнаружено золото от знаков до первых граммов на метр кубический.

Пляжи шириной 30-50 м (рис.3, б) имеют мощность пляжевых отложений до 3,0 м, сложены часто чередующимися прослоями (мощностью в десятки сантиметров) хорошо сортированных песков с гравием, галькой, гравийно-галечных отложений с линзами и маломощными прерывистыми слоями (от 1 до 4) естественного гранат-магнетитового шлиха мощностью 2-10 см, к которым приурочены повышенные (десятки и сотни миллиграммов на метр кубический) содержания золота, концентрирующегося в приплотиковой части, представленной суглинками и алевролитами. В результате детально-поисковых работ, проведенных Камчатской партией Приморского геологического управления, в одном из шурфов (Ш-403) содержания золота в продуктивном пласте в среднем составляли 1029 мг/м³ (от 175 до 37821 мг/м³) на полуметровую мощность. На прослеженную длину 6100 м (на участке побережья между реками Насекина и Митога) среднее содержание золота составило 234 мг/м³ на среднюю мощность опробованной горной массы 2,4 м.

Пляжи с меньшей литодинамической активностью имеют ширину до 70 м, мощность пляжевых отложений до 5 м, нередко с узкой маршевой поверхностью, закрепленной растительностью (рис.3, в). Число гранат-магнетитовых слоев достигает девяти, содержание золота в них колеблется в широких пределах: от знаков до первых граммов на метр кубический. Золотоносный пласт с содержаниями > 100 мг/м³ находится чаще всего на большей глубине и нередко приурочен к основанию разреза.

На пляжах полного профиля, развитых на участках аккумулятивных берегов, повышенные концентрации золота приурочены к зоне заплеска волн в период сильных штормов, при этом наиболее высокие содержания металла (до 295 мг/м³) тяготеют к плотиковой части пляжевых отложений, мощность которых более 4-5 м.

Ресурсы золота верхней береговой зоны связаны, как правило, с отложениями описанных пляжей неполного профиля (рис.3) на участках развития абразионных берегов и составляют > 500 кг при среднем содержании металла 150 мг/м³, ширине россыпей 22-30 м и мощности 2,0 м.

Рис.2. Геолого-геоморфологическая схема детального участка исследований пляжевых россыпей (по Бондаренко И.В., 1979)

Рис.3. Типичные схематические разрезы пляжей неполного профиля различной литодинамической активности (район побережья между устьями рек Насекина и Митога)

1 – отложения пляжа; 2 – склоновые отложения; 3 – породы плотика; 4 – растительность на марше; 5 – прослойки естественного магнетитового золотосодержащего шлиха; 6 – номер выработки; 7 – содержания золота в мг/м^3 (пробы отобраны через 0,25 м)

Перспективными для рентабельной отработки являются площади в южной части побережья Западной Камчатки, наиболее доступные для освоения, – между реками Утка – Хомутина, Насекина – Митога (рис.3-5). Близость к населенному пункту (пос. Усть-Большерецк) обеспечивает эффективность использования современных технологий извлечения полезных компонентов.

При проведении общепромысловых и детальных поисковых работ на россыпи шельфа в южной части западного побережья Камчатки в 1976-1978 гг. (Бондаренко И.В., 1979) бурением с борта судна выявлены повышенные концентрации золота (рис.4, 5), приурочены к тыловым зонам подводных морских террас и основанию активного слоя. В северной части участка максимальные содержания золота обнаружены в скважинах на глубинах: –8,6 м (579 мг/м^3), –11,4 (183), –14,5 (220), –17,5 (167), –19,9 (1186), –23,2 (650); в южной части: –8,5 м (134 мг/м^3), –11,0 (212), –14,3 (120), –17,0 (311), –19,3 (60), –22,4 (87). Мощность активного слоя – от 3 м в верхней части подводного берегового склона до первых десятков сантиметров у его основания; опробованная мощность отложений – 0,1-3,6 м.

Помимо золотоносности пляжевых отложений, в зонах подводных террас в донных отложениях, по данным вибробурения (рис.4, 5), ореолы оконтурены с весовыми содержаниями золота, распределение которого крайне неравномерное. Суммарная длина ореолов золота в опробованной зоне подводного склона – 52,0 км (протяженность 20 км), ширина в среднем 0,22 км, мощность примерно 2 м, среднее содержание золота – 90 мг/м^3 . Прогнозные ресурсы золота составляют

Рис.4. Схема расположения ореолов золота на подводном береговом склоне (побережье между реками Северная Митога, Утка и Хомутина)

1-5 – значения уклонов (tg угла наклона): 0,025 (1), 0,0041 (2), 0,0031 (3), 0,0020 (4), 0,00043 (5); 6 – участки с содержанием золота: $> 60 \text{ мг/м}^3$ на подводном береговом склоне (а), $> 100 \text{ мг/м}^3$ на пляже (б); 7 – разрез по линии А-Б; 8-12 – отложения пляжа: современные морские (8), четвертичные первой надпойменной террасы (9), второй надпойменной террасы (10), нерасчлененной древнечетвертичной террасы (11), водно-ледниковые и ледниковые образования (12)

около 2 т (Бондаренко И.В., 1979). Поскольку вибробурирование занижает содержания не менее, чем в 2-3 раза, то реальные ресурсы могут быть значительно выше.

Значительные (до 5 г/м^3) содержания золота на отдельных участках в отложениях подводного берегового склона на поверхности и по разрезам пляжа, в условиях высокой гидродинамической активности свидетельствуют о возможном выявлении погребенных россыпей, запасов золота, в которых могут значительно превышать прогнозные ресурсы россыпей пляжей неполного профиля. Этот долгосрочный резерв минерально-сырьевой базы недостаточно изучен и недооценен.

Рис.5. Схематический геологический разрез по линии А-Б [4]

1-5 – литологический состав: песчано-гравийно-галечные образования с ракушечным детритом (1); алевриты (2); суглинки (3); песок (4); гравийники, конгломераты, галька, гравий (5); 6 – возрастные границы: установленные (а), предполагаемые (б), сейсмоакустические (в); 7 – гравий, галька; 8 – интервал повышенных содержаний золота > 60 мг/м³

mQ_{IV} – современные морские отложения; IQ_{III}³, mQ_{III}³ – верхнечетвертичные: озерные и морские соответственно; aQ_{III}²⁻³ – аллювиальные отложения погребенных террас; fQ_{II}³, gQ_{II}² – среднечетвертичные отложения: водно-ледниковые и ледниковые соответственно; mQ_I¹, IQ_I¹ – нижнечетвертичные морские и озерные отложения соответственно; N_{en}² – верхнеэоценовые отложения энметенской свиты

Корректная оценка участков береговой зоны может быть дана при детализации и доизучения осадочных образований в пределах пляжей, мелководного шельфа, а также на прилегающих к ним участках суши Западно-Камчатского прогиба.

Обсуждение результатов. Оработка технологии обогащения пляжевых песков Западно-Камчатского побережья продолжалась в полевых условиях в 1998 г. отрядом сотрудников НИГТЦ ДВО РАН и АмурКНИИ ДВО РАН. В 2015 и 2019 гг. были проведены научно-исследовательские работы (НИГТЦ ДВО РАН) на пляже на участках повышенных концентраций золота (см. рис.2, 3); проведен комплекс минералогических и технологических исследований. В ходе оценочных работ на участке пляжа от мыса Левашова до р. Утка были отобраны 127 проб по 24 поисковым линиям. По результатам этой оценки выделены перспективные (> 100 мг/м³) для крупнообъемного опробования участки пляжа. Крупнообъемные пробы отбирались из канав, ориентированных вдоль береговой линии. Ширина канав на поверхности составляла 1,2-2,0 м, глубина определялась по результатам оценочных работ, а длина – техническими и физическими возможностями. Извлеченный из канав материал был расситован на месте с помощью передвижного грохота. При мокром грохочении наиболее эффективным являлось горизонтальное положение ситового планшета. Общий вес отобранного на начальном этапе материала составил порядка 11 т. В отвал ушла фракция более 2 мм, общий вес которой составил ориентировочно 6,75 т (в среднем 61,4 % объема проб состоит из фракции > 2 мм). Из фракции < 2 мм с помощью отсадочной машины и концентрационного

стола были выделены концентраты, которые посредством магнитной и электромагнитной сепарации разделены на магнитную, электромагнитную и немагнитную фракции. Вещественный состав гравитационных концентратов характеризовался высоким содержанием магнитной фракции. В поверхностных естественных шлихах это количество достигает 60-75 % от массы проб, а

Рис.6. Золото пляжевых прибрежно-морских россыпей юго-западного побережья Камчатки: хорошо окатанное пластинчатое, лепешкообразное, чешуйчатое золото, удлиненные и комковидные зерна с мелкочешуйчатой и слабошероховатой поверхностью (а); золото с включениями кварца, с пленкой гидроокислов железа на поверхности и в углублениях (б)

в отдельных пробах – 80 %, немагнитной – около 10 %. Основной минерал магнитной фракции – магнетит, иногда ильменит. Магнетит содержит значительную примесь титана (среднее содержание TiO_2 составляет 19,9 %) и относится к титаномагнетитам. Минерал в пробах встречается в виде октаэдрических окатанных кристаллов и их обломков. Максимальное количество титаномагнетита содержится в классе $-0,3+0,1$ мм; среднее содержание в минерале Fe – 56,5, V_2O_5 – 0,35, Cr_2O_3 – 0,029, MnO – 0,60 %. Электромагнитная фракция представлена преимущественно ильменитом и пироксеном. Ильменит установлен в виде зерен неправильной формы и шестиугольных кристаллов, концентрируется в классе $-0,25+0,1$ мм. Наблюдаются кристаллы ильменита, проросшие нитевидными выделениями магнетита. Ильменит содержит Fe – 52,5, TiO_2 – 25,6, Cr_2O_3 – 0,046, MnO – 0,52, V_2O_5 – 0,35. Менее распространены гематит и лейкоксен, присутствуют (менее 1 %) гранат, мартит, марказит, хромит, шеелит, антимонит, арсенопирит, анатаз, брукит, турмалин. Гранаты имеют вид хорошо образованных кристаллов ромбододекаэдров и обломков неправильной формы: преобладает альмандин, в подчиненном количестве – гроссуляр и спессартин. Неэлектромагнитная фракция представлена цирконом и золотом, встречены сфен, рутил, шпинель, барит, апатит, топаз.

Параллельно выполнялась качественная оценка материала проб на золото. Максимально установленные содержания золота в отложениях пляжа составили 5 г/м^3 ; 80 % золота сосредоточено в классе $-0,25+0,1$ мм. Размеры золота в россыпях прибрежно-морской зоны варьируют от $< 0,07$ до 2 мм (единичные 4-5 мм), толщина колеблется от 0,01 до 0,15 мм, средний вес – 0,015 мг. Форма зерен золота в основном уплощенная. Это пластинчатые, лепешковидные, чешуйчатые, проволоковидные, комковидные формы, как правило, хорошо окатанные (рис.6). Проба золота изменяется от 656 до 972 [6], распределение полимодальное, с наибольшими экстремумами 770-810 и 920-950.

Из технологических свойств следует отметить практически полное отсутствие глинистых минералов и хорошую промывистость песков. Количество фракции песка 0,5 мм на разных участках колеблется от 5 до 10 % от общего объема исходного материала. Для золота характерна высокая плавучесть.

Технологическая схема обогащения материала проб (рис.7, а) и принципиальная схема водоснабжения обогатительной системы (рис.7, б) были составлены в НИГТЦ ДВО РАН. При обработке проб использовалась обратная водопроводная вода. Выход концентрата из обработанных проб – 6,9-24,0 %.

С учетом размерности золотин (средняя 0,30 мм) в пробах исследуемого участка побережья, содержания в них тяжелой фракции и количества материала класса +1 мм (5,4 %) разработана оптимальная схема отработки проб: грохочение (2 мм); концентрация на центробежном сепараторе; сушка материала; магнитная и электромагнитная сепарации; отдувка золота; выделение золота под бинокуляром.

Рис. 7. Схемы переработки проб (а) и водоснабжения обогатительной системы (б)

В качестве центробежных сепараторов рекомендовано использование ЦВК-100М (производительность до 200 л/ч) и ЦВК-200 (производительность до 3 м³/ч). Концентраты, выпускаемые ОАО «Грант» (Наро-Фоминск), позволяют получать концентраты высокого класса плотности при извлечении тонкого золота в концентрат до 98 %, а также позволяют извлекать золото в концентрат крупностью до 5 мкм; отличаются экологической чистотой процесса.

В связи с начавшейся разработкой на Камчатке месторождений рудного золота, дальнейшие исследования золотоносных образований пляжа и работы по обогащению и извлечению ценных компонентов из них были прекращены. Ранее проведенные эксперименты указывают на возможность извлечения из них не только золота. Для разработки технологии извлечения благородного металла, а также попутных компонентов, необходимо дополнительно провести испытания укрупненных проб с использованием современного оборудования.

Охотское море для России является одним из главных источников морепродуктов, поэтому технологии, которые можно применять при добыче полезных компонентов из пляжевых золотоносных титаномагнетитовых образований западного побережья, должны быть экологически безопасными. Это требование накладывает жесткое ограничение на их выбор, следовательно выщелачивающие технологии исключаются, так как на сегодняшний день они экологически небезопасны.

Группа экологически безопасных технологий извлечения золота – электростатические. Они классифицируются в зависимости от вида разряда и способа, которым заряжается дисперсный материал (коронный и тлеющий, трибоадгезионный, комбинированный). Разработано и создано множество конструкций сепараторов с малым удельным энергопотреблением и большой удельной производительностью, сравнимыми только с удельным потреблением и производительностью магнитостатических сепараторов. Извлечение полезного компонента требует от 50 до 500 Вт мощности. Аппарат СЭП (сепаратор электростатический пневматический) производительностью 60 м³/ч, выпускаемый в Екатеринбурге ООО «Русская Корона»*, потребляет 500 Вт. Диапазон классов крупности частиц металла, которые они извлекают, шире, чем у гравитационных аппаратов, особенно в сторону

* ООО «Русская Корона». URL: <http://www.rkorona.ru> (дата обращения 14.05.2020).

тонких частиц. Применение электростатики для переработки пляжевых отложений позволит извлекать тонкие частицы, что для гравитационных технологий и аппаратов (даже роторных) недоступно. Широкому внедрению электростатических технологий в практику добычи мешает то, что они сухие [11]. Установка на вход сепараторов мощных (до 20 кВт) электрических нагревателей способствует обезвоживанию и прокаливанию подаваемого исходного материала. Этот прием дает хорошие результаты на месторождениях, где влажность исходного материала невысокая (Мурунтау, Эрдэнэт). Но материал пляжевых отложений содержит много воды, на ее удаление потребуется значительное количество энергии, из-за чего применение электростатических технологий может оказаться на грани рентабельности.

Экономически выгодным может стать обогащение золотоносных образований с одновременным получением из них сразу нескольких полезных компонентов, что возможно с использованием фторидной технологии [5], которая доведена до совершенства. Ее использование стало возможным при получении многих ценных металлов (редких и редкоземельных). Золото с фтором не реагирует, и для его добычи фторидная технология напрямую неприменима. Если перерабатывать золотоносный материал (пески) фторидной технологией и получать сразу несколько элементов, то золото, по отношению к полученным элементам, останется в отходах, его содержание будет увеличиваться за счет сокращения исходного материала, поэтому извлекать его станет проще. Технология может быть применима при разработке труднообогатимого материала сложного состава, подобного пляжным образованиям Охотского моря, с незначительными содержаниями ценных компонентов. Ее важнейшими преимуществами являются: высокая производительность, экологичность, низкое энергопотребление, комплексное извлечение из исходного сырья практически всех полезных компонентов, большая гибкость при переходе на новое сырье. Использование этой технологии позволит рентабельно извлекать большинство, в перспективе все ценные минеральные компоненты, содержащиеся в них. Все стандартное и нестандартное оборудование для фторидной технологии – факельные реакторы, электролизеры и т.д. – изготавливается в России; оно многократно испытано в крупнотоннажном производстве. Кроме рассматриваемых титаномагнетитовых золотоносных отложений, на Камчатке есть множество других объектов, – титаномагнетитовые пески восточного побережья (Халактырское месторождение и три проявления пляжевых титаномагнетитовых песков), содержащие титан, железо, ванадий, марганец, магний, кобальт.

Применение гравитационных технологий при переработке глинистых и шламистых месторождений часто приводит к загрязнению вод и заиливанию водостоков, но при этом в воду не попадает ничего постороннего, также быстро исчезает полоса мутной воды после работы аппаратов обогащения. Значит, с точки зрения экологической безопасности, гравитационные технологии в данном случае наиболее приемлемы. Но у всех гравитационных аппаратов есть извлекательная характеристика, показывающая, какой диапазон классов крупности частиц он может извлекать хорошо, а какие классы для него считаются недоступными. В результате получается, что во время переработки месторождения доказывают, что извлекается более 90 % золота, но после отработки в отвалах оказывается значительное количество металла. Эти частицы либо крупнее, либо мельче тех, на которые были «настроены» извлекающие аппараты. Когда говорят, что извлекается 90 % металла, нередко не указывается, в каком диапазоне классов крупности это происходит. В «своем» диапазоне аппарат может извлекать и более 90 % частиц, но «неродные» диапазоны он может пропускать (как более мелкие классы, так и крупные) [2]. Из-за этого происходит большая часть потерь драгоценного металла, из-за которых разработка месторождения часто оказывается на грани рентабельности. Для переработки с минимальными потерями металла необходимо использовать не один гравитационный аппарат, а их комплекс с примерно одинаковыми извлекательными характеристиками в разных классах крупности. Аппараты нужно подобрать так, чтобы их диапазоны классов крупности перекрывались, а производительности были примерно равными (такие обоганительные комплексы выпускаются, например, фирмой ИТОМАК*). В состав комплекса входят

* ЗАО «ИТОМАК». URL: <https://itomak.ru/items/company/> (дата обращения 17.01.2020).

модули классификации, гравитации и доводочный, которые укомплектованы современным и эффективным оборудованием, работающим в единой технологической линии. Производительность комплекса – 70 м³/ч. ИТОМАК обещает максимально полное извлечение металла и работает так же хорошо, как КНЕЛЬСОНЫ и ФАЛЬКОНЫ, но значительно дешевле и проще в эксплуатации [3]. Основу комплекса составляют роторные концентраторы КГ-40, у которых извлечение – 93-97 %, а минимальная крупность извлекаемого металла – 0,075 мм.

Возможно использование полевых модульных геологических обогатительных установок, выпускаемых фирмой ИТОМАК. От обогатительного комплекса они отличаются производительностью, компактностью и мобильностью. Производительность установки – 4 м³/ч, извлечение и минимальная крупность извлекаемого металла – 93-97 % и 0,075 мм соответственно.

Предпочтительно использование мобильных установок, так как пляжевые образования западной части Камчатки – полоса золотосодержащих песков шириной до 40 м, протяженностью около 300 км. Золото встречается по всей прибрежной полосе и дальше в отложениях мелководного шельфа.

У пляжевых золотоносных отложений есть интересное свойство – сезонные и приливные течения и штормы восстанавливают отработанные участки: со временем металл появляется снова. Если переработку вести одним мощным стационарным обогатительным комплексом, то доставка материала с краевых частей месторождения станет невыгодной. Удобнее использовать несколько мобильных установок, перемещаемых вдоль прибойной полосы.

Для извлечения золота из поверхностных естественных золотосодержащих титано-магнетитовых шлихов с пляжей эффективен малогабаритный комплекс МКТС, выпускаемый ОАО «Грант». Он извлекает из шлихов до 99,6 % золота крупностью +20 мкм, производительность – 200 кг шлихового золота в сезон, также отличается низким сроком окупаемости (шесть месяцев) и малой энергоемкостью (0,08 кВт).

Заключение. Проведенные исследования по разработке способов извлечения золота из пляжевых образований Западной Камчатки дают основание считать, что их отработка возможна с дальнейшим изучением. Поскольку значительная часть золота – мелкая (–0,9+0,1) и очень мелкая (–0,1+0,05 мм), оценка и опробование золотоносных образований должны быть повторно проведены с применением современного оборудования. Это поможет получить положительные результаты в открытии месторождений россыпного золота на перспективных прибрежно-морских участках пляжа, выделенных предыдущими работами. Установив их промышленное значение, можно перейти к развертыванию работ на мелководном шельфе с использованием новых технологий добычи и обогащения.

Проблеме рентабельного освоения малых низкопродуктивных россыпей уделяется мало внимания. Эти образования недостаточно изучены, поэтому нуждаются в исследовании. Существенный прогресс в извлечении золота может способствовать снижению кондиций и вовлекать в эксплуатацию россыпи с низкими содержаниями металла.

Для опробования могут использоваться мобильные обогатительные установки, такие, как ИТЭК-0,25 (Новосибирск), универсальный обогатительный прибор ПОУ4-3М (ОАО «Тульское НИГП»), которые разработаны с учетом высоких требований к извлечению золота из разведочных проб. Возможно также использование установок iCON IGR при валовом опробовании, что позволит получить реальные данные о количестве металла, извлекаемого из минерального сырья.

Для извлечения ценных компонентов из пляжевых золотоносных титаномагнетитовых образований Западной Камчатки наиболее эффективным из всех рассмотренных является современное оборудование и гравитационные технологии, разработанные ОАО «Иргиредмет» и ЗАО «ИТОМАК». Они успешно используются не только в России, но и за рубежом, позволяют извлекать золото любой размерности без нанесения вреда природе [1]. Нужно применять комплекс гравитационных аппаратов с примерно одинаковыми извлекаемыми характеристиками в разных классах крупности. Необходимо разработать технологический регламент со схемой обогащения и расчетом необходимого для промышленной эксплуатации набора оборудования и его производительности.

Экономически выгодным может стать обогащение титаномагнетитовых отложений с одновременным получением из них сразу нескольких полезных компонентов, что возможно с использованием

фторидной технологии. Технически возможно развернуть на Камчатке металлургию и добывать цветные и драгоценные металлы. Создание и развертывание новой металлургии в Камчатском крае приведет к появлению в России нового промышленного района.

Автор выражает благодарность канд. техн. наук В.М.Дядину за помощь, оказанную при написании статьи, полезное обсуждение методов обогащения, критические замечания и дополнения по тексту, а также ведущему инженеру Е.М.Газзаевой за помощь в оформлении графического материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасенко С.И. Современные технологии добычи мелкого золота // Золотодобыча. 2010. № 139. С. 12-15.
2. Богданович А.В. Современное оборудование и технологии высокоэффективного извлечения тонкозернистого золота из россыпных, рудных и технологических видов сырья / А.В.Богданович, А.П.Зарогатский, А.Н.Коровников // Обогащение руд. 1999. № 4. С. 33-37.
3. Бочаров В.А. Анализ процессов разделения золотосодержащих продуктов в концентраторах Knelson и Falcon SB / В.А.Бочаров, А.В.Гуриков, В.В.Гуриков // Обогащение руд. 2002. № 2. С. 17-21.
4. Быховский Л.З. Россыпные месторождения в сырьевой базе и добыче полезных ископаемых / Л.З.Быховский, Л.В.Спорыкина // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2013. № 6. С. 6-17.
5. Карелин В.А. Фторидная технология переработки концентратов редких металлов / В.А.Карелин, А.И. Карелин. Томск: Изд-во НТЛ, 2004. 221 с.
6. Кунгурова В.Е. Геолого-генетические особенности многостадийного формирования прибрежно-морских золотоносных россыпей: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов, 2011. 26 с.
7. Кунгурова В.Е. Золотоносные прибрежно-морские россыпи побережий Юго-Западной Камчатки и полуострова Аляска // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № S46. С. 5-25. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-46-5-25
8. Кунгурова В.Е. К вопросу о россыпной золотоносности прибрежно-морской зоны Юго-Западной Камчатки // Руды и металлы. 2014. № 5. С. 19-31.
9. Лаломов А.В. Россыпи Российской Арктики и перспективы их отработки // Минералогия. 2017. № 2. С. 30-42.
10. Мязин В.П. Технология обогащения золотосодержащих песков / В.П.Мязин, О.В.Литвинцева, Н.И.Закиева // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2012. № 9. С. 83-84.
11. Олофинский Н.Ф. Электрические методы обогащения полезных ископаемых. М.: Недра, 1977. 519 с.
12. Опыт и проблемы изучения и поисков с мелким и тонким золотом в осадочном чехле северо-западного Причерноморья / А.А.Юшин, В.М.Присяжный, С.Д.Какаранза и др. // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2008. № 2 (12). С. 34-52.
13. Сляднев Б.И. Государственная геологическая карта РФ масштаба 1:1000000 (третье поколение). Лист N-57 (Петропавловск-Камчатский) / Б.И.Сляднев, Ш.Г.Хасанов, Н.Ф.Крикун. СПб: КФ ВСЕГЕИ, 2006.
14. Assessing the impacts of seabed mineral extraction in the deep sea and coastal marine environments: Current methods and recommendations for environmental risk assessment / L.Kaikkonen, R.Venesjärvi, H.Nygård, S.Kuikka // Marine Pollution Bulletin. 2018. Vol. 135. P. 1183-1197. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2018.08.055
15. Burt R. The role of gravity concentration in modern processing plants // Minerals Engineering. 1999. Vol. 12. Iss. 11. P. 1291-1300. DOI: 10.1016/S0892-6875(99)00117-X
16. Dill H.G. Zr-Ti-Fe placers along the coast of NE Argentina: Provenance analysis and ore guide for the metallogenesis in the South Atlantic Ocean / H.G.Dill, S.Goldmann, F.Craverio // Ore Geology Reviews. 2018. Vol. 95. P. 131-160. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2018.02.025
17. Garnett R.H.T. Placer Deposits / R.H.T.Garnett, N.G.Basset // Economic Geology: 100th Anniversary Volume. Society of Economic Geologists. 2005. P. 813-843. DOI: 10.5382/AV100.25
18. Hou Baohong. Geological and Exploration Models of Beach Placer Deposits, Integrated from Case-Studies of Southern Australia / Baohong Hou, J.Keeling, B.S.Van Gosen // Ore Geology Reviews. 2017. Vol. 80. P. 437-459. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2016.07.016
19. Kirkpatrick L.H. Beachesand bedrock: How geological framework controls coastal morphology and the relative grade of a Southern Namibian diamond placer deposit / L.H.Kirkpatrick, J.Jacob, A.N.Green // Ore Geology Reviews. 2019. Vol. 107. P. 853-862. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2019.03.029
20. Litvinsev V.S. Gold content in the gold production-generated silt-and-clayey formations in the Far East area of Russia / V.S.Litvinsev, G.P.Ponomarchuk, T.S. Banskchikova // Journal of Mining Science. 2010. Vol. 46. № 5. P. 575-581.
21. Moufti A.M.B. Opaque mineralogy and resource potential of placer gold in the stream sediments between Duba and Al Wajh, Red Sea coast, northwestern Saudi Arabia // Journal of African Earth Sciences. 2014. Vol. 99. Part 1. P. 188-201. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2013.10.011
22. Wills B.A. Mineral processing technology / B.A.Wills, T.J.Napier-Munn. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. 456 p.

Автор В.Е.Кунгурова, канд. геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник, kunwe@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6565-9808> (Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия).