

УДК 553.3`3/9

Минерагеническая позиция и геологический потенциал техногенно-минеральных образований золото-серебряного месторождения Валунистое (Чукотский АО)

В.Н. Голдырев^{a,b}, В.А. Наумов^{a,b}, О.Б. Наумова^b^aЕстественнонаучный институт Пермского государственного национального исследовательского университета

614990, Пермь, ул. Генкеля 4. E-mail: vg121297@yandex.ru

^bПермский государственный национальный исследовательский университет

614990, Пермь, ул. Букирева, 15. E-mail: poisk@psu.ru

(Статья поступила в редакцию 26 марта 2021 г.)

В ближайшие годы рудник ООО «Рудник Валунистый», который ведет разработку золото-серебряных месторождений Валунистое и Горное, исчерпает экономически оправданные запасы. Одним из путей продления срока службы рудника и повышения рентабельности производства должна стать добыча техногенно-минеральных ресурсов. Целью исследования является выделение основных типов ТМО месторождения Валунистое в твердой и гидроминеральной форме, а также оценка возможности их промышленного освоения. Определены и подсчитаны полезные компоненты, содержащиеся в них. Показаны результаты теоретического моделирования физико-химических параметров гипергенного минералообразования твердой части ТМО. Приведены объекты образования технологических вод. Оценены условия концентрации в них золота и других металлов.

Ключевые слова: *Валунистое месторождение, обогащение полезных ископаемых, техногенез, золото-серебряные руды, эпitherмальные месторождения, Охотско-Чукотский вулканический пояс.*

DOI: 10.17072/psu.geol.20.2.172

Введение

На сегодняшний день ООО «Рудник Валунистый» обеспечен экономически оправданными запасами. под открытую отработку сроком на 2 года. Приоритетным путем расширения ресурсной базы является освоение золото-серебряных объектов (табл. 1), расположенных вблизи от рудника на сопредельной лицензии – Канчалано-Амгуэмской площади, также принадлежащей Highland Gold Mining (HGM).

Из всех объектов добыча металла возможна только на месторождении Горное. В 2019 г. на месторождении Жильное не были окончены геологоразведочные работы. Участки Шах и Оранжевый слабо разведаны и на данный момент малоперспективны. Изучение имеющихся геологических и дистанционных материалов показывает высо-

кую степень подобию геологического строения участка Осенний и рудного поля месторождения Купол. Однако он также слабо разведан и находится в 50 км от ЗИФ.

Вблизи от рудника, 30–50 км на северо-восток, АО «Северо-Восточное ПГО» проводятся оценочные работы на Кремовой перспективной площади. Рудопроявления площадей Кремовое и Раздольный могут пополнить ресурсную базу HGM.

Параллельно будут проведены работы по заверке существующих богатых запасов глубоких горизонтов месторождения Валунистое, которые с 2020 г. должны начать отрабатываться подземным способом. Подземные работы продлятся до 2027 г. И по прогнозам HGM, отработка месторождения должна закончиться в 2028 г. В связи со сложившейся ситуацией, по мнению авто-

Таблица 1. Оценка потенциала участков по приросту запасов ООО «Рудник Валунистый» по данным (HGM Annual Report and Accounts, 2019)

Участки	Потенциал Au _{усл.} , т	Категория изученности запасов/ресурсов на текущий момент	Расстояние до ЗИФ Валунистое, км
Валунистое	4,0–6,0	JORC – Indicated+Inferred Традиционный подсчет C ₁ +C ₂	
Жильный	3,0–7,0	JORC – Inferred	21,8
Шах	0,5–1,0	JORC – unclassified. Традиционный оперативный подсчет C ₁ +C ₂	12,2
Горный	3,0–5,0	JORC – Indicated+Inferred Традиционный подсчет C ₂	18,2
Оранжевый	1,0–2,0	Прогнозные ресурсы P ₃	12,4
Осенний	10,0–20,0	Прогнозные ресурсы P ₁ – P ₂	50
Всего	21,5–41,0		

ров, одним из путей продления срока службы рудника и рентабельности производства может стать переработка техногенно-минеральных ресурсов.

Цель работы – на основе известных материалов по изучению геолого-структурного положения, вещественного состава, принятой технологии разработки и обогащения руд месторождения Валунистое выделить основные типы техногенно-минеральных образований (ТМО), в твердой и гидроминеральной форме, оценить возможность их промышленного освоения для продления срока службы рудника и снижения экологической нагрузки на территорию района. Обосновать пути управления геологическими процессами в ТМО. Практика проведения подобных работ показывает, что для достижения этой цели надо учитывать геологические условия формирования месторождения; формы нахождения полезных компонентов; способ разработки и технологии обогащения руд; типы, состав и условия формирования ТМО; особенности и направления изменения состава ТМО в новых условиях геологической среды (Наумов, 2010).

1. Геологические особенности

Геолого-структурное положение

Территория Валунистого рудного поля (рис. 1) расположена в пределах Восточно-

Чукотской фланговой зоны Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (ОЧВП), наложенного на вещественные комплексы Кони-Танюерерской складчатой системы Корякско-Камчатской складчатой области. Территория является составной частью Валунистого рудного узла, расположенного в Канчаланской магмо- и рудоконтролирующей зоне разломов, на участке пересечения ее разломами северо-западного и близширотного простираний (Волков и др., 2006; Сидоров и др., 2009).

Валунистое рудное поле площадью 26 км² приурочено к двум сближенным вулканно-купольным структурам – Валунистой и Шалой, к надинтрузивной части массива леурваамского гранодиорит-гранит-лейкогранитового комплекса позднего мела. Расположено в контуре шлихового ореола золота и высококонтрастных геохимических ореолов золота и серебра. Включает Au-Ag месторождения (Валунистое, Горное, Жильное), ряд проявлений (Огненный, Шах, Осенний) и пунктов минерализации золота и серебра.

В надинтрузивной части массива развиты пропилиты кварц-альбит-хлорит-карбонатного состава и развивающиеся по ним филлизиты (кварц-серицитовые метасоматиты) и аргиллизиты, вмещающие оруденение золото-серебряной формации (Волков и др., 2020).

Рудовмещающие метасоматиты развиты как по риодацитам амгеньского субвулканического комплекса, так и по верхнемеловой вулканогенно-осадочной эkitыкинской свите контрастного состава. Рудоносные метасоматиты чаще встречаются на более глубоких горизонтах месторождения, на уровне развития полевошпат-хлорит-кварцевых жил.

Золото-серебряное оруденение, главным образом, концентрируется в кварцевых и кварц-адуляровых жилах, приуроченных к зонам интенсивной метасоматической проработки вулканических пород (Волков и др., 2019). В меньшей мере отмечается в околожилных метасоматитах, хотя в отдельных случаях интенсивность оруденения значительно выше, чем в жилах. Вертикальный размах оруденения в пределах рудного поля составляет около 300 м. Руды представлены мелкозернистым массивным и полос-

чатым кварцем и адуляром с вкрапленностью пирита, самородного золота. Содержание золота в рудах составляет 5,5–15 г/т, серебра – 30–130 г/т.

По особенностям минерального состава, месторождение является типичным эпитеpмальным объектом ОЧВП, связанным с верхнемеловыми вулканиитами «рудоносной андезит-игнимбрит-гранодиоритовой ассоциации» (Константинов, 2010).

Вещественный состав руд

Руды месторождения относятся к золото-серебряной формации, золото-аргентитовому (акантитовому) типу. Главными породообразующими минералами руд являются кварц, калиевой полевой шпат (ортоклаз, адуляр) и глинисто-гидрослюдистые минералы (серицит, гидрослюда, каолинит).

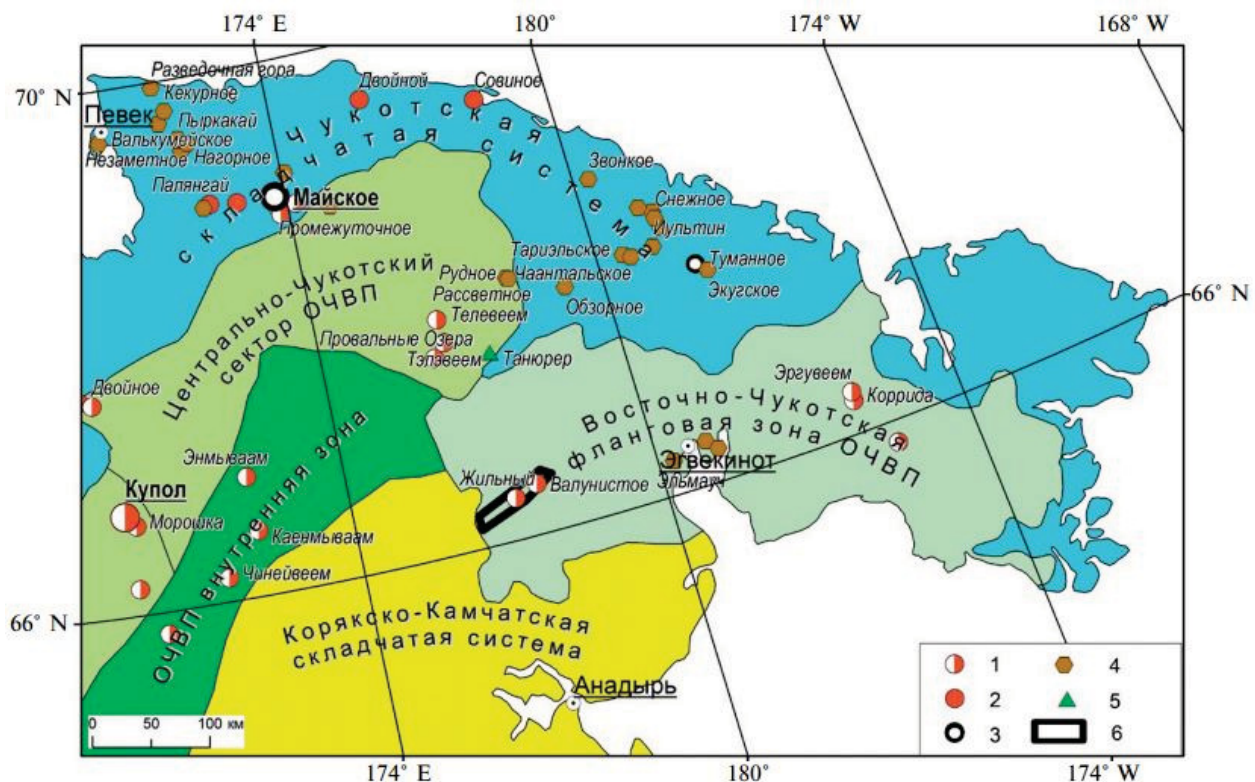


Рис. 1. Положение месторождения Валунистое в региональных структурах, на основе схемы (Белый, 1994): 1–5 – месторождения: 1 – Au-Ag эпитеpмальные, 2 – Au-кварцевые, 3 – Au-сульфидные, вкрапленные, 4 – оловорудные; 5 – Si-Mo-порфировые; 6 – Амгуэмо-Канчаланская металлогеническая зона

Таблица 2. Минеральный состав рудных тел месторождения Валунистое (Волков и др., 2020)

Группа минералов, минералы	Доля, %	Группа минералов, минералы	Доля, %
Породообразующие		Рудные	
Кварц	87	Сульфиды (пирит, аргентит (акантит), галенит, сфалерит, халькопирит)	0,4
Калиевые полевые шпаты (ортоклаз, адуляр)	6	Магнетит	0,2
Глинисто-гидрослюдистые минералы	5	Гидроксиды железа (гидрогетит, гетит), ярозит	0,5
Кальцит	0,2	Сульфосоли серебра	Едини- чные знаки
Хлорит	0,2	Самородные элементы	
Акцессорные минералы		Самородное золото	Знаки
Рутил, амфиболы, циркон, эпидот	0,5	Самородное серебро	Редкие знаки

Их содержание, по результатам рентгено-структурного фазового анализа (табл. 2), составляет (%): кварц – 87, калиевый полевой шпат – 6, глинисто-гидрослюдистые минералы – 5, хлорит, ярозит – следы (Савва, 2018).

Руды убогосульфидные с содержанием сульфидов до 0,5% (Савва, 2018). Среди сульфидных минералов преобладает пирит (99,3%) со средним содержанием в рудных пробах в основной массе не выше одного процента. Пиритовая минерализация характерна всем разностадийным минеральным комплексам. Заметное количество установлено в минеральных образованиях раннего дорудного комплекса в виде тонко- и мелкокрапленных скоплений в обломках окварцованных пород. Форма пиритовых выделений разнообразна: идиоморфные и неправильные зерна без выраженных кристаллических ограничений, кристаллические сростки и тонкозернистые выделения. Среди тонких вкрапленных скоплений пирита, обычно приуроченных к обломкам окварцованных пород, часто наблюдаются округлые метакolloидные формы. На долю аргентита приходится около 0,6% (Савва, 2018).

Химический состав руд определяют литофильные элементы (табл. 3). Сумма кремнезема и глинозема составляет 94,87–95,78%. Суммарное количество оксидов щелочных металлов – 1,72–1,84%. При этом существенно преобладает оксид калия. На оксиды железа приходится около 1%, при этом по соотношению окисного и закисного железа в

пробе 2012 г. руды относятся к слабоокисленным. Суммарное количество остальных оксидов не превышает 1% (Волков и др., 2020).

Халькофильные элементы (свинец, медь, цинк, ртуть), характерные для многих золоторудных месторождений, присутствуют в ничтожно малом количестве, меньше кларкового. Это же относится и к другим примесям, таким как мышьяк и сурьма, повышенные концентрации которых отрицательно сказываются на процессе цианирования. Основными полезными компонентом руды являются золото и серебро.

Золото в руде присутствует в основном в самородном виде. Пробность золота, по данным микросондового анализа, варьирует в пределах от 460 до 870‰. Отмечаются два максимума 560–600‰ и 820–850‰. Максимальный размер золотинок 0,2 мм (табл. 4). Существенно преобладает тонкое и пылевидное золото (Журавкова и др., 2019). Форма золотинок преимущественно уплощенно-правильная, чешуйчатая. Поверхность частиц золота бывает покрыта гидроксидами железа и кремнеземом, иногда фиксируется серебряная чернь.

Для определения форм нахождения и характера связи золота с рудными и породообразующими минералами были проведены рациональные анализы по методике ОАО «Иргиредмет» на материале крупностью 95% класса минус 0,074 мм. Результаты представлены в табл. 5 (Журавкова и др.,

2019). Цианированием, при данной крупности измельчения, извлекается 96,8% золота и 77,2% серебра.

По результатам исследования методом атомной абсорбции (Русанов и др., 2019),

содержание платины в рудах месторождения составляет от 0,21 до 25,9 г/т. Следовательно, ресурсный потенциал платиноносности Au-Ag формации достаточно велик.

Таблица 3. Химический состав рудных тел месторождения Валунистое (Волков и др., 2020)

Компоненты	Массовая доля, %	Компоненты	Массовая доля, г/т
SiO ₂	90,12	Ni	<1
TiO ₂	0,11	Co	<1
Al ₂ O ₃	4,75	Cr	23
Fe _{общ}	н.о.	W	<1
Fe ₂ O ₃	0,71	Mo	<1
FeO	0,21	Sr	2
Fe _{сульф}	0,096	Sb	4
MnO	0,11	Sn	8
MgO	0,49	Ba	38
CaO	0,47	Cu	10
Na ₂ O	0,15	Pb	15
K ₂ O	1,69	Zn	15
п.п.п.	0,99	Bi	1
P ₂ O ₅	<0,005	As	8
CO ₂	0,15	Cd	<1
S _{общ.}	0,12	Hg	0,05
S _{сульф}	0,073	Au	5,0
H ₂ O	0,67	Ag	50,0

Таблица 4. Гранулометрические характеристики золота (Журавкова и др., 2019)

Класс крупности, мм	-0,25 +0,15	-0,15 +0,10	-0,10 +0,071	-0,071 +0,05	-0,05 +0	Итого
Массовая доля золота, %	0,8	0,3	0,6	1,3	96,9	100

Таблица 5. Результаты фазового анализа золота и серебра по данным (Журавкова и др., 2019)

Форма нахождения и характер связи благородных металлов с рудными и породообразующими минералами	Распределение			
	Золото		Серебро	
	г/т	%	г/т	%
Золото в виде свободных зерен с чистой поверхностью. Серебро в составе золота	1,67	31,5	1,89	3,8
В открытых сростках	3,46	65,3	30,29	60,8
Связанные с кислоторастворимыми минералами	0,10	1,9	9,11	18,3
Связанные с сульфидами	0,03	0,5	8,22	16,5
Связанные с породообразующими минералами	0,04	0,8	0,30	0,6
Содержание по балансу	5,3	100,0	49,8	100,0

2. Технология разработки и обогащения руд

Разработка месторождения Валунистое ведется открытым карьерным способом на двух зонах минерализации Главной и Новой.

Месторождение Горное находится на расстоянии 18 км от месторождения Валунистое. Руда месторождения Горное транспортируется на Валунистое для переработки. Максимальная производительность золото-

извлекательной фабрики (ЗИФ) – 350000 т руды в год.

Обогащение руд осуществляется по схеме цианирования металлов с сорбцией на уголь и предусматривает следующие основные технологические процессы:

- 1) трехстадиальное дробление руды до крупности минус 12 мм;
- 2) двухстадиальное измельчение материала в шаровых мельницах до крупности 85% класса минус 0,071 мм, с предварительным цианированием в шаровых мельницах;
- 3) классификацию пульпы в спиральных классификаторах и контрольную классификацию в гидроциклонах;
- 4) сгущение слива гидроциклонов;
- 5) предварительное цианирование сгущенного продукта;
- 6) сорбционное выделение благородных металлов из пульпы на уголь;
- 7) десорбцию сорбента щелочными растворами в автоклавной установке;
- 8) электролитическое выделение золота и серебра из товарных элюатов;
- 9) обезвреживание хвостов цианирования, фильтрация и складирование кека в хвостохранилище;
- 10) сушка, прокалка и плавка катодного осадка с получением товарного продукта – сплава Доре.

В настоящее время технологическая схема ЗИФ позволяет извлечь в товарный продукт 95,3–96,0% золота и 67–75,% серебра при содержании в исходной руде 5 г/т золота и 50 г/т серебра (Волков и др., 2020). Производство в 2017 г. составило: 1043 кг золота и 10781 кг серебра.

Конечными продуктами ЗИФ являются сплав Доре и угольная крошка, которая образуется в результате грохочения термически реактивированного угля автоклавной десорбции. В составе угольной крошки содержится 0,47% и 0,45% добытого золота и серебра соответственно (Волков и др., 2020). В 2017 г. это составило 4,9 кг золота и 50,6 кг серебра.

3. Техногенно-минеральные образования

В процессе обработки месторождения (в том числе обогащения) образуются многочисленные технологические продукты –

«хвосты» обогащения или ТМО. Нами они рассматриваются как неочтенный минеральный ресурс, который находится в твердой и жидкой фазе.

Следует отметить, что многие ТМО вовлечены в технологический оборот ЗИФ. Это технологические воды, термически реактивированный уголь, продукты вторичного концентрирования раствора электролиза (уголь, раствор), а также шлаки плавки. Среди ТМО, которые не используются или используются частично, выделены следующие, перспективные для практического использования, типы.

ТМО горнодобывающего производства

Отвалы вскрышных пород. Площадь размещения отвалов (рис. 2) представлена наклонной поверхностью. Общая площадь, занимаемая отвалом, с учетом существующих отвалов, составляет 72 га. Вместимость отвала с учетом коэффициента разрыхления 1,3–11,44 млн. м³. Крупность кусков в отвале вскрышных пород достигает 1,1 м, мелочь практически отсутствует.

Отдельным отвалом на Главной зоне складировались *забалансовые руды*. С учетом бортового содержания, содержание условного золота в отвалах может достигать 0,8 г/т. При дальнейшей подземной разработке месторождения, содержание может возрасти до 4 г/т. В отвалы вскрышных пород направляются коренные породы, а также маломощные коры выветривания (КВ).

Коренные породы. Химический и минеральный состав *коренных пород*, поступающих в отвалы, отличается от состава руды только содержанием в них благородных металлов. Среди гипергенных минералов встречаются ковеллин, борнит, халькозин, самородное золото, акантит, азурит, малахит, гетит, гидрогетит, оксиды Mn, гидроксиды Fe и Mn, теллулаты.

Коры выветривания являются продуктами выветривания минерализованных пород с невысоким содержанием золота и сульфидов. Они практически не оказывают влияние на изменение макросостава региональных гипергенных растворов.

На территории Валунистого рудного поля при полевых наблюдениях и на космических

снимках хорошо заметны участки развития сильно ожелезненных глинистых КВ. В большинстве случаев этим образованиям соответствуют участки выровненного, сглаженного рельефа. Они, как правило, занимают среднее положение по высоте, отсутствуя как в глубоких врезках, так и на вершинах, сложенных базальтами и риодацитами верхней пачки. Часто платобазальты непосредственно соприкасаются с этими породами, возможно перекрывая их.

Полевые наблюдения, включая проходку копушей глубиной до 1 метра (рис. 2, 3), показали, что слой ожелезненных (алых) пород имеет мощность не более первых десятков сантиметров, ниже располагаются глинисто-щебенистые белые каолинизированные породы с частично окисленным пиритом. При

этом количество глины вниз по разрезу убывает, породы переходят в плотные аргиллизированные вулканиты (рис. 3). Это остаточные латеритные КВ, сформированные по аргиллизированным вулканитам в период частичной пенеппенизации территории. Облик КВ соответствует эталонным объектам (рис. 3, 4) (Калинин, Росляков, 2015).

КВ широко развиты не только в пределах Валунистого рудного поля, но и всего ОЧВП. Местами они выходят на поверхность, но обычно перекрыты пострудными образованиями. В процессе разработки месторождения их вскрывают, вывозят в отвалы (из-за относительно низкого содержания металлов и малой мощности). КВ размываются атмосферными водами.

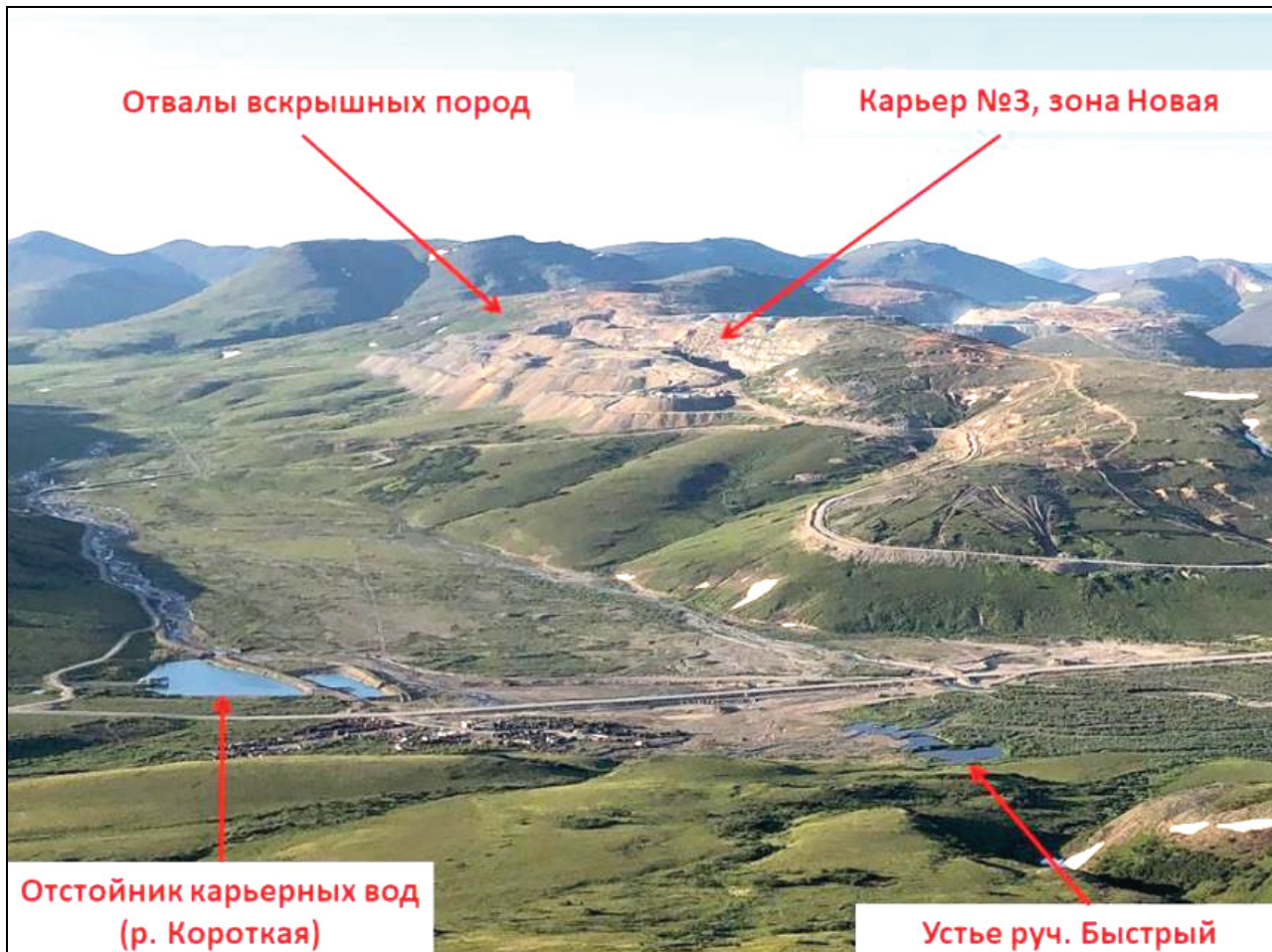


Рис. 2. Отвал вскрышных пород, отстойник карьерных и подотвальных вод месторождения Валунистое

Продуктом, перспективным для извлечения металлов из отвалов вскрышных пород, яв-

ляется гидроминеральное сырье, обогащенное продуктами дезинтеграции осадков.

Рудный двор ЗИФ. Несмотря на то, что складированный на рудном дворе материал не является отходом производства, он формирует самостоятельный тип ТМО.

Руду, добытую на карьерах, автомашинами доставляют на открытый склад, дробят до

размера 75–125 мм, взвешивают на автомобильных весах и складывают на рудном дворе ЗИФ (рис. 4). При добычных работах руду с разным содержанием золота (по данным геологического опробования) сортируют и отдельно складывают.

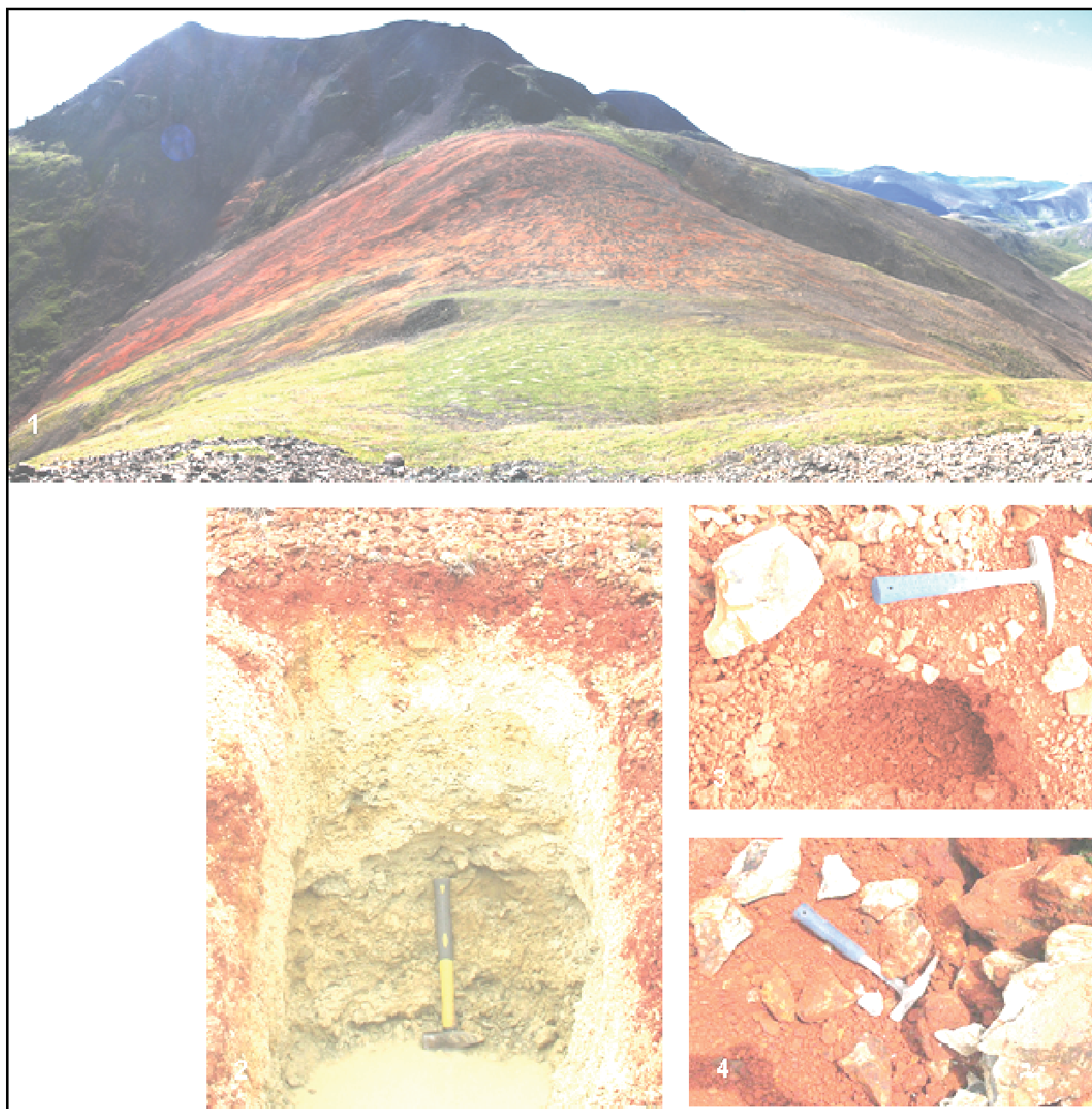


Рис. 3. Латеритные коры выветривания по аргиллизитам: 1 – вид на центральную часть участка Горный с востока, на заднем плане – южная половина гребня горы Горная; 2 – шурф на западном склоне зоны «Пологая», участок Горный; 3. – коры выветривания по аргиллизированным вулканитам, участок Горный; 4 – латеритные золотоносные коры, сформированные по аргиллизитам, развитым по меловым вулканитам среднего состава, Агусан дель Норте, о. Минданао, Филиппины



Рис. 4. ЗИФ «Рудник Валунистый» на момент начала эксплуатации, 2003 г.



Рис. 5. Отвалы кеков месторождения Валунистое на карьере №1, зона Главная

В настоящее время богатые участки (верхние горизонты) месторождения Валунистое отработаны и частично находятся на складе. Добывают руду с содержанием золота около 3 г/т. Для подачи на обогащение, руда из различных добычных блоков усредняется для получения содержания золота, принятого в технологической схеме обогащения, около 5 г/т. Со склада руда погрузчиком или бульдозером подается в приемный бункер дробильного отделения. На участках рудного двора богатая руда с содержанием выше 10–15 г/т (с месторождения Горное) находится несколько лет, ожидая смешивания с бедной рудой Валунистого. Руда разрушается под действием природных процессов промораживания и оттаивания, испытывает влияние атмосферных вод.

Перспективными для практического использования следует считать технологические воды ТМО, образующиеся в результате разрушения и промывки пород рудного двора атмосферными осадками.

ТМО обогатительного производства

Отвалы кеков. При гидрометаллургической переработке золотосодержащей руды в качестве отходов образуется отработанный рудный материал (кек), по минеральному и химическому составу практически аналогичный вещественному составу исходного материала. Руда была раздроблена и истерта до состояния 85% выхода класса менее 71 мкм. Суточный объем кека при 20% влажности составляет 602,95 м³ (Волков и др., 2020). Размер частиц в кеке не превышает 0,4 мм. Отличием ТМО является то, что из осадков существенно извлечены благородные металлы (Au – 0,22 г/т, Ag – 12,22 г/т), и сокращено содержание минералов пониженной твердости (низкой гипергенной устойчивости), «перетертых» в процессе истирания и вынесенных водой в виде взвеси.

Кек после фильтрации по ленточным транспортерам поступает в промежуточные бункера, откуда автомобильным транспортом отвозится в отвал, смешиваясь с пустой породой и замораживается (рис. 5).

Судя по ранее проведенным работам, для шламохранилищ, образованных при разра-

ботке золоторудных месторождений, для материала кека характерно сохранение гипергенно устойчивых минералов, которые с трудом поддаются истиранию. Среди минералов легкой фракции преобладают кварц, частично полевые шпаты и глинисто-гидрослюдистые минералы. Среди минералов тяжелой фракции – магнетит, рутил, циркон, эпидот и пирит. Здесь же находятся не извлеченные цианированием благородные металлы.

Кек является самым перспективным и доступным ТМО для дополнительного извлечения металлов. Содержание золота в кеках колеблется от 0,15 до 0,8 г/т, серебра – от 5 до 27 г/т. По самым скромным подсчетам, на него приходится 4,41% золота и 15,18% серебра, добываемого на месторождении (Михайлов, 2007). В 2017 г. это составило 46,0 кг золота и 1646,8 кг серебра.

С учетом того, что по планам Highland Gold (компания-владелец ООО «Рудник Валунистый») к концу отработки (2003–2028 гг.) будет переработано около 8 млн т руды со средним содержанием 5 г/т золота и 50 г/т серебра (произведено около 38 т золота и 290 т серебра), отвалы кеков будут содержать примерно 2,4 т золота и 95 т серебра. Так как платиноиды не цианируются, большая их часть остается в составе кеков. По ориентировочным расчетам, за год в отвалах кеков накапливается не менее 60 кг минералов платиновой группы.

Фазовый анализ золота является необходимым для понимания возможности извлечения благородных металлов из хвостов обогащения (кеков). Исходя из сходства условий образования, геологического строения, состава жильных руд, технологии обогащения (Голдырев, Наумов, 2020; Григорьев и др., 2018), в качестве объекта-аналога было выбрано золото-серебряное месторождение Купол (Верхнеяблонская металлогеническая зона), также расположенное на северо-востоке ОЧВП. Жильные руды обоих месторождений представляют собой эпитермальный низкосульфидизированный тип оруденения.

Фазовый анализ золота на месторождении-аналоге позволяет предположить похожий состав извлекаемого золота месторождения Валунистое (табл. 6). В кеках цианиро-

Таблица 6. *Формы нахождения золота в кеках цианирования месторождения Купол (Григорьев и др., 2018)*

Формы нахождения золота	Массовая доля, %
Свободное (амальгамируемое)	Следы
Свободное (амальгамируемое) после доизмельчения до 98 % –71 мкм	1,5
Сростки с рудными и породообразующими компонентами (цианируемое в присутствии сорбента)	30,3
Всего в доступной сорбционному цианированию форме	31,8
Ассоциация с сульфидами (извлекаемое цианированием после обработки HNO ₃)	34,8
Ассоциация с гидроксидами железа, карбонатами и другими минералами, растворимыми в HCl	15,2
Тонковкрапленное в породообразующие минералы	13,6
Покрытое поверхностными пленками, извлекаемое после обработки щелочами	4,6

вания практически полностью отсутствует свободное золото. В цианируемой форме находится около одной трети золота, преимущественно – это сростки с породообразующими минералами. Половина не извлеченного золота находится в связи с сульфидами в виде взвеси, часть сорбирована и восстановилась на карбонатах, часть сохранилась и образовала химические соединения с гидроксидами железа.

Продуктом, перспективным для дополнительного получения золота и серебра, может служить твердая фаза кека. Если предусмотреть гравитационное обогащение материала, направляемого на фильтрацию, то можно получить концентрат минералов тяжелой фракции. Согласно экспериментальным данным, в концентрате, доля которого составит 0,1–1,6% массы твердой части (табл. 3), будут находиться аксессуарные, рудные минералы (сульфиды, их сростки) и минералы благородных металлов. Существенная доля золота, не извлеченного цианированием (до 90%), может быть извлечена в гравитационный концентрат. Часть металла останется в растворенном состоянии (Голдырев, Наумов, 2020).

Получение гравитационного концентрата минералов тяжелой фракции решает две важнейшие задачи: дополнительное извлечение благородных металлов и удаление рудных минералов из твердой фазы кека (ТМО). Безрудная часть ТМО может представлять интерес для производства высокотехнологичной продукции каменного литья или производств на основе использования кремнезе-

ма. Кроме того, безрудная часть ТМО, после удаления гипергенно неустойчивых рудных минералов, становится инертной. В ТМО останутся исключительно устойчивые минералы, по составу преимущественно кварц и полевые шпаты. Такие ТМО не будут изменять состав окружающей среды.

Оборотные сливы водоотстойника. Воды (верхний слив сгустителя после сорбции, фильтрат, промвода после промывки насыщенного угля, а также воды с промышленных сооружений вахтового поселка) «осветляют» за счёт осаждения большей части механических взвесей. Их очищают от нефтепродуктов на локальных очистных сооружениях, и воды поступают для повторного использования в систему оборотного водоснабжения ЗИФ. Сброс вод в поверхностные водотоки не происходит.

Верхний слив сгущения пульпы поступает в сорбционные колонны. Растворы после сорбции направляются в прудок оборотных вод площадью 3,3 га (рис. 4). Нижний слив сгущения отправляется на сорбционное выщелачивание, которое осуществляется с противоточным движением пульпы и угля в течение 6 часов, с дорастворением золота до 96%, серебра до 85% с одновременной сорбцией на уголь из раствора золота 99%, серебра 83% (Михайлов, 2007). После выщелачивания и сорбции выходит пульпа и насыщенный уголь. Пульпа фильтруется. Фильтрат направляется в водоотстойник.

Насыщенный уголь промывается, отделяется от песков и шламов. Промвода направляется в оборот через водоотстойник. С уче-

том того, что за год ЗИФ работает 8000 часов, через водоотстойник проходит около 9,5 кг золота и 1556 кг серебра. Помимо благородных металлов в руде присутствуют полезные примеси, которые также поступают в водоотстойник в количестве (кг/год): Cu – 1792, Zn – 300, Ni – 100, Fe – 26792 (табл. 7).

Металлы, попадающие в оборотные растворы из прудка, после цианирования находятся в растворе. Раствор направляется на стадию измельчения, где металлы сорбируются при сорбционном выщелачивании руды и сорбции слива сгущения. При многократном использовании оборотных растворов

Таблица 7. Материальный баланс вод оборотного прудка ЗИФ «Рудник Валунистый» (Михайлов, 2007)

Наименование	Объем, м ³ /час	Содержание, г/м ³		Количество, г/час		Потери, %	
		Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag
Верхний слив сгущения	112,5	0,0001	0,251	0,0116	28,267	0,007	2,026
Фильтрат	32,375	0,036	5,136	1,1655	166,278	0,769	11,920
Промвода от промывки насыщенного угля	5,26	?	?	?	?	?	?
Добавка свежей воды (в т.ч. приход с рельефа)	4,145	-	-	-	-	-	-
Всего:	154,28	0,008	1,261	1,1771	194,545	0,776	13,946



Рис. 6. Слив обезвреженного раствора кека с ЗИФ «Рудник Валунистый». 1 – общий вид места сброса; 2 – зона влияния слива; 3, 4 – результат техногенного воздействия в зоне слива

примеси накапливаются, что препятствует выщелачиванию и сорбции золота и серебра

Раствор кека. После фильтрации, двигаясь по ленточному конвейеру, кек промывается и обрабатывается раствором гипохлорита для обезвреживания. Получившийся раствор стекает в ручей под ЗИФ (рис. 6). С раствором кека теряется 0,131% золота и 1,955% серебра от исходной руды (Михайлов, 2007). Для 2017 г. это 1,4 кг золота и 210,8 кг серебра.

В табл. 8 продемонстрирован расчет теоретического годового баланса распределения металлов на ЗИФ «Валунистое» при максимальной производительности (количестве перерабатываемой руды и коэффициенте извлечения) фабрики. Принято среднее содержание золота 5 г/т, серебра – 50 г/т, объем поступающего угля 100 т в год.

4. Прогноз процессов техногенеза или преобразования минерального состава осадков и химического состава технологических вод

Созданные ТМО (отвал вскрышных пород, породы на территории рудного склада и осадки шламохранилища) находятся в зоне гипергенеза. Преобразование неустойчивых минералов в осадках происходит за счет физико-химических и биохимических процес-

сов разрушения. Динамику и кинетику разрушения ТМО определяют процессы, связанные с их промораживанием и оттаиванием, взаимодействием с атмосферными, технологическими водами, при участии микроорганизмов, грибов, бактерий. Протекают естественные геологические процессы гипергенного (техногенного) минерало- и пороодообразования, «приспособления» осадков к новым условиям геологической среды (Наумов, 2010).

Район работ расположен в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород неравномерной мощности. На водоразделах мощность мерзлоты достигает 350–400 м, а на склонах и под днищами долин уменьшается до 50–60 м. Мощность сезонной оттайки зависит от экспозиции склонов и составляет 0,2–0,6 м. Наличие многолетнемерзлых пород обуславливает широкое развитие криогенных процессов: пучения, морозобойного трещинообразования, термокарста, наледей, солифлюкции, что способствует разрушению первичных минералов, выносу и миграции металлов.

Твердая часть ТМО. Первичный состав твердой части ТМО после дробления и истирания меняет свою структуру. Кроме гипергенного минералообразования в местах длительного лежания горных пород (отвалы

Таблица 8. Теоретический расчет годового баланса распределения металлов на ЗИФ «Валунистое»

Продукт	Выход, тыс. т/год	Au			Ag		
		Содержание, г/т	Извлечение, %	Объем, кг/год	Содержание, г/т	Извлечение, %	Объем, кг/год
Поступает:							
Исходная руда	350000	5,0	100,0	1750,0	50,0	100,0	17500,0
Уголь	100,0						
Выход полезного продукта:							
Лигатурное золото	-	-	95,0	1662,5	-	75,0	13125,0
Угольная крошка	100,0	87,0	0,5	8,7	870,0	0,5	87,0
Выход ТМО:							
Кек	350000	0,22	4,4	77	11,25	22,5	3938,0
Раствор кека	-	-	0,1	1,8	-	2,0	350,0

вскрышных пород, отвалы кеков, рудный склад) под воздействием воздуха и атмосферных осадков, благодаря окислению, выщелачиванию, действию бактерий и микроорганизмов образуются техногенные воды, обогащенные металлами первичных руд.

Преобладание в составе кеков кремнезема определяет процессы преобразования вещества, физико-химические параметры которого изменяются слабо. Из калиевого полевого шпата образуются кварц, каолинит, мусковит. При разложении сульфидов происходят следующие химические реакции: пирит замещается гематитом, галенит – англезитом, сфалерит не растворяется сразу, сначала происходит образование цинкита, борнит сразу переходит в тенардит (Бортникова и др., 2006).

Процессы преобразования сульфидов прослежены на разных участках их развития и выхода на поверхность. Типичные изменения выражаются в изменении внешнего облика отвалов, появление новообразованных фаз, вертикальная и латеральная зональность. Первичными продуктами разложения сульфидов являются белые налеты на их поверхности, связанные с формированием кристаллогидратов сульфатного железа для пирита, марказита (розенит, смольнокит, мелантерит, кокимбит) (Наумов, Хусаинова, 2017). Поверхность ТМО покрывают агрегаты тонкозернистого ярозит-кварцевого материала желтого цвета. Под нею выделяется серая сульфидная мелкозернистая масса. Корки и пленки агрегатов продуктов гипергенного (техногенного) преобразования первичных сульфидов в виде кристаллогидратов сульфатов железа практически полностью покрывают сульфидную массу (Бортникова и др., 2006). В случае, если рядом находятся застойные воды, в них можно диагностировать обогащенную гидроксидами железа ржавую воду. Эти показатели зон гипергенного изменения и новообразования являются прямыми индикаторами наличия сульфидной минерализации. Они интересны для дальнейшего изучения, так как на месте нахождения кристаллогидратов сульфатного железа происходит высвобождение золота и других металлов (Наумов, Наумова, 2020).

Их выделение происходит как в твердой фазе в виде микро- и наночастиц, так и путем перевода в ионную форму и раствор.

Криогенные процессы промораживания и оттаивания ТМО катализируют разложение сульфидов и способствуют высвобождению золота. Установлено, что при единичном цикле промерзания и оттаивания до 20% первичных сульфидов переходят в сульфатные фазы в виде кристаллогидратов металлов. А частицы золота могут цементировать продукты разложения сульфидов. Могут служить подложкой, на которой кристаллизуются сульфаты, образуя скорлупу пленку толщиной до 2,0–3,0 мм. На частицы золота оседают мелкие частицы сульфидов и других сульфатов железа (Наумов, Хусаинова, 2017).

Гидроминеральная часть ТМО. При разработке рудников открытым и подземным способом нарушается рельеф, вскрываются горизонты невыветрелых пород, изменяются условия формирования водного стока.

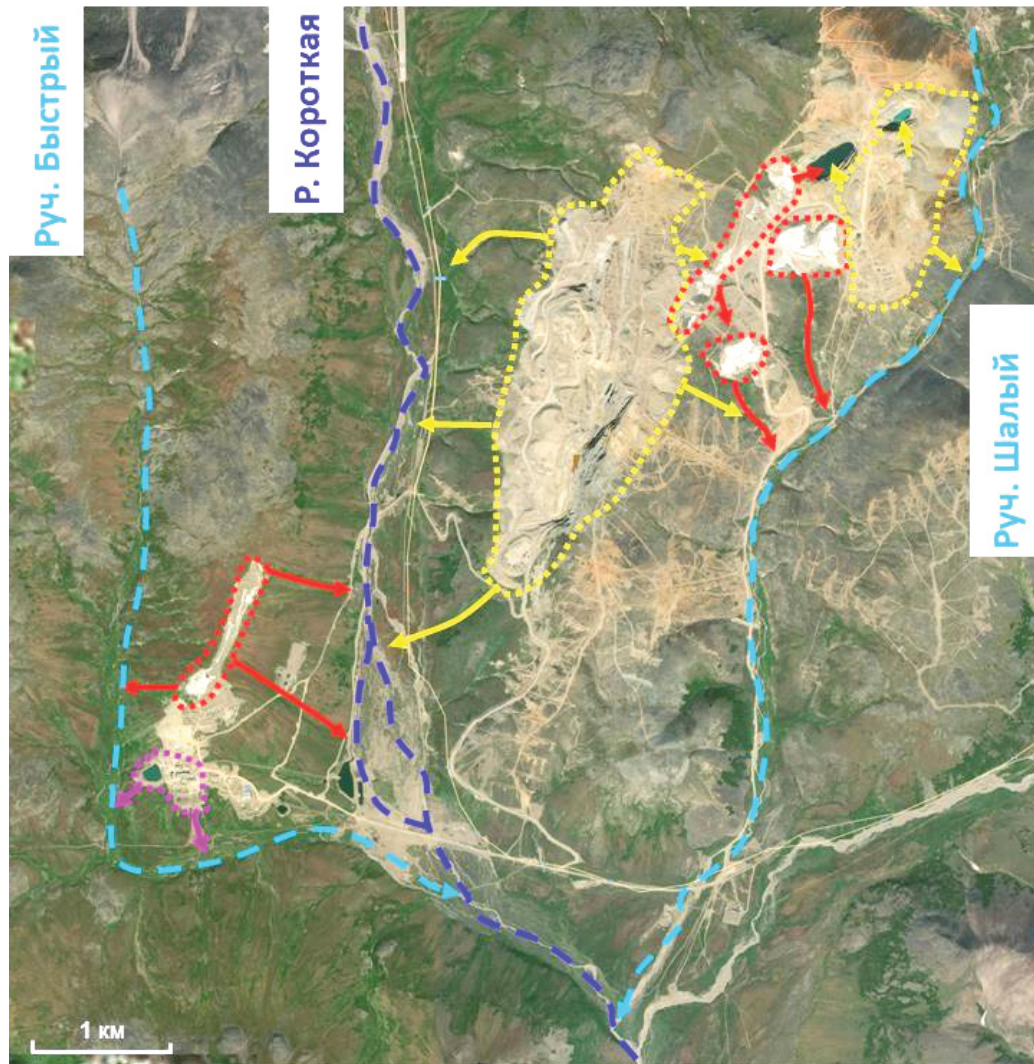
Водоприток карьерного водоотлива формируется за счет притоков подземных вод, поверхностных стоков от дождей и ливней, а также таяния снежного покрова. Подземные воды, циркулируя внутри месторождения, растворяют сульфиды. В результате этого формируются кислые сульфатные воды, несущие рудные элементы. Атмосферные воды, попадая на горные выработки (карьеры, канавы, траншеи, расчистки, отвалы некондиционных руд), выносятся за пределы карьера. Эти воды попадают в объекты гидросферы, создавая новую природно-техногенную систему.

В хвостах обогащения силикатного состава общая минерализация техногенных вод низкая. Основные элементы, находящиеся в растворе – сера и калий. Через определенное время повышается концентрация железа, алюминия и цинка. Преобладающей формой нахождения для всех металлов является ионная, кроме того, до 40% металлов может находиться в сульфатной форме. В стоячих техногенных водах основными минералами, формирующими осадок, являются гематит, ярозит и англезит (Бортникова и др., 2006).

В сернокислом процессе золото интенсивно перераспределяется, мигрируя из од-

них горизонтов и накапливаясь в других, что определяется, главным образом, сульфидностью первичных руд, рН и Eh гипергенных растворов. Важную роль при распределении золота в водах и осадках имеет совокупность различных геохимических барьеров (Калинин и др., 2015): кислого, щелочного, восстановительного, биогенного, электрохимического, сорбционного. Нейтральные и слабощелочные среды являются наиболее бла-

гоприятными условиями для вторичной концентрации золота, а слабокислые и щелочные окислительные условия способствуют активной миграции золота (Хусаинова и др., 2020). Наличие сульфидов и карбонатов определяют химический состав среды переноса и осаждения золота. Попадание золота в слабокислую среду почв (рН 5–6) и ручьев (Хусаинова и др., 2020) будет способствовать его дальнейшей миграции.



Условные обозначения:

Зона формирования вод и основное направление их миграции

	- Стоки отвалов кеков
	- Стоки вскрышных отвалов
	- Стоки ЗИФ

Рис. 7. Направления и пути миграции минерализованных техногенных вод (гидроминеральной части ТМО) на руднике «Валунистый»

Вероятные пути миграции гидроминеральной части ТМО изображены на рис. 7. Продукты растворения рудного вещества выносятся техногенными сточными и карьерными водами в конечный водоток р. Короткая. Воды реки относятся к гидрокарбонатно-кальциевому типу, рН вод 5.3–7.1. Поймы и русла рек сложены хорошо промытым песчано-галечным материалом. Река является конечным водосбором технологических вод горного производства и интегрирует в своем составе разные химические соединения. Часть из них нейтрализуется и осаждается на природных геохимических барьерах и сорбентах.

Полезные компоненты в этих водах находятся в растворенном состоянии (жидкий фильтрат) и при смене геохимической обстановки образуют новые минеральные фазы в виде твердой взвеси. Частично взвесь сорбируется на илово-глинистом веществе.

На реке, под вахтовым поселком, расположен отстойник карьерных вод (рис. 4), являющийся объектом, перспективным для организации пункта сорбции металлов. В начальный период разработки месторождения, при вскрытии верхних горизонтов месторождения, карьерные воды по водоотводной канаве самотеком поступали в отстойник карьерных вод, расположенный ниже по рельефу этих горизонтов. При вскрытии нижних горизонтов месторождения для отвода карьерных вод стали применять специальные передвижные насосные станции, предназначенные для перекачки сильнозагрязненных жидкостей с механическими примесями. Насосные станции установлены на нижнем горизонте у водосборника. Через систему напорных трубопроводов воды подают на борт карьера и далее в отстойник карьерных и подотвальных вод (рис. 2).

5. Предложения по управлению составом осадков, технологических вод и экологическим состоянием территории

Для «текущих хвостов» – ТМО, образующихся в настоящее время принятой технологической схеме обогащения руд предлагаются следующие мероприятия:

1) гравитационное разделение шламового материала (кека) с выделением «рудного

концентрата», содержащего тяжелые минералы (пирит, другие сульфиды, не подверженное цианированию золото) и сростки руд, и «безрудного продукта», в котором преобладают устойчивые к истиранию (гипергенно устойчивые) минералы (кварц, серицит, алунит);

2) раздельное складирование рудной и безрудной части;

3) запуск рудной части в технологический передел с извлечением полезных компонентов;

4) запуск безрудной части в технологический передел с производством инновационной продукции на минеральной основе гипергенно устойчивых минералов, истертых до микрозернистого состояния (71–74 мкм);

5) организация потоков технологических вод таким образом, чтобы обогащенные металлами воды пропускали через сорбционно-ионообменные колонны, фильтровальные системы для осаждения металлов из технологических вод.

Параметры технологических режимов, подбор реагентов для сорбции и ионообмена, иные технологические решения можно найти путем опытного обогащения и специальных минералого-химических и технологических исследований.

Для «лежалых хвостов» – ТМО, накопленных и складированных в хвостохранилище (отвал кеков), необходимо провести изучение вещественного состава минеральных и породных новообразований, химического состава осадков, техногенных вод, основных и редких компонентов. Определить формы нахождения и виды полезных продуктов, принципиальные способы их разделения. На основании полученных данных обосновать целесообразность и технологии переработки материала хвостохранилища. Выполнить работы по поиску и анализу технологических путей решения по схеме изучения «текущих хвостов» с разделением на рудную и безрудную часть, выделением технологических вод и системами извлечения полезных продуктов.

Заключение

Анализ состояния минерально-сырьевой базы ООО «Рудник Валунистое» позволяет

сделать вывод, что экономически оправданные запасы в ближайшее десятилетие закончатся. Одним из путей продления срока службы рудника и снижения экологических последствий разработки месторождения является грамотная оценка и эффективная переработка техногенно-минеральных ресурсов.

В результате изучения вещественного состава руд, методики добычи, технологических схем обогащения и производства продукции на эпитеpmальном месторождении Валунистое были выделены различные типы ТМО, которые содержат широкий спектр полезных компонентов.

Использование вещества ТМО месторождения Валунистое возможно в различных областях промышленности и народного хозяйства. А на полигоне отвалов кеков следует провести специальный комплекс исследований для обоснования производства дополнительного спектра ликвидной продукции, как в твердом, так и жидком виде. Извлечение металлов из отвала кеков, использование техногенных вод как гидроминерального сырья с попутным извлечением растворенных металлов, управление процессами разложения сульфидов обеспечат снижение экологической нагрузки на территорию района месторождения. Переоценка минеральных ресурсов с учетом твердой и жидкой части ТМО месторождения Валунистое, разработка технологических решений к вовлечению неучтенных ресурсов в хозяйственный оборот принесет существенный экономический и экологический эффект.

Дополнительный доход предприятию обеспечат мероприятия в рамках «наилучших доступных технологий» по уменьшению выбросов, снижению платы за количество отходов, доход с продажи других полезных компонентов, увеличение извлечения золота и серебра, налоговые льготы и государственная финансовая поддержка.

Библиографический список

Белый В.Ф. Геология Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1994. 76 с.

Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Бессонова Е.П. Геохимия техногенных систем / Отв. ред.

Г.Н. Аношин. Ин-т геологии и минералогии СО РАН. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео». 2006, 169 с.

Волков А.В., Гончаров В.И., Сидоров А.А. Месторождения золота и серебра Чукотки. М.: ИГЕМ РАН; Магадан: СВКНИИ ДВО РАН. 2006. 222 с.

Волков А.В., Прокофьев В.Ю., Сидоров А.А. и др. Условия формирования эпитеpmальной Au–Ag минерализации Амгуэмо-Канчаланского вулканического поля (Восточная Чукотка) // Вулканология и сейсмология. 2019. № 5. С. 68–80.

Волков А.В., Прокофьев В.Ю., Винокуров С.Ф., Андреева О.В., Киселева Г.Д., Галямов А.Л., Мурашов К.Ю., Сидорова Н.В. Эпитеpmальное Au–Ag месторождение Валунистое (Восточная Чукотка, Россия): геологическое строение, минералого-геохимические особенности и условия рудообразования // Геология рудных месторождений. 2020. Т. 62. № 2. С. 107–133.

Голдырев В.Н., Наумов В.А. Геологический анализ техногенно-минеральных образований Au–Ag эпитеpmального месторождения Купол (Чукотский АО) // Сборник трудов конференции «Наука и инновации – современные концепции» (Москва). Т. 2. Уфа: изд-во «Инфинити». 2020. С. 117–133.

Григорьев Н.В., Маринич М.А., Дудко И.С. Основные причины возникновения сверхнормативных потерь ценного компонента с хвостами обогащения и возможные пути сокращения финансовых рисков добывающих предприятий // Рациональное освоение недр. 2018. № 1. С. 54–60.

Журавкова Т.В., Пальянова Г.А., Калинин Ю.А., Горячев Н.А., Зинина В.Ю. Физико-химические условия образования минеральных парагенезисов золота и серебра на месторождении Валунистое (Чукотка) // Геология и геофизика. 2019. Т. 60. № 11. С. 1565–1576.

Калинин Ю. А., Росляков Н.А., Наумов В. А. Эпигенез самородного золота в активном слое мерзлоты // Россыпи и месторождения кор выветривания: изучение, освоение, экология: материалы XV Международного совещания по геологии россыпей и месторождений кор выветривания. Пермь, 2015. С. 89–90.

Калинин Ю.А., Росляков Н.А. Прогнозно-поисковые критерии золотосных кор выветривания (районы юга Сибири), Россия // Геология рудных месторождений. 2012. Т. 54. № 2. С. 157–167.

Константинов М.М. Золоторудные месторождения России. М.: Акварель, 2010. 349 с.

Михайлов Б.К. Минерально-сырьевые основы новых горно-рудных центров Российской Феде-

рации/Б.К. Михайлов, С.С. Вартанян, В.В. Аристов и др.//Отечественная геология. 2007. № 3. С. 14–33.

Наумов В.А. Минерагения, техногенез и перспективы комплексного освоения золотоносного аллювия: Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук / Пермский государственный университет. Пермь, 2010. 42 с.

Наумов В.А., Хусаинова А.Ш. Влияние сезонного промораживания и прогревания сульфидов на частицы золота в техногенно-минеральных образованиях // Цветные металлы и минералы. Сборник докладов Девятого международного конгресса. Красноярск, 2017. С. 942–951.

Наумов В.А., Наумова О.Б. Признаки сульфидной минерализации базальтов Большого Курейского водопада (плато Путорана) // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского: сборник научных статей. ПГНИУ. Пермь, 2020. Вып. 23. С. 32–39.

Русанов Р.В., Янникова Ю.Ю., Янникова Л.Ю. Платиноносность Au-Ag формации на примере месторождения Валунистое (Чукотский автономный округ) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2019. № 4. С. 71–78.

Савва Н.Е. Минералогия серебра Северо-Востока России / науч. ред. А.А. Сидоров; СВКНИИ ДВО РАН. М.: Издательство Триумф, 2018. (Тр. СВКНИИ ДВО РАН; вып. 78). 544 с. <https://doi.org/10.32986/978-5-89392-823-5-1-544>

Сидоров А.А., Белый В.Ф., Волков А.В. и др. Золото-серебряносный Охотско-Чукотский вулканогенный пояс // Геология рудных месторождений. 2009. Т. 51, № 6. С. 512–527.

Хусаинова А.Ш., Калинин Ю.А., Гаськова О.Л. Условия преобразования золота в отвалах колчеданно-полиметаллических месторождений // В сборнике: Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами. Сборник материалов четвертой Всероссийской научной конференции с международным участием. Геологический институт СО РАН. Улан-Удэ, 2020. С. 270–273.

Хусаинова А.Ш., Гаськова О.Л., Калинин Ю.А., Бортникова С.Б. Физико-химическая модель преобразования золота в продуктах переработки руд колчеданно-полиметаллических месторождений (Салаирский кряж, Россия) // Геология и геофизика. 2020. Т. 61. № 9. С. 1181–1193.

Highland Gold Mining Limited. Annual Report and Accounts 2019. Strategic Report. Governance. Financial Statements. St. Helier, 2020. 116 p.

Mineragenic Position and Geological Potential of Technogenic-Mineral Formations of the Gold-Silver Deposit Valunistoe (Chukotka Autonomous Region)

V.N. Goldyrev^{a,b}, V.A. Naumov^{a,b}, O.B. Naumova^b

^aNatural Science Institute of the Perm State National Research University
4 Genkel Str., Perm 614990, Russia. E-mail: vg121297@yandex.ru

^bPerm State University

15 Bukireva Str., Perm 614990, Russia. E-mail: poisk@psu.ru

In the coming years, the mine of LLC "Rudnik Valunisty" developing the gold and silver Valunistoe and Gornoye deposits will exhaust economically justified reserves. One of the ways to extend the life of the mine and increase the profitability of production should be the extraction of man-made secondary mineral resources. The purpose of the study is to identify the main types of solid and hydromineral form of technogenic-mineral formations at the Valunistoe Deposit, as well as to estimate the possibility of their industrial development. The useful components content was determined and calculated. The results of theoretical modeling of physical and chemical parameters of hypergenic mineral formation of the solid part of technogenic-mineral formations are shown. Objects of formation of technological waters are given. The conditions of concentration of gold and other metals are considered.

Key words: Valunistoe deposit; mineral processing; technogenesis; gold and silver ores; epithermal deposits; Okhotsk-Chukotka volcanic belt.

References

- Belyj V.F.* 1994. Geologiya Okhotsko-Chukotskogo vulkanogenogo poyasa [Geology of the Okhotsko-Chukotskiy volcanogenic belt]. SVKNII DVO RAN, Magadan, p. 76. (in Russian)
- Bortnikova S.B., Gaskova O.L., Bessonova E.P.* 2006. Geokhimiya tekhnogennykh sistem [Geochemistry of technogenic systems]. Ed. G.N. Anoshin, Inst. geologii i mineralogii SO RAN, Akademicheskoe izd. Geo, Novosibirsk, p. 169. (in Russian)
- Volkov A.V., Goncharov V.I., Sidorov A.A.* 2006. Mestorozhdeniya zolota i srebra Chukotki [Gold and silver deposits of Chukotka]. IGEM RAN, Magadan, p. 222. (in Russian)
- Volkov A.V., Prokofev V.Yu., Sidorov A.A. et al.* 2019. Usloviya formirovaniya epitermalnoy Au–Ag mineralizatsii Amguemo-Kanchalanskogo vulkanicheskogo polya (Vostochnaya Chukotka) [Formation conditions of Au–Ag epithermal mineralization of the Amguemo-Kanchalanskoe volcanogenic field (Eastern Chukotka)]. *Vulkanologiya i seismologiya*. 5:68–80. (in Russian)
- Volkov A.V., Prokofev V.Yu., Vinokurov S.F., Andreeva O.V., Kiseleva G.D., Galyamov A.L., Murashov K.Yu., Sidorova N.V.* 2020. Epitermalnoe Au–Ag mestorozhdenie Valunistoe (Vostochnaya Chukotka, Rossiya): geologicheskoe stroenie, mineralogo-geokhimicheskie osobennosti i usloviya rudobrazovaniya [Epithermal Au–Ag deposit Valunistoe (Eastern Chukotka, Russia): geological structure, mineral-geochemical features, and ore formation conditions]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*. 62(2): 107–133. (in Russian)
- Goldyrev V.N., Naumov V.A.* 2020. Geologicheskiy analiz tekhnogenno-mineralnykh obrazovaniy Au–Ag epitermalnogo mestorozhdeniya Kupol (Chukotskiy AO) [Geological analysis of technogenic mineral formations Au–Ag of epithermal deposit Kupol (Chukotskaya autonomous region)]. In: *Nauka i innovatsii – sovremennyye kontseptsii*. Izd. Infiniti, Ufa, pp. 117–133. (in Russian)
- Grigoryev N.V., Marinich M.A., Dudko I.S.* 2018. Osnovnye prichiny vozniknoveniya sverkhnormativnykh poter tsennogo komponenta s khvostami obogashcheniya i vozmozhnye puti sokrashcheniya finansovykh riskov dobyvayushchikh predpriyatiy [General reasons of above-standard losses of useful component in concentration tails, and possible ways of reduce of mining companies financial risks]. *Ratsionalnoe osvoenie nedr*. 1: 54–60. (in Russian)
- Zhuravkova T.V., Palyanova G.A., Kalinin Yu.A., Goryachev N.A., Zinina V.Yu.* 2019. Fiziko-khimicheskie usloviya obrazovaniya mineralnykh paragenezisov zolota i srebra na mestorozhdenii Valunistoe (Chukotka) [Physical-chemical conditions of formation of the gold and silver mineral paragenesis at the Valunistoye deposit (Chukotka)]. *Geologiya i geofizika*. 60(11): 1565–1576. (in Russian)
- Kalinin Yu.A., Roslyakov N.A., Naumov V.A.* 2015. Epigenez samorodnogo zolota v aktivnom sloe merzloty [Natural gold epigenesis in the permafrost active layer]. In: *Rossypi i mestorozhdeniya kor vyvetrivaniya: izuchenie, osvoenie, ekologiya*, Perm, 2015, pp. 89–90. (in Russian)
- Kalinin Yu.A., Roslyakov N.A.* 2012. Prognostno-poiskovyye kriterii zolotnosnykh kor vyvetrivaniya (rayony yuga Sibiri), Rossiya [Prognostic-search criteria of gold mineralization of the weathering crust (south regions of Siberia), Russia]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*. 54(2): 157–167. (in Russian)
- Konstantinov M.M.* 2010. Zolotorudnye mestorozhdeniya Rossii [Gold deposits of Russia]. *Akvarel*, Moskva, p. 349. (in Russian)
- Mikhaylov B.K.* 2007. Mineralno-syryevyye osnovy novykh gorno-rudnykh tsentrov Rossiyskoy Federatsii [Mineral raw material basics of new mining centers of Russian Federation]. *Otechestvennaya geologiya*. 3: 14–33. (in Russian)
- Naumov V.A.* 2010. Minerageniya, tekhnogenez i perspektivy kompleksnogo osvoeniya zolotonosnogo allyuviya [Mineral genesis, technogenesis, and prospects of complex development of gold-bearing alluvium]. Diss. doktora geologo-mineralogicheskikh nauk. PSU. Perm. (in Russian)
- Naumov V.A., Husainova A.Sh.* 2017. Vliyaniye sezonnogo promorazhivaniya i progrevaniya sulfidov na chastitsy zolota v tekhnogenno-mineralnykh obrazovaniyakh [Influence of sulfides seasonal freezing and warming on the gold particles in technogenic mineral formations]. In: *Tsvetnyye metally i mineraly*. Krasnoyarsk, pp. 942–951. (in Russian)
- Naumov V.A., Naumova O.B.* 2020. Priznaki sulfidnoy mineralizatsii bazaltov Bolshogo Kureyskogo vodopada (plato Putorana) [Signs of the sulfide mineralization of basalts of the Bolshoy Kureyskiy waterfall (Putorana Plateau)]. In: *Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii*. Nauchnyye chteniya pamyati P.N. Chirvinskogo: sbornik nauchnykh statey. PGNIU. Perm. 23: 32–39. (in Russian)
- Rusanov R.V., Yannikova Yu.Yu., Yannikova L.Yu.* 2019. Platinonosnost Au–Ag formatsii na primere mestorozhdeniya Valunistoe (Chukotskiy avtonomnyy okrug) [Platinum mineralization of the Au–Ag formation on the example of the Valunistoye deposit (Chukotskiy autonomous region)]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta*. Seriya: Geologiya. 4: 71–78. (in Russian)

Savva N.E. 2018. Mineralogiya serebra Severo-Vostoka Rossii [Silver mineralogy of Russian North-East]. Ed. A. A. Sidorov, SVKNII DVO RAN. Izd. Triumf, Moskva, p. 544. doi:10.32986/978-5-89392-823-5-1-544 (in Russian)

Cidorov A.A., Belyj V.F., Volkov A.V. et al. 2009. Zoloto-serebryanosnyy Okhotsko-Chukotskiy vulkanogenyuy poyas [Gold-silver-bearing Okhotsko-Chukotskiy volcanogenic belt]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*. 51(6):512–527. (in Russian)

Husainova A.Sh., Kalinin Yu.A., Gaskova O.L. 2020. Usloviya preobrazovaniya zolota v otvalakh kolchedanno-polimetallicheskih mestorozhdeniy [Conditions of gold transformation in the tails of the pyrite-polymetallic deposits]. In: *Geologicheskaya evolyutsiya vzaimo-dejstviya vody s gornymi poro-*

dami. Geologicheskij institut SO RAN. Ulan-Ude, pp. 270–273. (in Russian)

Husainova A.Sh., Gas'kova O.L., Kalinin Yu.A., Bortnikova S.B. 2020. Fiziko-khimicheskaya model preobrazovaniya zolota v produktakh pererabotki rud kolchedanno-polimetallicheskih mestorozhdeniy (Salairskiy kryazh, Rossiya) [Physical-chemical model of the gold transformation in the processing products of pyrite-polymetallic deposits (Salairskiy Ridge, Siberia)]. *Geologiya i geofizika*. 61(9): 1181–1193. (in Russian)

Highland Gold Mining Limited. Annual Report and Accounts 2019. Strategic Report. Governance. Financial Statements. St. Helier, 2020. p. 116.