

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем комплексного освоения недр им. Академика
Н.В. Мельникова Российской академии наук**

На правах рукописи



Залевская Каролина Николаевна

**ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ И ПАРАМЕТРОВ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКИ
ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ИЗ ОТХОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ
ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД**

Специальность:

25.00.22 – «Геотехнология (подземная, открытая и строительная)»

Диссертация

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доцент, кандидат технических наук

Д.Н. Радченко

Москва 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ЗОЛОТОДОБЫЧИ И МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ЕГО СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ	10
1.1 Горно-геологические и горнотехнические условия освоения Новотроицкого золото-мышьяковистого месторождения и формирования техногенных образований из отходов переработки золотосодержащих руд.	10
1.2 Методы и подходы к изучению свойств складированных отходов обогащения золотосодержащих руд, определяющие выбор технологий их добычи и переработки.....	17
1.3 Закономерности природных и техногенных процессов, обуславливающие формирование технологических свойств хвостов обогащения золотосодержащих руд.....	40
1.4 Изучение подходов к выбору и обоснованию параметров технологий разработки неоднородных техногенных образований, представленных отходами переработки золотосодержащих руд.....	50
1.5 Цели, задачи, методы исследования.....	59
ГЛАВА 2. РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКИ НЕОДНОРОДНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА ОСНОВЕ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ РУД.....	64
2.1 Концептуальный подход к оценке структуры техногенных образований и неоднородности свойств складированного тонкодисперсного сырья, определяющих параметры открытых горных работ.....	64
2.2 Классификация технологических схем открытой разработки неоднородных техногенных образований, представленных отходами переработки золотосодержащих руд	76
2.3 Методика исследований вещественного состава хвостов для выбора параметров открытой разработки неоднородных техногенных образований	85
2.4 Методика исследований физико-механических свойств отходов переработки руд для обоснования параметров геотехнологии разработки золотосодержащих техногенных образований	90
Выводы по 2 главе:	94

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И СВОЙСТВ СКЛАДИРОВАННОГО СЫРЬЯ, КАК ОСНОВА ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЙ ИХ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКИ (НА ПРИМЕРЕ НОВОТРОИЦКОГО ХВОСТОХРАНИЛИЩА)..... 97

3.1 Исследование вещественного состава складированных отходов Новотроицкого хвостохранилища для выбора приоритетного порядка его отработки..... 97

3.2 Исследование физико-механических и физико-химических свойств складированного сырья техногенных образований для обоснования параметров их открытой разработки..... 105

3.3 Исследование устойчивости горнотехнических конструкций при выявлении в толще техногенных образований скрытых обводнённых зон 113

3.4 Алгоритм выбора технологии открытой разработки техногенных образований на базе опережающей оценки строения и структуры техногенного объекта 117

Выводы по 3 главе: 120

4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ И ОЦЕНКА ИХ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ..... 123

4.1 Обоснование приоритетного порядка разработки неоднородного техногенного образования с использованием блочной модели 123

4.2 Принципы выбора направления фронта ведения открытых горных работ и этапов отработки Новотроицкого золото-мышьяковистого техногенного образования..... 130

4.3 Технико-экономическая оценка рекомендаций по разработке Новотроицкого хвостохранилища и переработке техногенного сырья с использованием мощностей действующей золотоизвлекательной фабрики на Южном Урале 137

Выводы по 4 главе: 146

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 148

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 151

ВВЕДЕНИЕ

Одной из причин неблагоприятной экологической обстановки в Южноуральском регионе являются потенциально опасные лежалые отходы переработки золотоносных и золото-мышьяковистых руд предприятий. Большинство отходов золотоизвлекательных фабрик и обжиговых мышьяковистых заводов Урала транспортировались в хранилища в практически сухом состоянии (процент жидкой фазы не превышал 15%) [111], отходы накапливались десятки и сотни лет и со временем высыхали, слёживались под действием остаточной влаги, представляя собой переуплотнённую тонкодисперсную массу. Поэтому в настоящее время такие отвалы, представленные отходами цианирования, огарками, хвостами флотации и амальгамации, представляют собой складированные на поверхности сухие насыпи и оказывают негативное воздействие на окружающую среду. Расположение техногенных образований в городской черте (г. Пласт, Южный Урал), обуславливает необходимость поиска новых решений по утилизации подобных экологически опасных объектов.

При многолетнем хранении отходов переработки золотопромышленного комплекса происходит перераспределение элементов в техногенном образовании с формированием более богатых продуктивных участков, скрытых высокообводнённых, либо высокотоксичных зон, которые необходимо локализовать в ходе очистной выемки. Отсутствие конкретной геологической информации о типе руд, перерабатываемых за время вековой эксплуатации хвостохранилищ, объемах и схеме складирования или намыва отходов также является сдерживающим фактором для вовлечения техногенного сырья в переработку с последующей безопасной утилизацией и рекультивацией территории. Поэтому актуальным является вопрос поиска новых подходов к выбору технологии рационального освоения техногенных образований с возможностью своевременного обнаружения обводнённых участков, зон с повышенным содержанием благородных металлов и/или токсичных элементов для их своевременной локализации и извлечения.

Цель исследования заключается в обосновании параметров рациональной технологии разработки неоднородных по составу, структуре и свойствам техногенных образований, представленных лежалыми отходами переработки золотосодержащих руд, для повышения полноты освоения техногенных ресурсов и решения эколого-социальных проблем золотодобывающих регионов.

Идея работы состоит в том, что обоснование способа и параметров технологии разработки техногенных образований должно базироваться на опережающей по мере отработки участка хвостохранилища оценке свойств и структуры отвала, с уточнением сведений о локализации в нём обогащённых, обводнённых и потенциально опасных зон (ртуть-, циан- и мышьяксодержащих) для районирования техногенного объекта по условиям выбора его эффективного экологически сбалансированного освоения.

Задачи исследования:

- анализ современных средств и методов оценки вещественного состава, строения, структуры техногенных образований как основы для обоснования геотехнологии их эффективного освоения;
- разработка методики комплексного обследования техногенных образований прошлых лет, обеспечивающей получение уточнённых сведений о структуре, строении и составе зон минерализации с возможностью построения блочных моделей;
- исследование закономерностей строения, состава и свойств техногенного сырья в толще хвостохранилища, определяющих выбор приоритетного порядка и параметров выемки складированных отходов для их безопасной утилизации с последующей рекультивацией нарушенной территории;
- обоснование параметров геотехнологии разработки техногенных образований, определяющих выбор приоритетного направления ведения открытых горных работ и этапы отработки техногенного объекта;
- разработка рекомендаций по эффективной отработке золотосодержащих хранилищ отходов переработки руд и их технико-экономическая оценка.

Объектом исследования являются техногенные образования, сложенные отходами переработки золотоносных и золото-мышьяковистых руд.

Предмет исследования – закономерности распределения неравномерной структуры и свойств сырья техногенных образований, оказывающие определяющее влияние на выбор технологии их открытой разработки для повышения полноты освоения техногенных минеральных ресурсов и решения эколого-социальных проблем золотопромышленных регионов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Экологически сбалансированное и безопасное освоение техногенных образований золотодобычи, сложенных неоднородными участками – обогащёнными благородными металлами, опасными обводнёнными зонами, либо с локализацией токсичных элементов, базируется на опережающей по мере продвижения очистных работ экспресс-оценке структуры и свойств складированного тонкодисперсного сырья с установлением направления и технических характеристик средств выемки в целях управления качеством добываемого сырья.

2. Выбор направления развития фронта выемки при разработке неоднородных техногенных образований золотосодержащего сырья осуществляется в зависимости от необходимости первоочередной отработки обогащённых благородными металлами зон для эффективного управления качеством извлекаемого сырья, исключения прорыва пульпы из скрытых обводнённых зон, а также требований к локализации участков, характеризующихся повышенным содержанием токсичных элементов.

3. На разрабатываемых участках техногенного образования, где влажность отобранного материала не достигает влажности на границе текучести, обеспечивается устойчивость стенок пробуренных скважин в течение длительного времени, что позволяет вести по мере отработки техногенного объекта опережающее бурение и непосредственно в цикле добычи осуществлять видеоэндоскопическое обследование стенок скважин с отбором материала из

аномальных зон с привязкой к системе координат и оценкой распределения качества складированного сырья и структуры техногенного образования.

4. Отсутствие скрытых обводнённых и неоднородных зон на обрабатываемом участке техногенного образования определяет возможность экскавации и выемки сырья уступами до границ выявленной неоднородной зоны, безопасное расстояние до которой определяется в зависимости от свойств среды на неоднородном участке.

Научную новизну работы составляет разработанная методика выбора параметров открытой разработки техногенных образований на основе тонкодисперсных отходов переработки золотосодержащих руд, отличающаяся тем, что в состав технологических процессов включена опережающая оценка строения и структуры техногенных образований на базе применения способа видеоэндоскопического обследования и точечного опробования техногенного сырья из стенок скважин с привязкой точки отбора пробы к системе координат, что позволяет своевременно выявлять неоднородные участки, управлять качеством на базе актуальной информации и вести безопасную добычу техногенного сырья. Получены новые знания по безопасной разработке техногенных образований с учётом структуры и свойств золотосодержащего сырья.

Достоверность положений, выводов и рекомендаций обеспечивается надёжностью и представительностью исходных данных, подтверждением теоретических выводов результатами экспериментальных и опытно-промышленных испытаний, выполненных по апробированным методикам в аккредитованных лабораториях.

Практическая значимость результатов заключается в разработке и технико-экономической оценке рекомендаций по эффективному вовлечению лежалых отходов переработки золото-мышьяковистых руд в освоение с последующей переработкой, утилизацией техногенного сырья и рекультивацией нарушенной территории.

Методы исследования. Анализ и обобщение результатов фундаментальных исследований в части выбора технологии добычи и транспортировки лежалых отходов переработки руд золота в зависимости от структуры техногенных образований; анализ горно-геологических условий месторождения золото-мышьяковистых руд по данным архивной литературы Росгеолфонда; использование ГИС для моделирования рельефа хвостохранилища (ArcGIS и QGIS); блочное моделирование участков отвала золотосодержащих отходов переработки руд с подсчетом накопленных объемов и запасов золота (ГГИС Micromine); оптико-минералогический анализ хвостов под микроскопом Olympus BX41 на базе анализатора «Минерал С7»; комплекс химических анализов минерального сырья и фазовый анализ на дифрактометре XRD 7000; физико-механические испытания образцов техногенного грунта на определение деформационных показателей при трехосном сжатии, прочностных и физических свойств, согласно действующим государственным стандартам.

Апробация результатов. Результаты исследований использованы при подготовке отчетов по Программе Президиума РАН №39 «Фундаментальные основы энергоэффективных технологий отработки и формирования техногенных образований в целях обеспечения перерабатывающих производств минеральным сырьём заданного качества» (руководитель академик РАН В.Н. Захаров). Результаты исследований учтены при обосновании стратегии вовлечения в эксплуатацию техногенных золотосодержащих образований Челябинской области АО «Южуралзолото Группа Компаний».

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации, состоит в разработке комплексной методики оценки золотосодержащих техногенных образований, на основании которой получены актуальные сведения о строении, структуре хвостохранилища, вещественном составе сырья, обеспечивающие безопасное освоение техногенных образований золотодобычи; апробации в полевых условиях на объекте исследований прототипа устройства для опережающей оценки структуры техногенного образования; предложенного способа построения блочной модели техногенного

образования для выбора приоритетного порядка выемки техногенного минерального сырья.

Публикации. Результаты проведённых исследований опубликованы в 14 научных работах, в том числе 3 статьи опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Минобрнауки России, получен патент РФ на изобретение.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов по каждой главе, заключения и основных результатов, а также списка использованной литературы, насчитывающего 128 наименований. Работа изложена на 165 страницах машинописного текста, содержит 47 таблиц и 62 рисунка.

Автор выражает благодарность главному научному сотруднику ИПКОН РАН, члену-корреспонденту РАН Д. Р. Каплунову, заведующему Отделом теории проектирования освоения недр ИПКОН РАН, профессору, доктору технических наук М.В. Рыльниковой и руководителю Обособленного подразделения Лаборатории ЭКОН на Южном Урале, доктору технических наук К.И. Струкову за ценные замечания и поддержку в выполнении исследований и представлении полученных результатов.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ЗОЛОТОДОБЫЧИ И МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ЕГО СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

1.1 Горно-геологические и горнотехнические условия освоения Новотроицкого золото-мышьяковистого месторождения и формирования техногенных образований из отходов переработки золотосодержащих руд

Структура образования отходов в России представлена в виде схемы, опубликованной Государственной комиссией по запасам Роснедр (рис. 1.1) [121]. Анализ рисунка свидетельствует о преимущественном вкладе горной промышленности в структуру формирования отходов производства. В процентном выражении объём отходов горно-перерабатывающей промышленности достигает 90% от всего объёма промышленных отходов в России.



Рисунок 1.1 – Структурная схема образования отходов в России по данным Роснедр

Информация по ранее обработанным месторождениям, ликвидированным в настоящее время рудникам и обогатительным фабрикам, ранее работавшим на

Кочкаре, с трудом поддаётся анализу. Данные в значительной мере утрачены ввиду более чем 200-летней истории золотодобычи на Кочкаре.

Техногенные образования Пластовского района исторически формировались непосредственно в местах добычи и переработки руд месторождений Кочкарского рудного поля, которое, объединяя Кочкарское и Новотроицкое золото-полисульфидно-кварцевые месторождения, расположено на восточном склоне Южного Урала в Восточно-Уральской мегазоне (рис. 1.2). Оно входит в группу крупных золоторудных объектов мира. Кочкарское рудное поле по документам отрабатывается с 1845 г. [123], но вольный промысел на месторождении был и ранее.

Согласно опубликованным материалам в период с 1845 г. по 1917 гг. было получено около 6 т россыпного и рудного золота. В период с 1845 по 1995 гг. на месторождении добыто примерно 300 т золота, что косвенно свидетельствует о широких масштабах формирования техногенных образований в этом золотодобывающем регионе [75]. Очевидно, что объём складирования сырья неразрывно связан с динамикой золотодобычи и применяемыми способами разработки и переработки сырья (рис. 1.3).

Данные способы, равно как и динамика производства товарного драгоценного металла, постоянно изменялись. Первоначально основным способом добычи золота старательскими промыслами были открытые разработки (прииски), позднее – шахты. При этом необходимо учитывать, что часть из подземных горных выработок зафиксирована в документах как «шахта», тогда как «дудки» и «шурфы» не описаны и не учтены, несмотря на сопоставимое сечение и пропускную способность, а также аналогичный «шахтам» функционал. Например, только на небольшой по протяжённости (простирацию) Клавдиевской жиле золотопромышленника Шельгина работали восемь шахт – от №1 до №8.

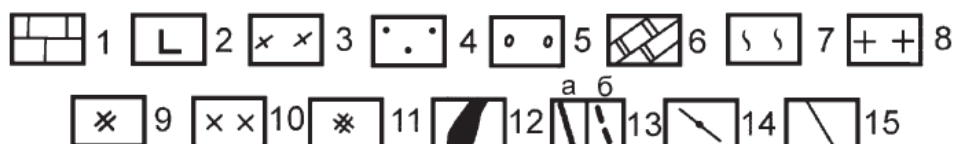
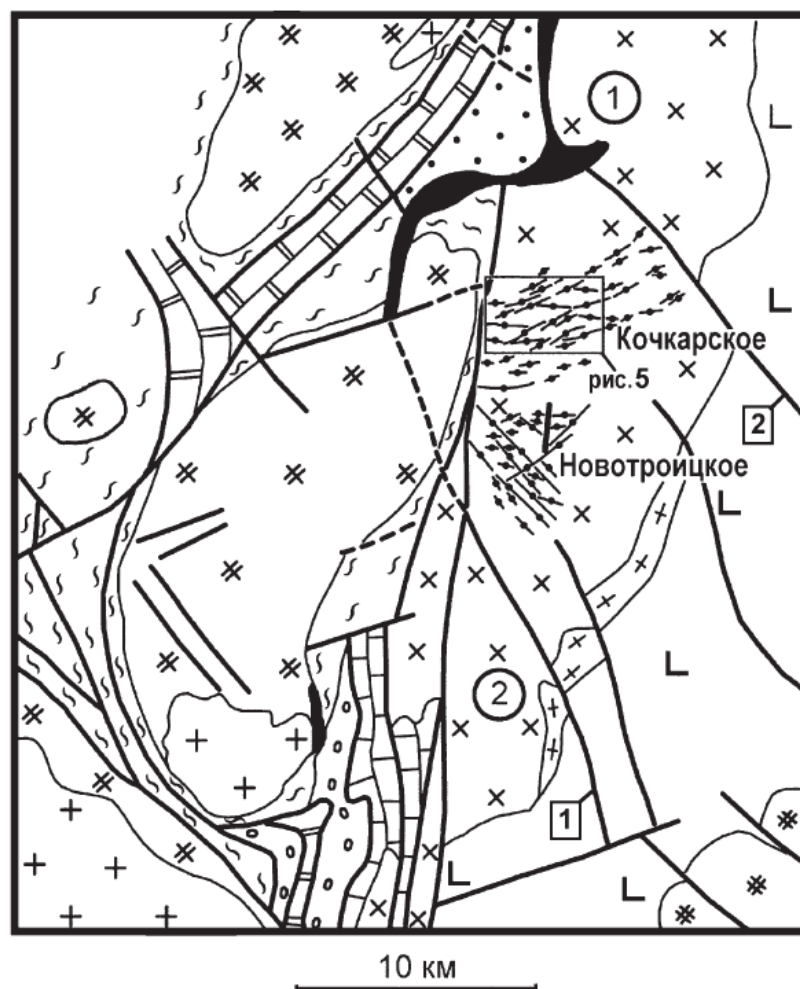


Рисунок 1.2 – Геологическая схема окрестностей Кочкарского рудного поля: 1 – известняки (С1); 2 – вулканогенные и вулканогенно–осадочные породы (О-S1); 3 – плагиогранито-гнейсы; (PZ1?); 4 – аркозовые песчаники и конгломераты (С-О); 5 – известковистые конгломераты (R2); 6 – мраморы с прослоями плагиосланцев (R1); 7 – гранито-гнейсы (PR1); 8 – граниты Джабык-Н. Санарского гранит-лейкогранитового комплекса (P1); 9 – гранито-гнейсы Варшавского гранито-гнейсового комплекса (С2); 10 – плагиограниты Пластовского тоналит-гранодиоритового комплекса (С1); 11 – диориты и плагиограниты Портнягинского диорит-плагиогранитного комплекса (С1); 12 – серпентиниты; 13 – разрывные нарушения: а – достоверные, б – предполагаемые; 14 – рудоконтролирующие разрывы Кочкарского и Новотроицкого месторождений; 15 – геологические границы. Арабскими цифрами в кружках обозначены массивы: 1 – Коелгинский, 2 – Пластовский; арабскими цифрами в прямоугольниках показаны разломы: 1 – Осейский, 2 – Тихоновский [75]

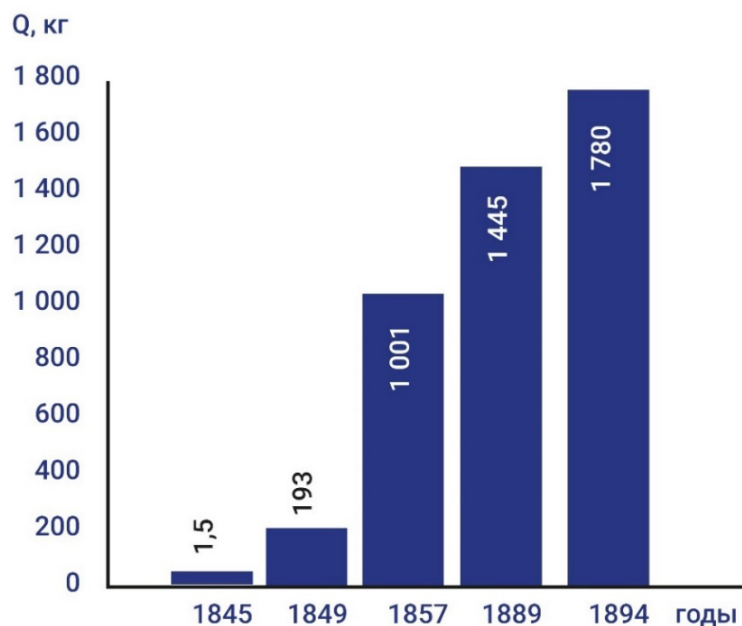


Рисунок 1.3 – Диаграмма, свидетельствующая о нарастающей динамике добычи золота в первое 50-летие золотодобычи на Кочкаре (далее, вплоть до I Мировой войны рост составил до 3000 кг/год)

До настоящего времени в г. Пласт есть развалины и отвалы шахт №82 и №116 Южного рудника (эксплуатировался и в советское время). Добываемая подземным способом руда из зоны окисления перерабатывалась на поверхности аналогично приискам – гравитационным методом (промывкой). Таким образом, один рудник мог включать множество мелких шахт, т. е. стволов и шурфов. Сколько всего было шахт этого рудника до настоящего времени неизвестно. Судя по всему, техногенные образования (отвалы) формировались хаотично, и принадлежали отдельным стволам и шурфам в случае переработки руды «на месте», либо централизованно – в районе расположения обогатительных фабрик и промывочных установок. В результате развития старательского промысла в регионе были сформированы первые техногенные образования на основе отходов промывки руд – эфели, или эфельные отвалы в количестве, исчисляемом сотнями штук.

До Первой мировой войны объём производства золота, извлечённого из недр на Кочкаре, составил более половины всей золотодобычи в Российской империи. Управляла приисками компания «Анонимное общество Кочкарских

золотых приисков», которая считается предшественницей сегодняшних золотодобывающих предприятий современного г. Пласт. Именно в этот период, а именно с 1886 года, положено начало применению способа хлоридного выщелачивания коренных руд.

Уже в 1897 г. на Никольском прииске Российского золотопромышленного общества был применен более прогрессивный метод обогащения руд – цианирование, а в 1898 году – на Екатерининском прииске золотопромышленника Тарасова. Внедрение прогрессивной технологии извлечения золота методом цианирования позволило осуществить масштабный переход от старательского промысла (промывки) золота к разработке коренных золото-кварцевых жил. Переход на разработку коренного золота и переработку сырья методом хлоридизации и цианирования повлек масштабное строительство обогатительных фабрик. По данным треста «Союзмышьяк» [87], в Кочкарской системе в конце 19 века работало 29 фабрик.

Запуск фабрик повлек второй этап формирования техногенных образований Пластовского района – хранилищ отходов специальных методов химического обогащения руд, которые не являлись гидротехническими сооружениями, как современные хвостохранилища, а формировались, преимущественно, методом сухого складирования (рис. 1.4).

Переработка золотоносных руд методом цианирования оказала положительное влияние на развитие золотодобычи на Южном Урале, благодаря чему в освоение стали вовлекаться стала рентабельна разработка бедных золото-кварцевых жил месторождения, а также повторная отработка эфельных отвалов, сформированных отходами обогащения руд со шлюзов и откидных песков, разработка которых до применения выщелачивания была нерентабельна. Например, как отмечает Р.К. Хайрятдинов [123] утверждает, что: «На фабриках больше перерабатывали старые отвалы (хвосты), так как за это не нужно было платить налоги». Первым нормативным документом, определившим возможность отработки техногенных объектов Южноуральского региона, является Высочайшее положение Комитета Министров, разработанное 29 ноября 1891 года

и дающее право предприятиям золотодобывающей отрасли «приобретать и отрабатывать отвалы откидных песков, эфелей и черных шлихов, с уплатою подати с получаемого при этом золота».



Рисунок 1.4 – Складирование отходов обогатительной фабрики в отвал

На основании этого положения в 1892 г. была разработана «Инструкция по применению правил о приобретении и обработке принадлежащих казне золотосодержащих отвалов и отбросов», которая в настоящее время содержится в фондах Государственного архива Оренбургской области [75]. Она подробно регламентировала все стороны ведения работ по переработке отвалов, начиная с оформления заявок и заканчивая порядком учёта добытого золота.

Сопоставимый анализ результатов полевых обследований с архивными упоминаниями показал, что факт относительного небольшого количества отвалов в районе г. Пласт (десятки, а не сотни, как должно быть, соответственно этапам золотодобычи и количества шахт), а также весьма низкое содержание золота в современных техногенных образованиях – результат полной вторичной переработки эфельных отвалов Пластовского района на многочисленных обогатительных фабриках в конце 19 – начале 20 веков. Очевидно, что этот положительный опыт того времени способствовал снижению экологической

нагрузки на регион и может и должен быть проанализирован и исследован в настоящее время.

Проведённые в Росгеолфонде архивные изыскания показали, что Новотроицкое месторождение, входящее в состав Кочкарского рудного поля, является уникальным по содержанию мышьяка и характеризуется значительным содержанием золота. В состав месторождения входит десять рудных жил. Общие геологические запасы, согласно Проекту [87], оценены в 563163 тонны руды, в которых мышьяка более 43 тыс. тонн, а золота – более 4 тонн.

В результате переработки таких богатых руд по комбинированной флотационно-обжиговой схеме, в отходы обогащения поступало порядка 14% мышьяка и золота [105]. В пересчёте на абсолютные величины хвосты обогащения содержали 0,7-0,9% мышьяка, более 1,5 г/т золота. Сульфидные концентраты обжигали в окислительной атмосфере при температуре 500-700°C, окисленные (скородитовые) и смешанные руды – при 800-900°C с добавкой угля в качестве восстановителя и для достижения высокой температуры.

Основные технологические показатели переработки руд следующие:

- нижний предел промышленного содержания мышьяка в руде при отсутствии в ней золота составлял 3,8%;
- нижний предел промышленного содержания мышьяка при минимальном промышленном содержании золота – 2,3%
- среднее содержание As в одной тонне флотационного конц. – 18%
- извлечение As и Au при обогащении – 86%
- извлечение As при обжиге флотационного концентрата – 90%
- среднее содержание белого мышьяка в товарной продукции – 94%
- извлечение Au при обжиге – 95%
- выход огара из концентрата – 60%
- минимальное промышленное содержание Au в огарках – 28 г/т

Систематического анализа и учёта попутных компонентов не проводилось. В рудах в разное время обнаруживали галлий, германий, серебро. Многокомпонентный состав хвостов обогащения свидетельствует о

необходимости их изучения как объекта многокомпонентной переработки. В связи с этим, интерес представляет обобщение опыта исследований хранилищ отходов переработки ценных металлов и принципов выбора технологий их разработки.

1.2 Методы и подходы к изучению свойств складированных отходов обогащения золотосодержащих руд, определяющие выбор технологий их добычи и переработки

Техногенные образования формируются в течение многих лет из руд разных горизонтов и участков, а нередко из руд разных месторождений, поэтому они обладают сложным вещественным составом и отличаются определённой структурой распределения ценных компонентов, зонами вторичного гипергенеза, окисления, сегрегации, что требует детального изучения при вовлечении техногенных ресурсов в повторную переработку с доизвлечением ценных компонентов [86, 88, 120].

Специфические условия строения, структуры и масштабы накопления сырья в техногенном образовании определяют технологию и параметры их разработки [77, 78, 89, 112]. В отличие от природных месторождений золота, необходимость детального изучения и оценки техногенных золотосодержащих объектов для их открытой разработки обусловлена отличительными характеристиками распределения сырья, ввиду:

1) протекания естественных процессов сегрегации материала техногенного образования по крупности и содержанию благородных металлов, в результате которого формируются обогащённые по содержанию ценных компонентов продуктивные зоны;

2) длительного воздействия на техногенное сырьё природных факторов, таких как переменная температура воздуха, выветривание с поверхности, микробиологическое воздействие и как следствие изменение и разрушение сульфидных фракций, содержащих золото, что способствует его наилучшему вскрытию при процессах измельчения;

3) изменения физических свойств техногенного сырья на разных горизонтах, участках хвостохранилища (показателей влажности, коэффициента фильтрации, пористости, проницаемости), которые определяют наличие в теле техногенного образования скрытых обводнённых зон.

Особенности строения, структуры техногенных образований и состав золотосодержащего сырья, сформировавшиеся под влиянием физико-химических, физических и механических процессов в хвостохранилище, требуют специфических подходов к их изучению и оценке, учёт которых не предусматривается в существующих методических рекомендациях по оценке техногенных образований с целью их вовлечения в промышленную эксплуатацию [60-62, 81-84]. Уникальные для каждого техногенного объекта особенности строения и структуры техногенного образования обуславливают создание современных способов детальной геологической оценки с целью получения актуальных сведений о распределении сырья при разработке техногенного объекта [59, 125, 126]. Так, в работе [113] предложено для изучения техногенных образований использовать ядерно-физические методы, которые в комплексе охватывают большой круг химических элементов. При оконтуривании отдельных залежей техногенного сырья рационально применение 3D-моделирования (рис. 1.5). Оценка негативного влияния хранилищ отходов на окружающую среду по данным экологического мониторинга так же носит комплексный характер.

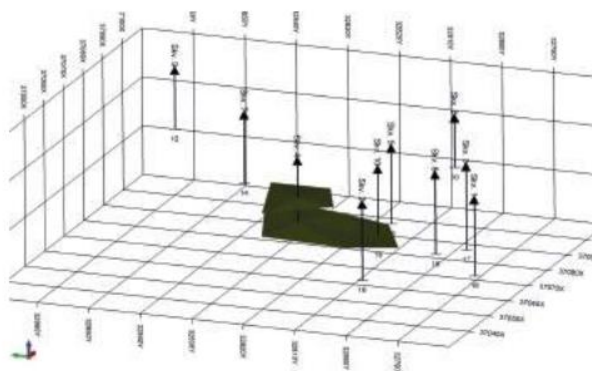


Рисунок 1.5 – Цифровая модель залежи полезного компонента в хвостохранилище

Результаты предварительной геологической оценки изучаемых объектов основаны на данных о содержании ценных металлов с учётом их распределения в техногенном образовании. Поэтому для обоснования технологии разработки хвостохранилищ золотоизвлекательных фабрик устанавливаются зоны наибольшей концентрации благородных металлов, определяется морфология золота, изучаются фильтрационные свойства объекта, поскольку они существенно влияют на пространственное распределение золота в намывных техногенных образованиях. Выявленные закономерности обеспечивают возможность комплексного подхода к освоению хвостохранилищ по комбинированным технологиям обогащения золотосодержащих минеральных комплексов [66, 127].

Так, анализ геологических данных о месторождении Марджанбулакского золотоизвлекательного участка показал отсутствие информации о пространственном и объёмном распределении золота в твердой фазе хвостохранилища [85]. Для оценки распределения золота в теле техногенного образования отбирались пробы по сети 40х40 и 10х10 м. Пространственная модель распределения золота в хвостохранилище на различных глубинах приведена на рис. 1.6.

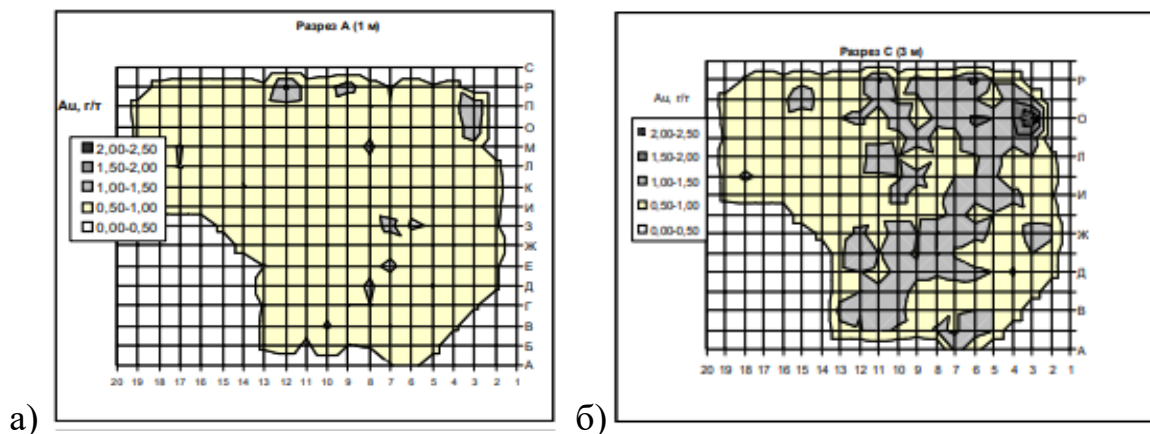


Рисунок 1.6 – Пространственное распределение золота в пределах хвостохранилища Марджанбулакского участка на глубинах 1 м (а) и 3 м (б)

Установлена изменчивость химического состава складированных в хвостохранилище отходов переработки руд по глубине залегания. Приповерхностный слой отвала и участки недавнего складирования техногенного сырья обеднены золотом, его содержание не превышает 0.8 г/т. В толще

техногенного объекта локализованы отдельные участки, характеризующиеся повышенным содержанием золота, до 1.6 г/т. Технологическое картирование лежалых отходов переработки золотосодержащих руд Семеновской фабрики проводилось по данным материалов геологической разведки 1987-1989 гг. По результатам геологоразведочных и поисково-оценочных работ на техногенном объекте была построена объёмная модель хвостохранилища (рис. 1.7) и установлены наиболее характерные закономерности распределения золота в отвале.

Показано, что при гидравлическом намыве и длительном хранении отходов переработки руд тонкое золото весьма равномерно распределено в теле хвостохранилища. Локальные обогащённые зоны, с средним содержанием более 1,4 г/т, наблюдаются в северной, восточной и юго-восточной частях и приурочены к понижениям местности и к местам сброса пульпы. В придамбовой зоне в южной части хвостохранилища наблюдаются невысокие концентрации ценного металла, не превышающие 0,9 г/т. Тенденция повышения содержания золота с глубиной характерна не для всего хвостохранилища, что говорит о возможной механической миграции металлов после заполнения хранилища.

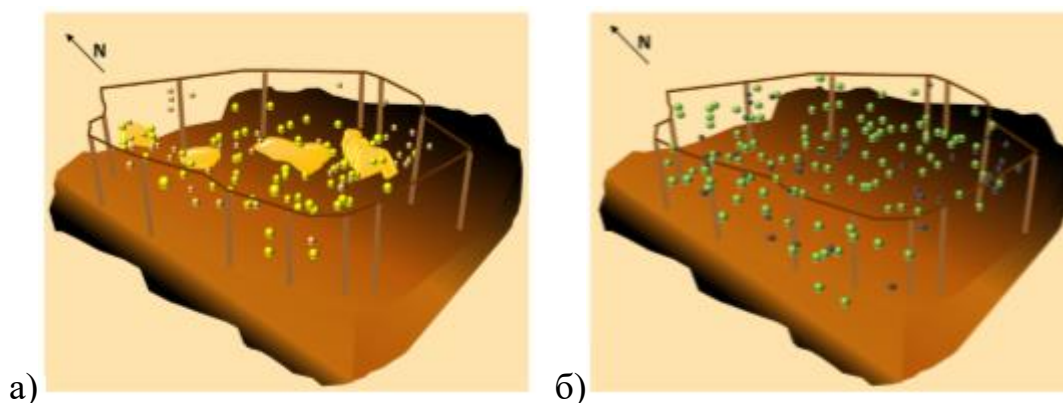


Рисунок 1.7 – Объёмная модель распределения золота в хвостохранилище: а - участки с содержанием Au более 1.4 г/т; б - участки с содержанием 0.5-0.7г/т (синие) и с содержанием 0.7-1 г/т (зелёные)

Проведённые исследования позволили предложить технологию отработки лежалых хвостов золотоизвлекательных фабрик. На основании экспериментальных и опытно-промышленных испытаний адаптирована

технология хлоридного выщелачивания с организацией подачи выщелачивающих растворов через скважины для доизвлечения золота из хвостов Семёновской ЗИФ на месте их складирования. Технология гидрохлоридного выщелачивания золота из глубоких обводнённых участков хвостохранилища включает: закисление участка раствором соляной кислоты до $pH < 4$; нагнетание выщелачивающих растворов в толщу хвостохранилища; выщелачивание растворами с рабочей концентрацией активного агента.

Анализ выполненных исследований и предложенной на их основе геотехнологии отработки хвостохранилища позволил заключить, что применение данного способа для техногенных образований Кочкарского золотопромышленного региона проблематично – большинство из них сформированы столетие назад путём хаотичного складирования без гидроизоляции основания. Это, учитывая расположение Новотроицкого хвостохранилища в черте города, исключает прямой перенос технологических решений на данный техногенный минеральный объект. Более того, технология выщелачивания на месте залегания не позволяет учесть выявленные в ходе разведки хвостохранилища обогащённые зоны и произвести их селективное извлечение. Выполненные исследования подтверждают необходимость более детального изучения выявленных при оценочных работах неоднородностей, так как техногенные образования в процессе их складирования и в последующем подвержены процессам выветривания (окисления, выщелачивания) и миграции с возможным формированием отдельных обогащённых полезными компонентами участков. Особое внимание следует уделять старогодним хвостохранилищам, исходная геологическая информация о формировании которых может быть недостаточной, а чаще и вовсе отсутствовать.

Во многом проблемы геологической оценки отходов переработки руд при освоении техногенных образований связаны с трудностями, возникающими при бурении и отборе проб переувлажнённого и неконсолидированного материала. Хранилища отходов золотодобычи постепенно заполняются продуктами переработки руд, которые со временем консолидируются, образуя

стратифицированную структуру с характерными зонами минерализации, отсюда следует, что традиционные методы изучения техногенного сырья считаются неприемлемыми в случае влажного и вязкого глинистого материала, богатого ценным компонентом. Так, для решения этой проблемы в рамках государственного проекта по утилизации золоторудного хвостохранилища Mount Morgan (Австралия) компанией Carbine Resources был разработан и реализован новый подход к опробованию рыхлых техногенных отложений [3]. Материал хвостохранилища представлен бурыми окисленными и сульфидными хвостами обогащения. Отходы сбрасывались в отвал равномерно, создавая тонкослоистую структуру с линзами различного состава (рис.1.8).

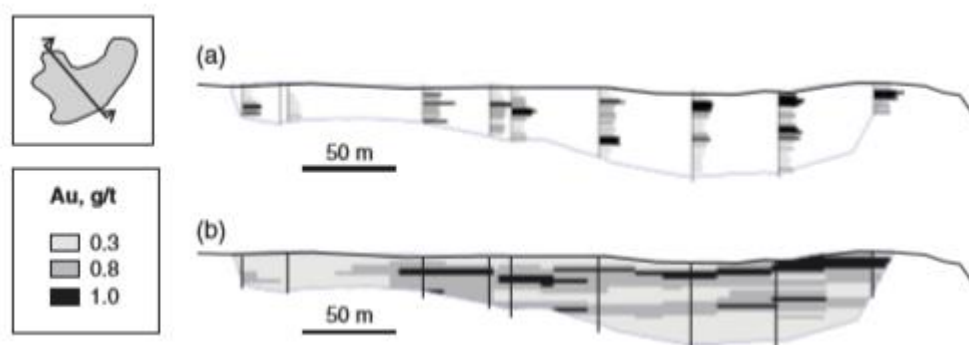


Рисунок 1.8 – Продольный разрез хвостохранилища отвала с распределением золота в буровых скважинах и расчётная блочная модель

Новый протокол опробования предусматривал отбор образца циклона буровой установки по каждому интервалу бурения (примерно 15 кг). Параметры измельчения были выведены путем оценки погрешности и построения номограммы выборки. Исходя из этого, оптимальный протокол испытаний, обеспечивающий представительность пробы, предусматривал сушку всего образца весом 15 кг при температуре 60°C, измерение массы и содержания влаги в образце, дробление пробы до 2 мм (90%), измельчение 3 кг материала до 74 мкм. Качество отбора проб строго контролировалось использованием дубликатов проб, которые подтвердили точность и повторяемость полученных результатов. Корреляция между дубликатами и исходными образцами была высокой – 98% с погрешностью 19,8%, что считается отличным показателем для золотого сырья.

Интенсивность протекания окислительных процессов в хвостохранилище определяется такими химическими параметрами, как pH, T, концентрация кислорода в водной фазе, скорости инфильтрации воды [53]. Кислотный дренаж определяется как раствор с низким pH и повышенными концентрациями металлов и считается одной из самых серьёзных экологических проблем, с которыми сталкивается горнодобывающая промышленность, из-за своего вредного воздействия на почву, а также на ресурсы подземных вод. В связи с актуальностью этой проблемы большинство исследований посвящено изучению условий протекания геохимических процессов на хвостохранилищах сульфидсодержащих руд [23,48].

Для изучения структуры и локализации окисленной зоны на крупнейших золотосодержащих хвостохранилищах месторождения Witwatersrand (ЮАР) были отобраны пробы с 5 его участков [2, 40, 43, 47]. Зоны окисления на профилях достаточно хорошо картировались по профильным линиям на основании их охристого (жёлто-оранжевого) цвета (рис.1.9,а).

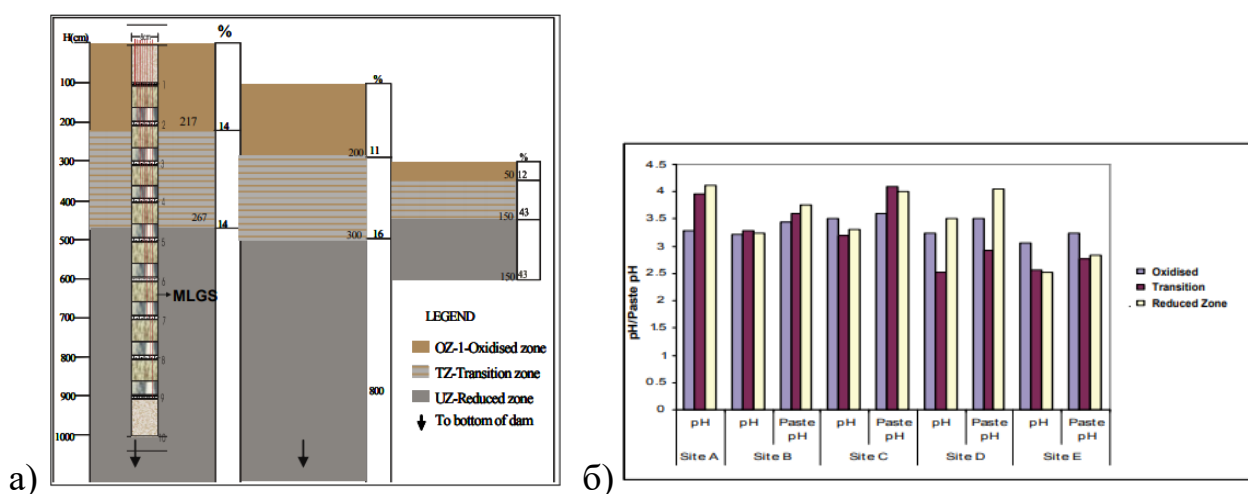


Рисунок 1.9 – Разделение профиля хвостохранилища на различные зоны окисления на одном из участков (а) и график изменения pH среды для всех участков исследования (б)

Золоторудные хвостохранилища Witwatersrand содержат уран в виде уранинита, который является нестабильным в окислительной среде и будет подвергаться окислению до водно-подвижного U^{6+} . Растворение алюмосиликатных минералов, таких как мусковит и хлорит, приводит к

высвобождению Al, Fe, K, Mg в хвостохранилище. Все эти физико-химические процессы, гидрологический режим, небольшая мощность хвостохранилища с доступом кислорода к техногенному сырью позволяют выделить три основные геохимические зоны: зона окисления, переходная и не окисленная зона. Так, окисленная зона на всех исследованных участках хвостохранилища составляла от 2.2 до 3.5 м. На основании оценки рН среды хвостохранилища установлено, что первые 10 м отобранных проб являются кислыми с рН менее 2 (рис.1.9,б). Различные диапазоны рН в этих трёх зонах представлены следующим образом: окисленная зона (от 3 до 3.6); переходная и слабо не окисленная зоны (от 2.5 до 4.1). Такое распределение рН необходимо учитывать при выборе технологии разработки хвостохранилища, как минимум при выборе средств выемки (механических, гидравлических), которые в условиях высокоагрессивной среды могут быть неприменимы.

Хвостохранилища, сформированные в зоне гипергенеза, подвергаются интенсивному окислению за счет выпавших осадков, насыщенных растворенными в них кислородом, азотом и т. д., которые приводят к образованию преимущественно серной кислоты и, таким образом, выступают в качестве основных агентов преобразования сульфидов [6, 11, 22, 28, 36]. На рис. 1.10 представлена картина распределения сульфида серы и Co, Ni, Zn, Pb, Cu и Au по глубине скважины. Хорошая корреляция прослеживается между содержанием $S_{\text{сульфидн.}}$ в хвостах и концентрациями Ni, Cu и Au в зоне бледно-серых мелкозернистых песков. Аналогично второй пик концентраций сульфидов на глубине 7 м хорошо коррелирует с содержаниями Co, Ni, Zn и Pb. Это свидетельствует о том, что концентрация металлов на такой глубине может быть результатом мобилизации сульфидов. На основании полученного графика очевидно, что $S_{\text{сульфидная}}$ играет важную роль в мобилизации металлов, особенно тяжёлых, таких как золото и свинец, которые при других физико-химических условиях считаются относительно неподвижными.

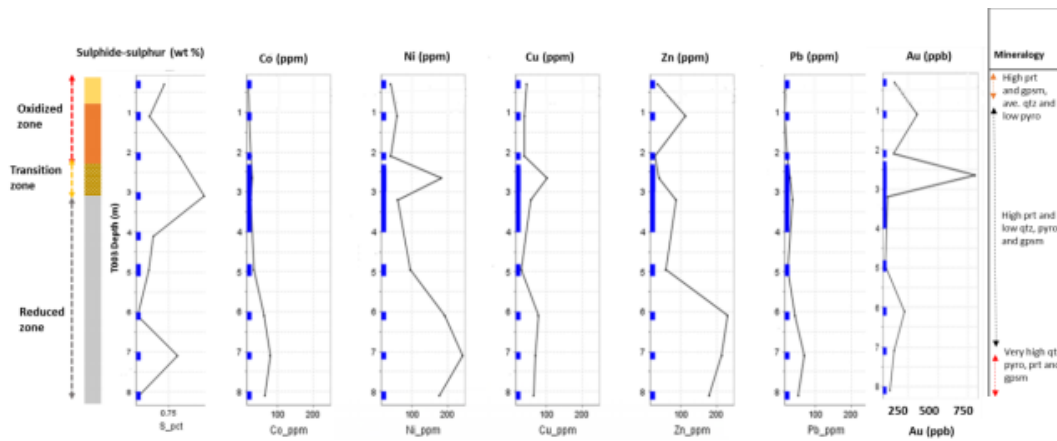


Рисунок 1.10 – Графики, отражающие корреляцию между концентрациями основных микроэлементов и $S_{\text{сульфидная}}$ по разрезу хвостохранилища Witwatersrand

На юго-востоке Испании, особенно вблизи района Картахена-Ла-Унион, находится около 80 техногенных объектов, являющихся результатом деятельности по добыче полезных ископаемых за последнее столетие. Горнодобывающий район Картахена-Ла-Унион является одним из наиболее заметных мест геохимического загрязнения и геотехнической нестабильности. Хвостохранилище Брунита является одним из многочисленных в округе, затрагивающим окружающие водоприитоки, которые достигают береговой линии Ла-Манга – основного туристического направления в Юго-Восточной Испании.

В работе представлены результаты совместного применения геофизических, минералогических и геохимических методов изучения хвостохранилища Брунита. Хвосты представляют собой флотационные отходы обогащения средне-мелкозернистого песчаного материала, полученные в результате металлургической переработки пирита, сфалерита и галенита из рудников Элой и Брунит с 1952 по 1981 год (рис. 1.11). Как известно, существует значительная разница в удельном сопротивлении между коренными породами основания шахтного пруда и его материалом. Это позволило применить Electrical Resistivity Tomography (ERT) для определения глубины и геометрии нижней границы хвостохранилища и, соответственно, толщины самого техногенного материала [20, 21, 38, 39]. В результате были получены шесть профилей ERT, три из которых расположены на северо-востоке и на юго-западе территории, а три других тяготеют к северо-восточной и юго-восточной части.

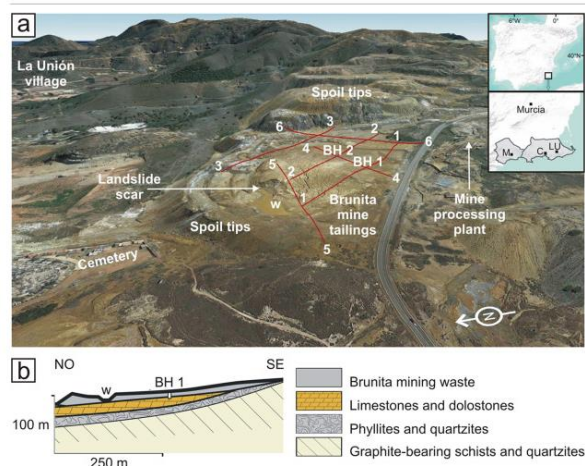


Рисунок 1.11 – План участка отбора проб хвостохранилища Брунита (скважины ВН₁, ВН₂ и пробы воды w) по профилям ERT и геологический разрез участка рудника Брунита

Были использованы два измерителя сопротивления Syscal Junior Switch 48 и Syscal R1 Plus Switch 72. Длина профилей ERT составляла от 175 до 265 м, достигая максимальной глубины исследования 40 м в центральной части профиля. Чтобы объединить хорошую глубину проникновения, разумное вертикальное и горизонтальное разрешение и хорошее отношение сигнал/шум, была выбрана матрица Веннера-Шлюмберже. Образцы керна были отобраны из скважины ВН₂ с использованием роторного бура TP-50/400 с минимальным диаметром керна 100 мм до глубины отбора проб 24 м в пруду шахты Брунита (рис. 1.12). Извлечение керна было с постоянным вертикальным интервалом 1 м. Чтобы предотвратить обрушение материала со стенок выработки, скважины обсаживались.

По данной методике было отобрано 25 неизменённых образцов глубиной от 0 до 24 м. Кроме того, для геохимических исследований были отобраны пробы воды из затопленного шахтного пруда. В скважине ВН₁ были также отобраны дополнительные образцы керна при бурении, не нарушенные до глубины 15 м.

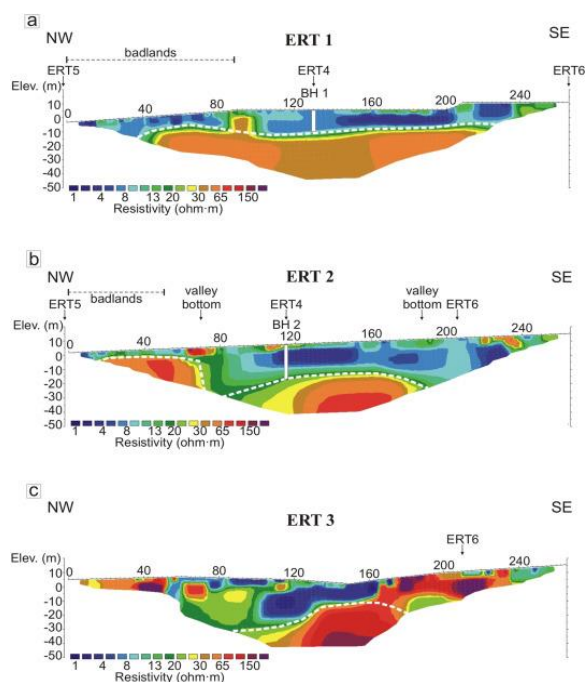


Рисунок 1.12 – Продольные профили разведки методом ERT на участке Брунита. Граница между отложениями шахтного пруда и подстилающими метаморфическими породами (прерывистая линия) показывает изменение толщины хвостохранилища

Горнорудный район Линарес-Ла-Каролина (юг Испании, провинция Хаэн) характеризуется наличием техногенных объектов, которые в основном состоят из сульфидов свинца и меди. Эти минеральные образования были оставлены в конце 20-го века. Отходы обычно складировались в кучах, расположенных рядом с горнодобывающими предприятиями, часто без предварительной подготовки земли (аналогично техногенным минеральным объектам Кочкара). Это создало значительные экологические риски в регионе. По крайней мере 32 крупных хвостохранилища были определены в этом рудном районе. Хвостохранилище La Aquisgrana является одним из крупнейших (200×180×35 м) и наиболее представительных в горнорудном районе Линарес-Ла-Каролина (рис.1.13).

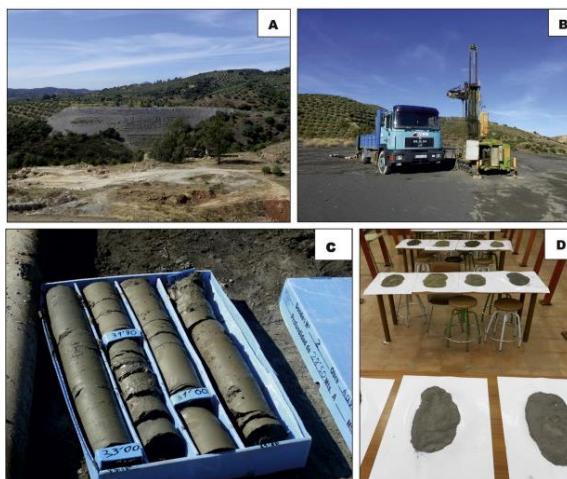


Рисунок 1.13 – Общий вид хвостохранилища La Aquisgrana (a), где на переднем плане видны руины древней мойки; буровые работы (b); коробка, заполненная буровыми кернами (c); образцы керна в лаборатории (d)

Анализ фото на рис. 1.14 свидетельствует, что при бурении хвостохранилищ практически невозможно сформировать керн и тем более обеспечить привязку отобранных проб к системе координат для последующего планирования горных работ. Поэтому при обосновании технологии разработки неоднородных техногенных образований необходимо ориентироваться на способы оценки структуры и свойств отвала как основу для выбора направлений очистной выемки и средств механизации.

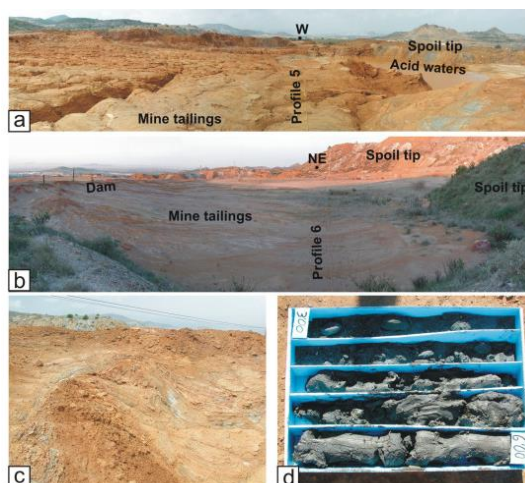


Рисунок 1.14 – Полевые фотографии отходов шахты Брунита: а) Ландшафт северной части объекта (профиль 5 ERT), где образовались бесплодные земли (a) и вид на южную часть хвостохранилища (профиль 6 ERT) (b); пластическая деформация хвостов, связанная с разрушением плотины в октябре 1972 г. (c) и хвосты из керна скважины ВН₂ (d)

Согласно анализу распределения частиц по размеру образцы керн, они представлены в основном песчаным материалом с различным количеством илистой составляющей и глины. Влажность пород колебалась от 8,4 до 14,1% для первых 9 м скважины и от 18 до 30% для последующих 10-15 м скважины соответственно (рис. 1.15, г, д). После установки скважины в октябре 2012 г. в базальном разрезе хвостохранилища была выявлена водонасыщенная зона толщиной насыщения около 4 м, несмотря на внешнюю осушенность хвостохранилища. Схожие результаты получены в России при обследовании хранилищ отходов обогащения. Краснореченская обогатительная фабрика в период работы (1956–1995) обогащала комплексные оловянно-полиметаллические и свинцово-цинковые руды Смирновского и Южного месторождений.

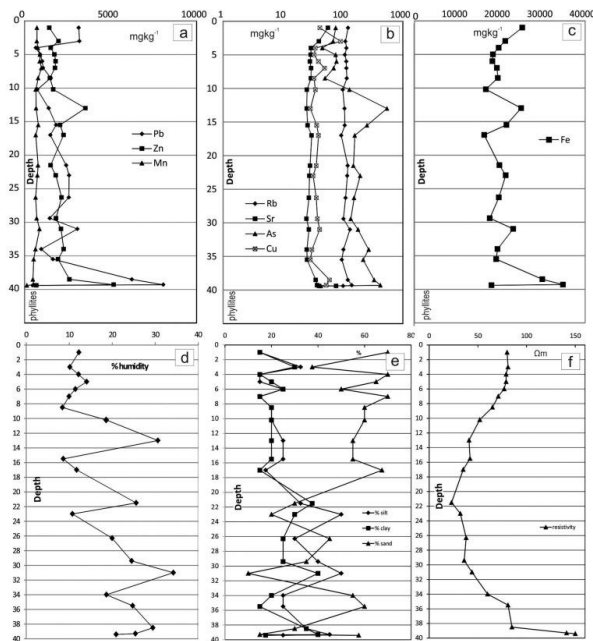


Рисунок 1.15 – Изменение глубины выбранных физико-химических параметров: Pb, Zn и Mn (a); Rb, Sr, As и Cu (b); Fe (c); процент влажности (d); процентное содержание глины – ила – песка (e); реальные значения удельного сопротивления вдоль скважины (f)

К главным компонентам исходных руд месторождения относится свинец и цинк, к попутным – серебро, медь, кадмий, сурьма, висмут и индий, при этом в свинцовый и цинковый концентрат извлекалось не менее 92 % галенита и

сфалерита, 80-85% серебра, а остальная часть вместе с сульфидами других металлов сбрасывалась в пульпу, состоящую из нерудных минералов. Таким образом, в хвосты уходило около 10% серебра, 8% свинца и до 5% цинка. В виде магнетита, пирротина, пирита и марказита в хвосты отправлялось от 56,3 до 93,8% железа, 66–98% мышьяка, 10–15% сурьмы и 38–46% кремнезема в виде кварца, геденбергита и других силикатов, а также Se, Te, In, Ge, Tl, Ga и F. Чаши хвостохранилищ КОФ заполнялись на протяжении 40 лет и содержат более 6,8 млн т отходов, что обуславливает повышенное внимание к лежалым хвостам как к потенциальному сырью. Опробование отходов переработки руд осуществлялось бороздовым способом вертикально по каждому визуальнo выделенному слою наибольшей изменчивости состава и строения лежалых хвостов. Аналитические исследования выполнены в Центре коллективного пользования Дальневосточного геологического института ДВО РАН. Определение содержания элементов в образцах выполнено методами масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре «Agilent 7700 с» (Agilent Technologies, США) и атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре «iCAP 6500Duo» (Thermo Scientific Corporation, США) [116].

Оценка строения хвостохранилища показала, что в отвале происходит геохимическое перераспределение материала, выражающееся в его расслоении. Так, для строения старогоднего хвостохранилища Краснореченской обогатительной фабрики характерна смена геохимических ассоциаций с глубиной и выделены девять слоев. Первый слой представлен в верхней части, где отчетливо прослеживается связь цинка с оловом, которая с глубиной сменяется ассоциацией цинка и свинца (слой 2), а ниже по разрезу наблюдается связь цинка с мышьяком (характерна для слоев 3,4 и 5), к этой ассоциации с глубиной техногенного объекта вновь присоединяется свинец (слои 6,7,8 и 9). Таким образом, в строении старогоднего хвостохранилища прослеживается четкая вертикальная зональность распределения свинца, олова, мышьяка и цинка, резким увеличением содержания полезных компонентов в средней части техногенного образования и резким уменьшением к приплотиковой

зоне, что, возможно, обусловлено влиянием метеорных вод, создающих гидростатическую «подушку» (рис. 1.16). Наличие такой подушки, особенно при разработке хвостохранилища наливного типа, определяет особые подходы к выемке техногенного сырья, как при ориентировании фронта выемки по основанию, так и при работе погрузочно-транспортных средств на поверхности. Выполненные исследования позволяют утверждать, что хранилища отходов обогащения являются крайне неоднородными, это определяет многочисленные исследования в области создания моделей этих объектов как основы геотехнологии выемки неоднородного сырья. Для этого применяются различные методы оценки [10, 37].

Трёхмерное моделирование геохимических процессов на поверхности хвостохранилища как одна из перспективных альтернатив более традиционному методу исследования техногенного сырья – геологическому отбору проб и лабораторным методам, реализовано с использованием стандартных методов сбора данных на базе комбинации рентгеновской флуоресцентной спектроскопии (PXRF) и естественной гамма-спектрометрии, работающих в сочетании с обычным интерполятором и кригингом для оценки вероятности превышения определённого порогового уровня концентраций элементов [54].

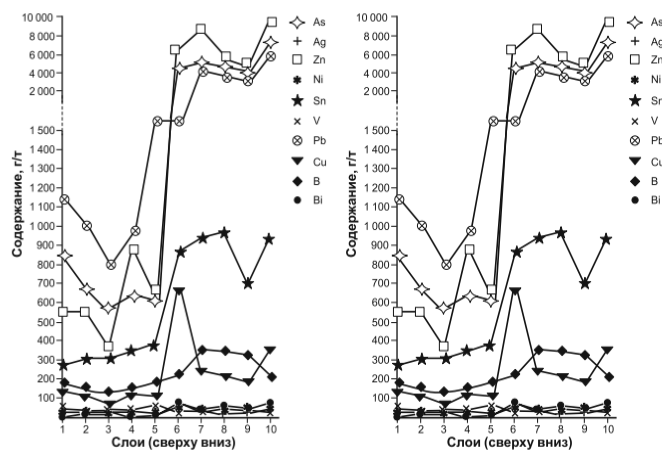


Рисунок 1.16 – Среднее содержание некоторых элементов в слоях 1-10 старого хвостохранилища Краснореченской обогатительной фабрики

Схема размещения точек отбора проб золотосодержащего сырья с различными расстояниями в центре хвостохранилища и по периферийной зоне

влияния представлена на рис. 1.17. На основе данных, полученных по результатам радиометрического обследования скважин, геохимическая трехмерная модель хвостохранилища способна прогнозировать вероятность превышения элементом определённого уровня концентрации [4].

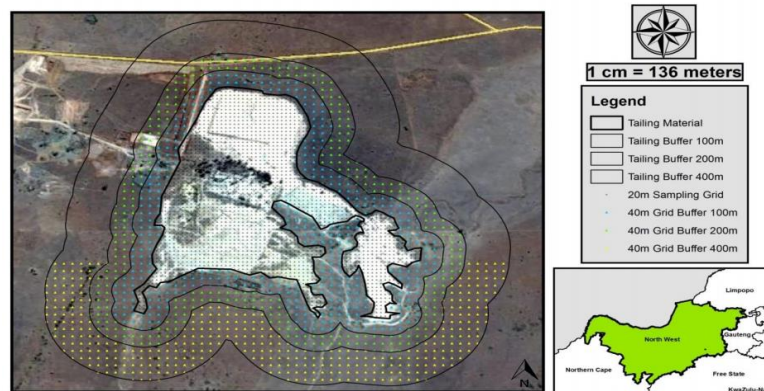


Рисунок 1.17 – Моделирование сети опробования для полевой съёмки PXRF анализатором хвостов обогащения золотосодержащих руд

Об успешной реализации такого подхода к обоснованию параметров технологий разработки хвостохранилища урановых руд свидетельствует хорошая идентификация радиоактивных аномалий (K,Th,U), а также соответствующих путей их миграции (рис. 1.18).

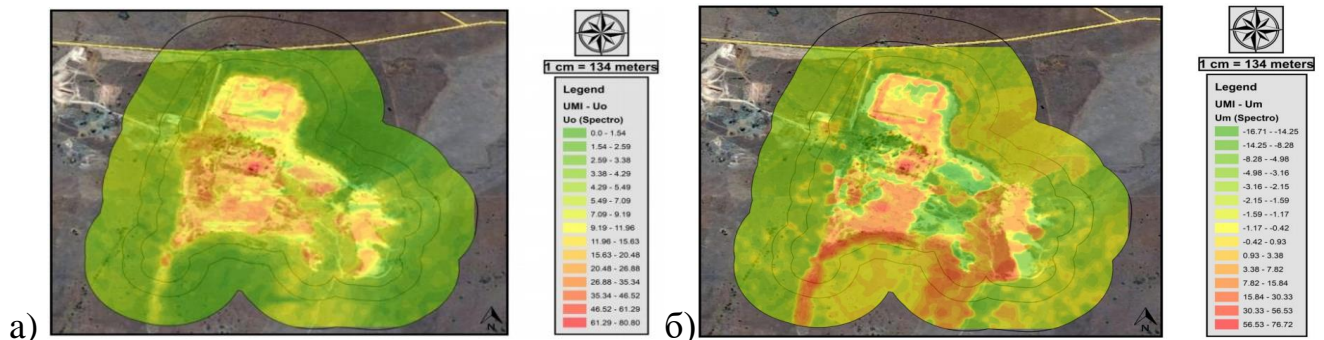


Рисунок 1.18 – Геостатистическая 3D-модель пространственной миграции радиоактивных элементов за пределы хвостохранилища, основанная на различии в исходной концентрации (а) и значении миграции урана (б)

Установленные зоны, обогащённые ураном, позволяют обоснованно выбрать продуктивные участки, направления развития фронта очистных работ и средства механизации. Установление закономерностей распределения концентраций токсичных элементов в хранилище отходов обогащения свинцово-цинковых руд в Македонии с помощью многомерной статистики и 3D-

моделирования позволило горному предприятию разработать технологические решения по оценке степени изменчивости структуры экологически опасного техногенного образования и реализации мер по его рекультивации [54]. Стохастическое моделирование было выполнено по 2 главным факторам: до нарушения герметичности хвостохранилища F1 и после F2. Выбранные результаты имитационных реализаций по двум этим факторам представлены на рис. 1.3.3. Высокие концентрации Th, Au, Co, Sn, U (аномалии красного цвета) свидетельствуют о том, что данный техногенный объект нуждается в регулярном мониторинге на всём протяжении наращивания дамбы. Согласно построенной имитационной модели, после её разрушения Zn, Cu, Sb, Pb, Cd, Ag, Sn, U сконцентрируются в северной части хвостохранилища (рис. 1.3.3b), а в южной части будет наблюдаться повышенное содержание Th, Au, Co (рис. 1.19c).

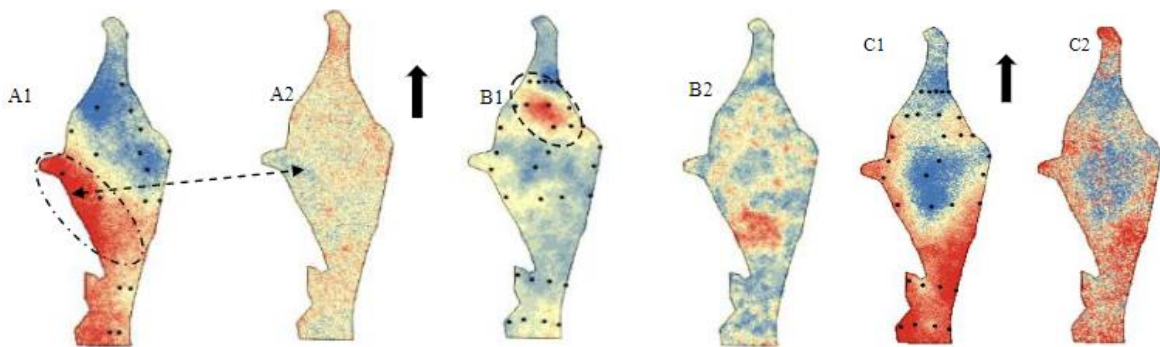


Рисунок 1.19 – Модель распределения содержаний токсичных элементов перед разрушением (а) и после разрушения дамбы хвостохранилища (b, c): изображение с учётом рельефа поверхности (красное - положительные отметки) и пространственная неопределённость изображения (стандартное отклонение - красное, более высокая неопределённость)

Учеными ИНГГ СО РАН при оценке пиритсодержащих хвостов была построена 3D-модель участка хвостохранилища на основе метода электротомографии. Этот метод был успешно использован зарубежными авторами в аналогичных исследованиях [21] из-за заметного резистивного контраста между основанием хвостохранилища и его наполнением. Основные области применения электротомографии включают в себя определение границ водоносного горизонта, пустот, обнаружение минерализованных зон, а также разведку песчаных и гравийных ресурсов. Результаты каротажа скважин

хвостохранилища были получены с помощью программного обеспечения Res3Dinv и обработаны в «Voxler» (рис. 1.20).

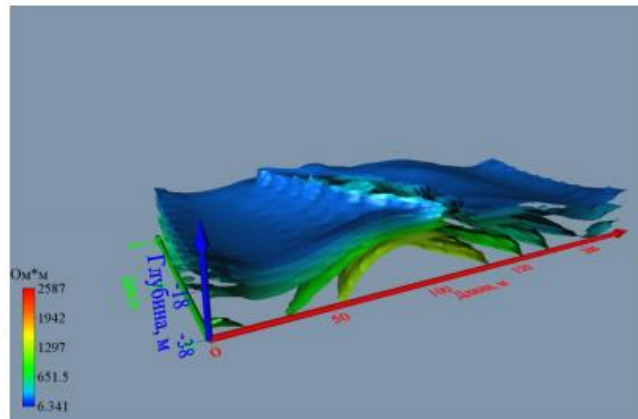


Рисунок 1.20 – 3D-модель фильтрации хвостохранилища, где тёмно-синие зоны характеризуют поровое пространство грунта, заполненного высокоминерализованными растворами

Восточный участок отснятой площади представляет собой заболоченную местность с выходом намытых грунтов в центральной части. Изолинии топоповерхности, имеющей сопротивление около 30 Ом*м (синий цвет), доходят до глубины 20 м, что может свидетельствовать о том, что насыщенные тяжёлыми металлами растворы могут достигать грунтовых вод. Анализ проб воды с 15 м глубины показал, что концентрация тяжёлых элементов в разы превышает допустимые нормы ПДК, увеличиваясь с глубиной [124]. Возможность последующей миграции токсичных металлов за пределы чаши хвостохранилища подтверждается их присутствием в грунтовых водах преимущественно в сульфатной форме. Всё это указывает на сложность и многоплановость проблемы обеспечения экологически безопасной отработки техногенных образований и обуславливает для каждого конкретного случая выбор наиболее рациональных параметров геотехнологии.

Пример геологической интерпретации строения хвостохранилища «Комсомольское» методом электротомографии демонстрирует четкую латеральную и вертикальную зональность, свидетельствующую о наличии в пределах складирования техногенного сырья протяжённых обводнённых высокоминерализованных горизонтов, сменяющихся водоупорами (рис. 1.21)

[76]. Данный факт наличия скрытых обводнённых зон необходимо учитывать при обосновании параметров геотехнологий отработки техногенных минеральных образований [30]. Учитывая, что в климатических условиях Южного Урала количество осадков и их поступления в отвал связано с сезонностью, в цикле разработки хвостохранилищ требуется вести опережающую оценку структуры техногенного объекта и корректировать параметры геотехнологии.

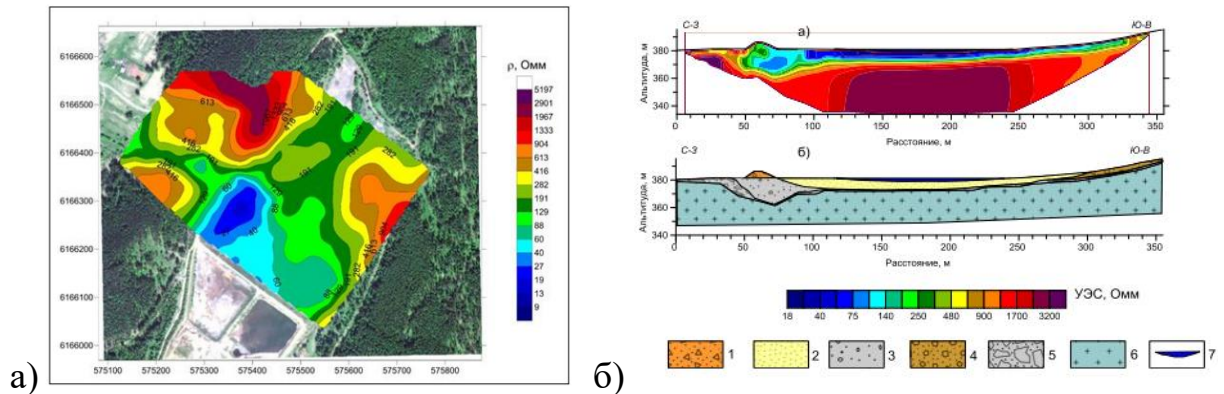


Рисунок 1.21 Установленная зона просачивания дренажных растворов под стенкой дамбы Комсомольского хвостохранилища (синяя область) на карте (а) и разрезе с его геологической интерпретацией (б): 1 – насыпные грунты дамбы; 2 – хвосты обогащения; 3 – рыхлые отложения; 4 – рыхлые склоновые отложения; 5 – кора выветривания диоритов; 6 – коренные диориты; 7 – гидроотвал

В работе [44] были определены генезис и направление дренажных потоков из хвостохранилища Новоурского месторождения. Внутреннее зондирование отвала и прилегающей территории позволило определить направление дренажного потока и оценить масштабы загрязнения окружающей среды по данным зондирования ERT (рис. 1.22). Ввиду неоднородности геологического строения отвала хвостохранилища результаты профильных измерений были преобразованы в 3D-структуру. На карте распределения УЭС на глубине 15 м выявлена линейная узкая область (~40 м), расположенная на более низком гипсометрическом уровне, чем само хвостохранилище, это может быть связано с загрязнением трещиновато-пористых вод насыщенными токсичными растворами (аномалия с низким УЭС 5-15 Ом*м). Таким образом, при помощи ERT были обнаружены нарушенные области, которые могут в дальнейшем служить источником распространения геохимического загрязнения.

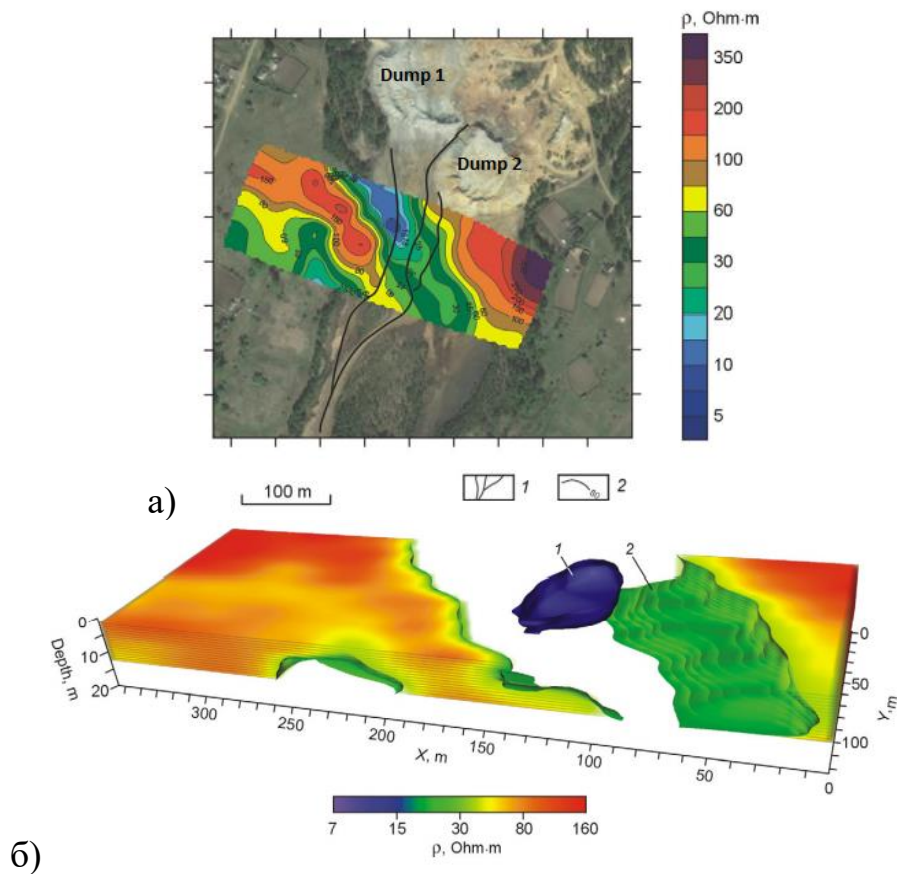


Рисунок 1.22 – Спутниковый снимок исследуемого района с наложенной на него картой распределения УЭС по глубине 15 м: 1 – потоки дренажных вод; 2 – изолинии топоповерхности (а) и трёхмерная геоэлектрическая модель (б)

Наличие таких опасных зон должно учитываться при обосновании параметров открытой разработки хвостохранилищ, а в составе технологических операций необходимо предусматривать мероприятия по недопущению поступления загрязняющих веществ в окружающую среду.

Управление крупномасштабными техногенными объектами имеет решающее значение для долгосрочного обслуживания и последующей эффективной эксплуатации хвостохранилищ [14, 17, 33, 34, 40]. Исследования естественного уплотнения в динамике по времени необходимы для проектирования конструктивных элементов технологий разработки техногенных минеральных образований. В исследованиях [35] на хвостохранилище золотого рудника месторождения Barrick's McLaughlin была предложена методология многомерного моделирования процессов уплотнения и осаждения золотосодержащих хвостов с течением времени. Эксплуатация хвостохранилища

велась десятилетия и завершилась еще в начале 2002 г., по результатам геологоразведочной съёмки был смоделирован рельеф поверхности объекта и определены физико-механические свойства материала. Входными данными для построения модели служили плотность хвостов среднего и тонкого помола, мощность отложений и поровое давление на стенки техногенного грунта (рис. 1.23). Результаты исследований доказывают, что выбор параметров рабочих площадок, рабочих углов откоса уступов и их высоты зависят от срока складирования сырья. Данный факт нуждается в дополнительной проверке.

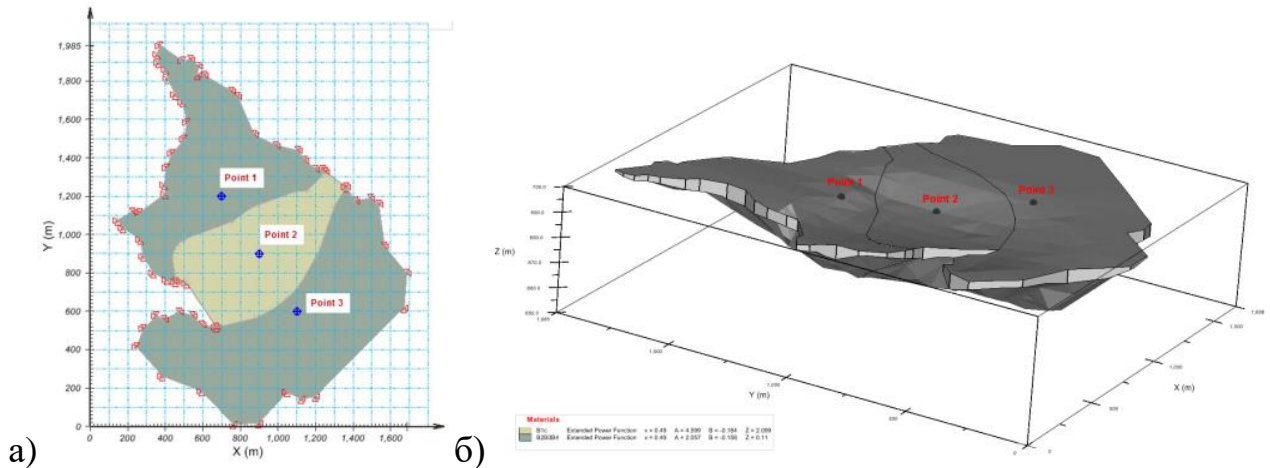


Рисунок 1.23 – Геометризация пространственного размещения золотосодержащего сырья различного класса крупности по степени уплотнения в плане (а) и 3D (б)

В настоящее время методы численного, статистического моделирования физико-химических процессов, протекающих в динамично изменяющихся техногенных средах, являются необходимым инструментом для анализа и визуализации экологических и геологических данных об исследуемом объекте [27]. В работе [1] рассматривается возможность 3D-моделирования изменения уровня концентраций цианидов в хвостах золотых рудников при помощи программного обеспечения MATLAB coding (рис. 1.24,а). В отличие от геостатистических методов данный подход не обладает способностью обнаруживать анизотропную среду, поэтому в основу модели были заложены принципы изотропии окружающей среды. В ходе анализа данной работы установлено, что оценить влияние каждого внешнего фактора (размытие хвостов

дождевыми водами, ветровая дефляция) при такой методике исследования достаточно трудно. В результате рассмотрения различных изменений физико-химических параметров хвостохранилища при различных режимах была создана общая концептуальная модель пространственного распределения цианидных комплексов в техногенном образовании (рис. 1.24, б). Факт остаточного содержания цианидов и необходимость разработки особых подходов к обоснованию параметров геотехнологий отработки подобных техногенных минеральных образований необходимо учитывать на этапе проектирования и в ходе эксплуатации объектов.

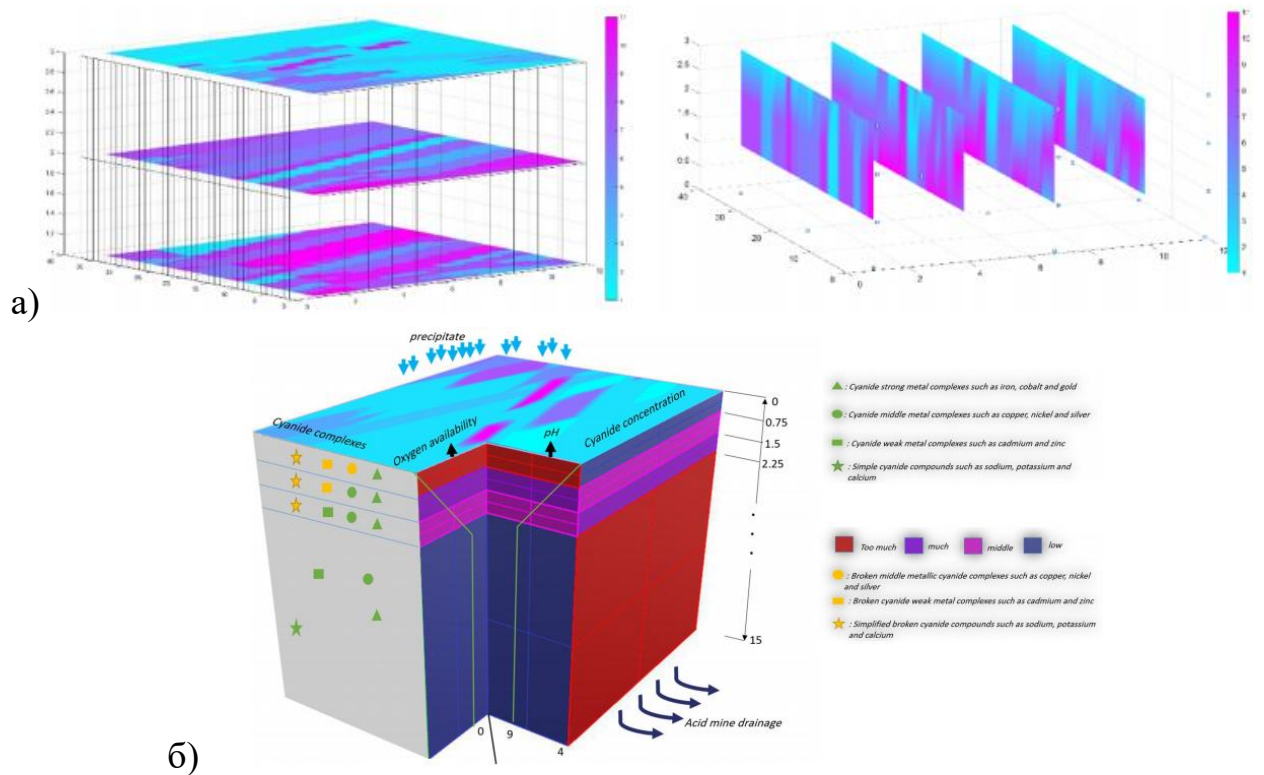


Рисунок 1.24 – Моделирование распределения цианидов в хвостах по двум основным направлениям с использованием алгоритма AdaBoost (а) и конечная ситуационная концептуальная модель хвостохранилища (б)

Для возможности оценки пространственной структуры техногенных образований и разброса содержаний не только ценного металла, но и показателей физико-химических свойств техногенного сырья, в зарубежной практике часто используется вариограммный анализ с применением сферических и экспоненциальных функций [1,27]. Карта результатов различных интерполяторов

представлена на рис. 1.25. Из приведенного источником сравнения видно, что выполненный геостатистический анализ распределение рН хвостохранилища по площади наблюдения имеет небольшие отклонения по значению коэффициента вариации, но приближен к среднему показателю рН хвостов. Прослеживается чёткая зависимость между показателями рН в зоне наблюдения от глубины отбора пробы. Интерполяция значений рН среды методом кригинга дает наилучшие результаты, приближенные к достоверным.

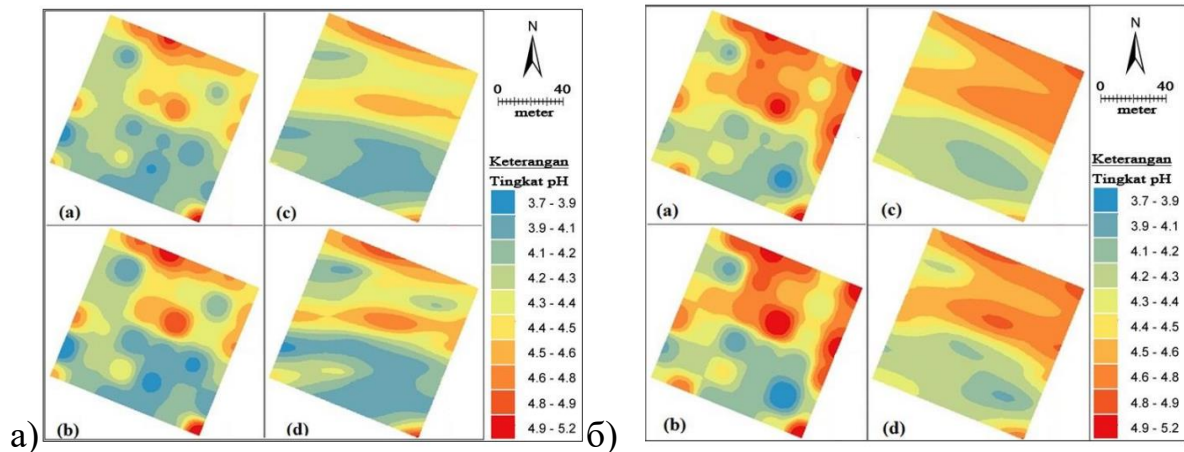


Рисунок 1.25 – Карта распределения рН хвостохранилища на глубине до 20 (А) и 50 см (В), полученная: методом обратных взвешанных расстояний (а); методом взвешивания расстояния перевернутого ранга (б); методом кригинга со сферической вариограммой (с); методом кригинга с экспоненциальной вариограммой (d)

Выполненный аналитический обзор и изучение методов и подходов к изучению свойств складированных отходов обогащения золотосодержащих и многокомпонентных руд показал, что хвостохранилища являются крайне неоднородными структурами, содержат обогащённые ценными элементами и обеднённые участки, определяющие выбор технологий их эффективной разработки. Для научно обоснованного выбора параметров открытой разработки техногенных минеральных образований, представленных тонкодисперсным сырьём, необходимо понимание механизмов, в результате которых техногенные образования в ходе их формирования и с течением времени приобретают характерную неравномерную структуру, различие в вещественном составе и физико-механических свойствах сырья, складированного на различных участках.

1.3 Закономерности природных и техногенных процессов, обуславливающие формирование технологических свойств хвостов обогащения золотосодержащих руд

По мере снижения содержания ценных компонентов в исходных рудах растёт востребованность в технологически эффективных и экономически целесообразных технологиях извлечения благородных металлов из вторичного сырья. В связи с тем, что техногенные образования подвержены интенсивному воздействию процессов окисления, выщелачивания, переосаждения, золото и сопутствующие ему ценные компоненты находятся в хвостах в трудноизвлекаемой форме [79]. Складированные на поверхности отходы горно-перерабатывающего производства испытывают всестороннее влияние природных факторов, трансформируясь под их воздействием, а с другой стороны – активно сказываются на процессах, протекающих в природных средах. Поэтому для экономически эффективной разработки техногенных образований и переработки добываемых отходов необходимо как привлечение существующих современных геотехнологий и методов обогащения, так и поиск новых оригинальных подходов к их освоению [65, 72, 92, 109].

О масштабах возможности повторной переработки техногенных минеральных ресурсов свидетельствуют данные о количестве ежегодно складированных в хвостохранилища отходов переработки руд золота. Только в США ежегодно в отвал обогатительной фабрики поступает около одного млрд тонн техногенного золотосодержащего сырья со средним содержанием ценного металла 0,45 г. В результате многовековой разработки медно-колчеданных и золоторудных месторождений на Южном Урале в хвостохранилища складировано около сотни миллионов тонн отходов обогащения, содержащих 150 т золота при содержании ценного металла 0.8-1.2 г/т. Кроме того, отвалы золотоизвлекательных фабрик могут содержать промышленные количества таких металлов, как медь, молибден, серебро, уран и другие. Так, в ЮАР в шламовые отвалы вместе с золотом ежегодно поступает около 6 тыс. т урана. На руднике Kupferberg (Германия) с начала разработки до наших дней было добыто свыше 500 тыс. т меди, 15 т серебра и 1.5 т золота [2].

Важно отметить, что разработка техногенных образований, по сравнению с природными источниками металлов, отличается лучшими технико-экономическими показателями, что достигается вследствие относительно невысоких капитальных и эксплуатационных затрат на разработку измельчённого сырья, складированного непосредственно на дневной поверхности, и переработку техногенного сырья, чаще всего на уже действующих в регионе производствах. Однако при обосновании параметров геотехнологии следует учитывать не только преимущества, но и опасности, связанные с разработкой столь сложных объектов.

Например, при обосновании параметров технологии разработки золотосодержащих хвостохранилищ, расположенных на пяти месторождениях района Witwatersrand (Brakpan, Knight, Edenvale, Roodepoort и Klerksdorp), практически не содержащих карбонатов, определено, что до глубины 10 м все отвалы имели кислый характер – величина pH составляла не более 4 [7, 15, 48], что, особенно при pH менее 2, определяет невозможность применения широкого ряда средств механизации и влечёт риск коррозии оборудования.

Механизм формирования неоднородной структуры хвостохранилища в части pH влечёт последующие изменения минерального состава. Низкие pH способствуют растворению металлов, их переносу и осаждению на других минералах. Так, подвижность золота в отвалах изменяется от практически нулевой (в восстановительных условиях и в области pH от нейтральной до щелочной) до средней и высокой в окислительных и кислых условиях (рис.1.26).

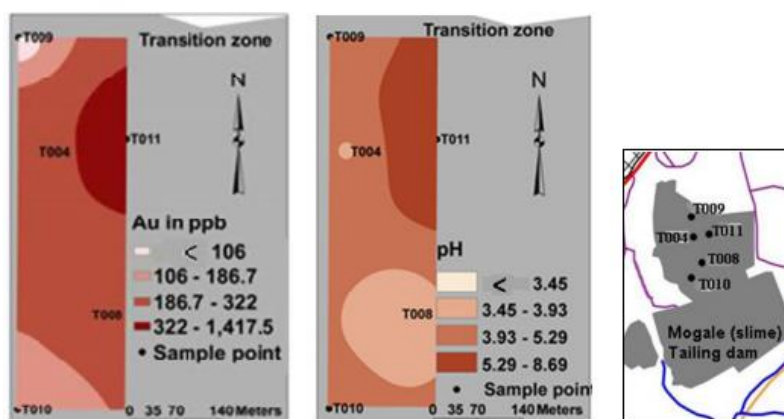


Рисунок 1.26 – Тенденция распределения Au и pH в верхних слоях окисленного слоя хвостохранилища Mogale (South Africa)

В результате взаимодействия техногенных отходов со стоками перерабатывающих предприятий, а также метеорными водами рН среды хвостохранилаща способен меняться в сторону более кислой, за счёт чего образуются водные растворы, насыщенные железом, сульфат-ионами, благородными и цветными металлами. [19, 18, 46, 56]. Повышение кислотности техногенного сырья в хвостохранилище обусловлено протекающими внутриотвальными физико-химическими процессами, вызванными поступлением большого количества дождевых осадков и их медленным испарением за счёт чего кислотные растворы не успевают нейтрализоваться щелочными минералами [13, 25, 31]. Результатом таких физико-химических воздействий на техногенные отходы переработки руд может быть увеличение или уменьшение пористости и проницаемости хвостов, а также увеличение или уменьшение растворимости различных соединений в воде, скорость растворения которых зависит от гидрохимии техногенного сырья, степени сцементированности и целостности их структуры.

Как показывает опыт мировых исследований, физико-химические свойства сырья хвостохранилищ существенно различаются в пределах одного техногенного объекта. На показатели Eh и рН техногенных отходов переработки руд значительное влияние оказывает наличие в отвале органических соединений, обуславливающих процессы биоокисления сульфидных минералов микроорганизмами с выделением в раствор серной кислоты. В результате смены физико-химической обстановки среды техногенного образования создаются благоприятные условия для выщелачивания благородных металлов [80]. Поведение золота в хвостохранилищах изучено недостаточно. Установлена его высокая подвижность в зоне окисления сульфидных минералов с образованием новых форм золота в техногенных образованиях – хемогенного золота [42, 55]. В корях выветривания, обогащённых аутигенным золотом, наблюдаются горизонты бурых железняков, ярозитов и опалов [70], при этом часть Au диагностируют как вторичное, новообразованное. Считается, что наиболее благоприятной средой для «хемогенного» золота в отвалах является зона окисления, развитая по золото-

сульфидно-кварцевым месторождениям. В работе Б.М. Осовецкого [90] очень подробно представлено описание наноструктур вторичного золота – тонкие корочки пористой, губчатой структуры, почковидные агрегаты, тончайшая золотая пыль и др. Размер золотин составляет от 1 до 100 нм. Изучены наночастицы благородных металлов в гипергенных условиях и показано, что формирование специфической морфологии золота (рис. 1.27) связано с перераспределением ультрадисперсного Au и выпадением из истинных и коллоидных растворов при становлении профиля выветривания.

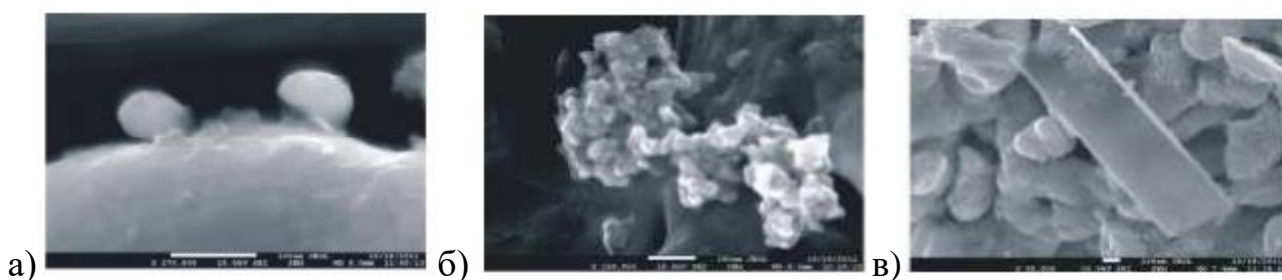


Рисунок 1.27 – Микрофотографии наноформ хомогенного золота из хвостов россыпных месторождений реки Ис: а) одиночные коллоидные частицы, адсорбированные на стенке микротрещины; б) агрегат, образованный наночастицами золота; в) наноплёночный агрегат Au на поверхности зерна

Доказано, что образование хомогенного золота протекает не только в условиях физического и химического выветривания, но и сопровождается деятельностью бактерий, которые приводят к мобилизации и его переотложению на поверхности глинистых минералов и минералов зоны окисления, таких как, гетит, вермикулит, иллит каолинит, монтмориллонит. Переотложенное золота представлено двумя формами: равномерно рассеянными, сорбционными ультрадисперсными частицами и за счет некомпенсированных зарядов на макро- и микрочастицах минералов-сорбентов; более крупными частицами (нано- и микро). Вторая форма переотложенного золота чаще всего образуется в кислой среде на поверхности гетита и монтмориллонита, а в щелочной – на каолините и вермикулите [41].

Механизмы, ответственные за накопление благородных металлов в техногенных средах, остаются малоизученными. Например, в исследованиях [49] установлено, что в торфе, контактирующем с сульфидно-цианидными отходами,

может накапливаться до 155 г/т Au и 560 г/т Ag. Известно, что в результате различных физико-химических, биологических процессов (фильтрация, адсорбция, осаждение Au в нерастворимых соединениях, ионный обмен и т. д.) органическое вещество способно поглощать недоизвлечённые тяжёлые металлы (Fe, Cu, Zn, Cd, Hg, Pb). Данный факт свидетельствует о новых возможностях целенаправленного формирования техногенных месторождений с переслаиванием слоев золотосодержащих отходов переработки руд и торфа. При этом, спустя время, извлечению подлежит только обогащённый торфяной слой.

При длительном хранении золотосодержащего техногенного сырья в отвалах содержание благородного металла, связанного сульфидами, снижается и повышается доля свободного (гипергенного) золота [80]. Экспериментальными исследованиями доказана возможность восстановления ионного золота растворёнными органическими соединениями; сорбция комплексообразованием Au⁺ с функциональными группами органических соединений руд [41] или биосорбция [51].

Продукты окисления арсенопирита могут полностью находиться в ионной форме [80]:



или содержать осадок гидроксида железа:



Наличие в отходах обогащения самородного золота не определяет интенсивность его миграции, а свидетельствует лишь о форме осаждения из раствора. Золото в отходах обогащения руд в условиях длительного его хранения способно мигрировать за счёт окисления сульфидных минералов, сопровождающееся разрушением кристаллической решетки сульфида и высвобождением тонкодисперсного золота. Растворение сульфидов с высвобождением благородного металла в техногенных образованиях схоже с процессом кислотного и галоидного выщелачивания [111].

Первоначальному растворению подвергаются пленки на поверхности золота, представленные, главным образом, окислами железа. Поэтому количество

золота, покрытого пленками, также существенно снижается. Таким образом, осаждение в хвостохранилище гипергенного золота происходит при окислении сульфидов – за счёт растворения покрывающих золото пленок. Кварц, с которым связана всегда часть золота, практически не поддается вскрытию.

Многочисленными исследованиями техногенных отходов переработки руд подчёркивается важность свойств грунта, влияющих на процесс растворения и переосаждения золота: распределение частиц по размерам, неоднородность физико-механических свойств, содержание глины, окислительно-восстановительный потенциал, электропроводность, влажность, катионообменную способность [5]. Показано, что подвижность металлов в крупно-, мелкозернистых грунтах ниже, чем в крупнозернистых за счет преобладания в минеральном составе хвостов силикатных глинистых минералов (например, иллит или вермикулит с высокой катионообменной способностью). Высокое содержание органики также может усиливать адсорбцию металлов, тем самым снижая подвижность в окружающей среде, в то время как кислые условия снижают обменные способности катионов металлов в почве и повышают растворимость металлов в почвенной среде, делая их более подвижными [52].

Характер распределения элементов при длительном взаимодействии цианидных отходов с подстилающими породами, насыщенными органикой, был изучен на хвостохранилище золотосодержащих сульфидных руд Западной Сибири. Установлено, что техногенное сырьё, складированное в болотистом торфяном овраге, в структурном отношении представлено двумя видами техногенных ресурсов: отходы первичных руд с содержанием Au и Ag 0.5 г/т и 18 г/т и золотоносные коры выветривания (0.26 г/т и 13 г/т соответственно). Отбор образцов для анализа с двух участков минерализации производился через полую полипропиленовую трубку небольшого диаметра, которая погружалась во влажный материал хвостов на глубину до 43 см. Золото в техногенном объекте распределено достаточно неравномерно (рис. 1.28).

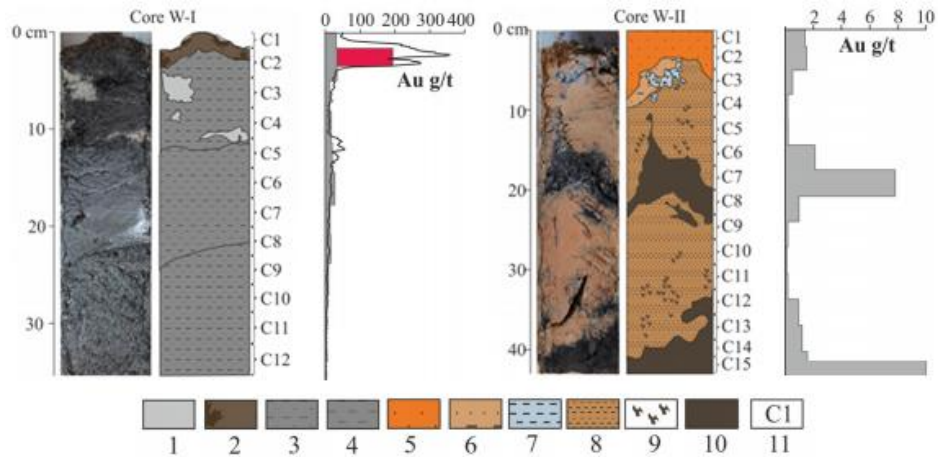


Рисунок 1.28 – Корреляция содержаний Au с образцами керна из участков, охваченных отходами первичных и выветрелых руд: 1 – зоны минерализации; 2-4 – органика дендрита; 5 – песчаный материал; 6 – песчано-илистый материал с Fe и гидроксидом Fe(III); 9-10 – торфа

В результате длительных процессов, ответственных за миграцию, переосаждение и накопление благородных металлов в органическом материале, в рамках исследования было доказано, что золото высвобождалось из окисленных отходов первичных сульфидных руд с последующим повторным его осаждением на органическом веществе (рис. 1.29).

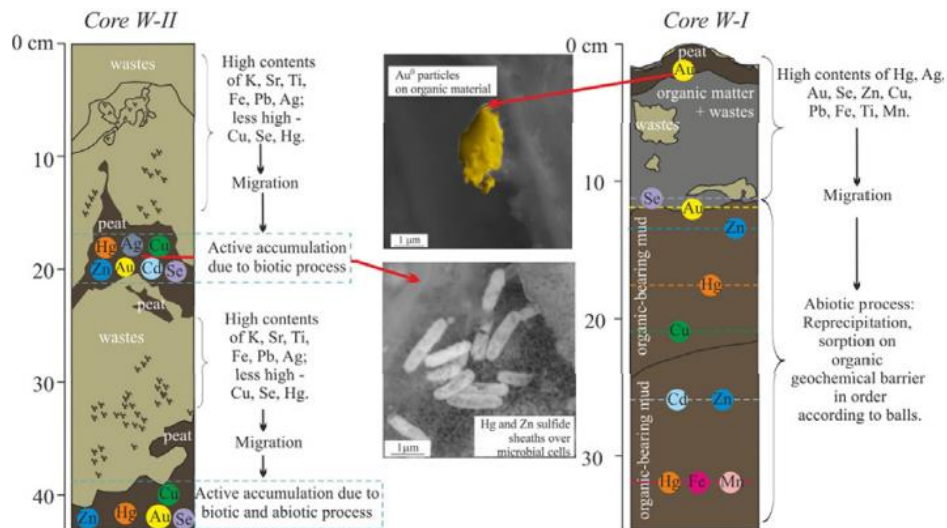


Рисунок 1.29 – Схема перераспределения элементов между отходами и органосодержащим материалом в дисперсионном ряду золотосодержащих сульфидных хвостов

При длительном хранении отходов переработки золотоносных руд хвостохранилища подвергаются различным физико-химическим и механическим

процессам выветривания, обусловленные изменениями температуры и влажности техногенного сырья, температурным воздействием в течение года с замерзанием/оттаиванием отходов переработки руд, деятельностью бактерий, воздействием дождевых и снежных осадков.

Находясь на открытом воздухе, хвостохранилища постоянно подвергаются разному температурному воздействию, которые оказывают физическое влияние на кварц, сульфиды, алюмосиликаты и т.д. Под воздействием столь значительных перепадов температур тонкоизмельченные фракции (крупностью 40-150 мкм) подвергаются расширению или сжатию не только с поверхности, но и по всему объему частиц. При этом возникает разрушение минералов или их растрескивание, подобно естественному процессу декрипитации. Растрескивание минералов, в первую очередь золотосодержащих, способствует вскрытию золота или более легкому их разрушению в процессах измельчения и классификации. Температурный фактор оказывает влияние на твердость минералов в отвалах в пределах глубины промерзания (оттаивания) 2-3 м. В более глубоких зонах хвостохранилища эффект снижения твердости обязан расклинивающему воздействию жидкой фазы отвалов. Таким образом, при долголетнем хранении отвалов в хвостохранилищах протекают природные процессы подготовки техногенного сырья к последующей технологии их переработки.

В среде техногенного образования бактерии являются главными катализаторами основных внутриотвальных физико-химических процессов преобразования и вторичного минералообразования в хвостохранилище. Так, пирит, пирротин, арсенопирит и ряд других сульфидных минералов в результате деятельности железоокисляющих бактерий образуют растворимые и нерастворимые сульфаты металлов и серную кислоту [18]. Особое внимание заслуживают сведения о концентрации золота низшими организмами – грибами, в первую очередь, рода *Boletus*, которая способна переводить золото из ионной формы в коллоидную.

При изучении верхнего слоя отвалов Nanisivik (Канада), находящихся в условиях холодного климата и вечной мерзлоты и содержащих 75-95% пирита, было определено, что вклад в окисление пирита бактерий, способных проявлять активность при 0 °С, составляет около одной трети от общей величины [16]. Процессы окисления, растворения, перераспределения вещества в сульфидных хвостохранилищах, изучаемых известными коллективами канадских геохимиков [24, 29, 32], приводят к чёткой зональности внутри техногенных тел, появляющейся со временем. Плотные вторичные слои, представленные гидроксидами железа, алюминия, а также сульфаты, типа мелантерита и ярозита, выступают в качестве геохимического барьера для складированного техногенного сырья.

Процессам вторичного минералообразования в результате техногенного преобразования минеральных форм, а также стадийности окисления золотосодержащих отходов переработки руд с образованием гидроксидов, сульфатов железа уделено особое внимание в большом количестве зарубежных работ, современный обзор состояния проблемы дан в публикации [26, 50].

Вторичные мышьяксодержащие минералы, выявленные в хвостах обогащения золоторудного месторождения Ketz River (Канада), включают оксигидроксиды Fe(III), скородит ($\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), арсенаты железа, арсениосидерит ($\text{Ca}_2\text{Fe}_3(\text{AsO}_4)_3\text{O}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), арсенаты Ca-Fe, фармакозидерит ($\text{KFe}_4(\text{AsO}_4)_3(\text{OH})_4 \cdot 6-7\text{H}_2\text{O}$), ярозит ($\text{K}_2\text{Fe}_6(\text{SO}_4)_4(\text{OH})_{12}$) [45]. Оксигидроксиды Fe(III) встречаются в хвостах в основном в виде дискретных частиц, а также в виде вторичных продуктов реакции на зернах пирита и в виде продуктов замещения вдоль границ зёрен и микротрещин пирита и арсенопирита (рис. 1.30 а-с). Оксигидроксиды Fe(III), встречающиеся в виде дискретных частиц или вторичных продуктов реакции на зёрнах пирита, демонстрируют определённую зональность и коллоформную окантовку (рис. 1.30 d). Скородит встречается в форме дискретных зёрен, мелкозернистых обломков и в качестве продукта замещения арсенопирита. Скородит может встречаться в ассоциации с мышьяксодержащим оксигидроксидом Fe(III), проявляющим коллоидную

текстуру и заключающим в себе ангедральные фрагменты пирита. Арсенаты Са-Fe (включая арсениосидерит) встречаются в виде массивных, зональных выделений, листовидных агрегатов с радиальными текстурами роста (рис. 1.30 а, б) и чаще всего выступают в качестве продуктов замещения арсенопирита.

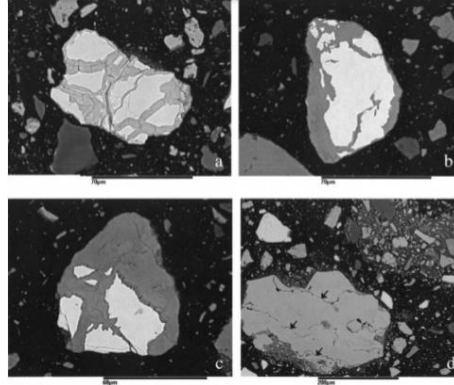


Рисунок 1.30 – Микрофотографии: а) зёрна FeS_2 замещаются вторичным оксигидроксидом Fe(III) (светло-серый; б) FeAsS замещён арсениосидеритом (серый); в) реликтовые зёрна FeAsS после замещения скородитом (тёмно-серый) и арсениосидеритом; д) колломорфные, полосчатые выделения оксигидроксида Fe(III)

При обследовании хвостохранилища месторождения Macraes (Новая Зеландия) [12] результаты последовательного извлечения образцов материала показывают, как заметно отличается геохимия и фазовые ассоциации As в хвостохранилище на двух различных глубинах. Золото в месторождении ассоциировано с пиритом и арсенопиритом, которые составляют 1% от его общего количества. Хвосты существенно различаются по глубине: с глубины 44 м был отобран глинистый материал коричневого цвета с примесью грубых обломков, серая окраска материала второго образца аналогична окраске сланца (рис.1.31). На глубине 77 м мышьяк был преимущественно связан с сульфидными минералами, а на глубине 44 м – с редуцируемыми минералами окиси металла. Предварительное моделирование поровых вод ни на одной глубине не обнаружило мышьяка, возможно, это объясняется значительным превышением его концентраций над растворимостью. Однако, несмотря на идентичные содержания As в поровой воде, растворимые и обменные фракции в хвостах обогащения были существенно больше в хвостохранилище на глубине 77 м, что,

объясняется большей растворимостью арсенопирита по сравнению с арсенатом железа.

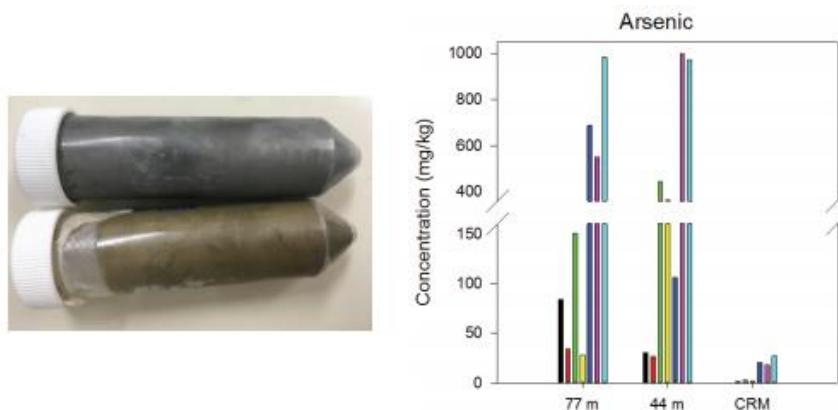


Рисунок 1.31 – Пробы хвостов с глубины 77 м (серый, сверху) и 44 м (коричневый, снизу) и концентрации As на каждой стадии последовательного процесса экстракции

Наличие в неоднородных техногенных образований растворимых и подвижных форм мышьяка определяет необходимость оценки структуры хвостохранилищ, сложенных отходами переработки золото-мышьяковистых руд. По-видимому, предпочтение должно отдаваться селективной выемке таких зон с переработкой на мышьяковистых производствах, или принятием специальных мер утилизации. Наличие растворённых форм мышьяка определяет отказ от технологии гидродобычи, в ходе которой имеется риск перевода растворимых форм в технологическую водную среду и повышение риска миграции мышьяка.

Для изучения принципов выбора геотехнологий разработки неоднородных техногенных образований требуется систематизация подходов к обоснованию параметров технологических процессов и схем.

1.4 Изучение подходов к выбору и обоснованию параметров технологий разработки неоднородных техногенных образований, представленных отходами переработки золотосодержащих руд

Огромный вклад в создание геотехнологий, обеспечивающих эффективное освоение техногенных образований, внесли академики АН СССР и РАН М.И. Агошков, Н.В. Мельников, К.Н. Трубецкой, член-корреспондент РАН Д.Р. Каплунов, доктора наук С.Е. Гавришев, А.М. Гальперин, О.Е. Горлова, В.С. Литвинцев, А.Б. Макаров, И.П. Маляров, И.А. Пыталев, М.В. Рыльникова, А.Г.

Талалай, В.Н. Уманец, И.В. Шадрунова, С.И. Фомин, Г.А. Холодняков и другие ученые. Анализ опубликованных данных о технологиях разработки техногенных образований золотодобычи показал, что несмотря на общепризнанный факт неоднородности структуры, наличия скрытых обводнённых зон, участков, насыщенных цианосодержащими растворами и мышьяком, до настоящего времени вопросам обоснованного выбора геотехнологий открытой разработки ранее сформированных хвостохранилищ, представленных отходами обогащения золотосодержащих руд, уделяется недостаточно внимания.

Наибольшее развитие в мире получили методы валовой выемки сырья гидродобычей либо механизированными комплексами, без учёта неоднородности структуры техногенного образования и особенностей вещественного состава складированного сырья [58, 74, 117, 122]. Учёт факта перераспределения золота в отвале распространён в практике повторной отработки эфельных отвалов [93, 114, 115]. Вместе с тем, на месторождениях других видов техногенного минерального сырья накоплен опыт учёта сложной неравномерной структуры и распределения вещественного состава сырья.

В работах, выполненных под руководством проф. М.В. Рыльниковой, пробы старогодних хвостов (отходов обогащения медно-колчеданных руд) отбирали с поверхности и из толщи старогоднего хранилища Бурибаевского ГОКа [104]. Отбор проб производился путем проходки экскаваторных траншей, имеющих глубину 2 м и длину до 7 м, что позволило изучить строение хвостохранилища в разрезе без существенного нарушения его сплошности.

При обследовании старогоднего хвостохранилища в срезе пройденной траншеи был установлен ярко выраженный слоистый характер распределения минеральных форм по глубине техногенного объекта. Слои имеют выраженные отличия по цвету, физико-механическим характеристикам (ярко выраженное сцепление в пределах слоя), крупности представленного материала. Установленное чередование слоёв и различие структурных особенностей представлены на рис. 1.32.



Рисунок 1.32 – Вертикальный разрез старогоднего хвостохранилища с чередующимися слоями буро-жёлтых (1) и серо-сизых (2) разностей

Обследование старогоднего хвостохранилища в разрезе по длине траншеи позволило выделить три наиболее характерных типа слоистости. Верхний слой техногенного образования – поверхностный слой аэрации и интенсивных процессов выветривания мощностью 0,5-1,2 м, имеет рыхлую структуру и серо-жёлтый цвет. Ниже его чередуются слои буро-жёлтого и серого цветов [104]. Песчанистые пласты мощностью от 0,05 до 0,2 м, представлены светло-буро-жёлтыми разностями песчанистых фракций хвостов. Слои серо-голубого цвета состоят из увлажнённых фракций. Установленная неоднородность хвостохранилища позволила предложить технологическую схему, согласно которой осушённый участок хвостохранилища обрабатывается экскаватором продольного копания, когда плоскость перемещения рабочего органа параллельна оси отрываемой траншеи, что позволяет вести выемку слоями (рис. 1.33).

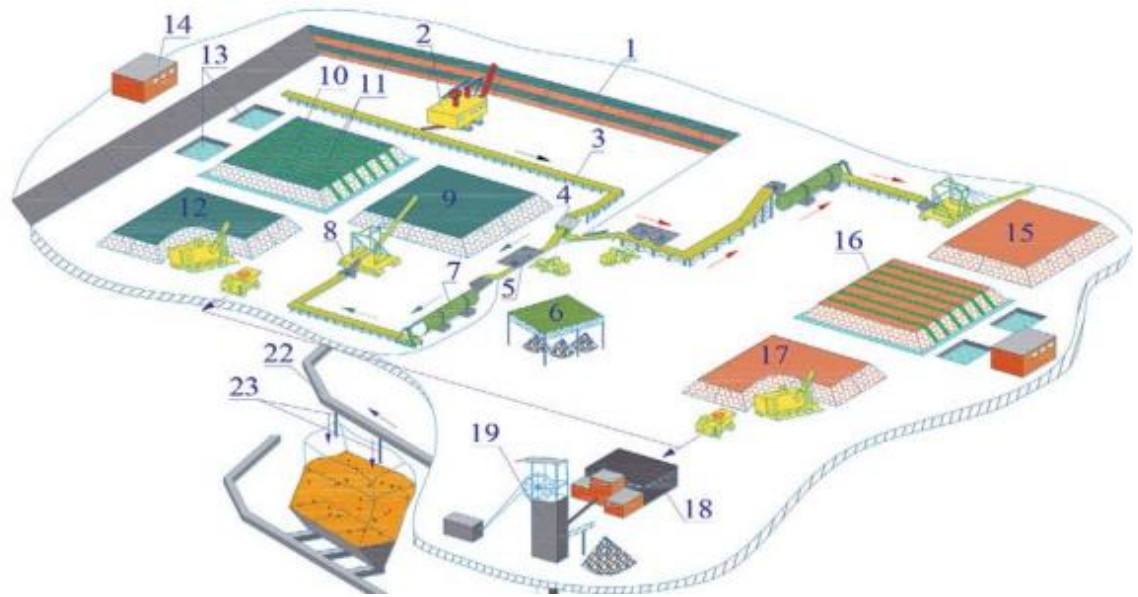


Рисунок 1.33 – Типовая горнотехническая система, предусматривающая разработку осушённых участков хвостохранилища путем валовой выемки отходов, фракционного разделения по крупности и переработки выщелачиванием по отдельным циклам: 1 – хвостохранилище; 2 – выемочный комплекс; 3 – транспортный комплекс; 4 – сепарационная установка; 5 – бункер-дозатор надрешетного продукта и компонентов шихты (6); 7 – барабанный окомкователь; 8 – комплекс отсыпки штабелей кучного выщелачивания (9); 10, 11, 13, 14 – выщелачиваемый штабель с системой сбора, циркуляции и переработки продуктивных растворов; 12 – отработанный штабель кучного выщелачивания; 15-17 – штабели кучного выщелачивания хвостов другого вещественного состава; 18-23 – комплекс утилизации хвостов в выработанном подземном пространстве [104]

Непрерывная высокопроизводительная выемка одним экскаватором обеспечивает возможность конвейерного транспортирования извлекаемого сырья по сортам на два комплекса кучного выщелачивания. Последний предназначен для формирования проницаемых отвалов на основе окомкованных хвостов обогащения и последующего отдельного выщелачивания – цветных металлов из куч, сформированных на основе хвостов серой фракции, благородных металлов из куч на основе буро-жёлтой фракции. Достоинством предложенной технологии является возможность выемки сырья по сортам и организация отдельной переработки в зависимости от вида металлов. К недостаткам следует отнести сложность массового применения столь высокопроизводительной технологии на

хвостохранилищах медно-колчеданных руд Урала, где площадь осушенного участка старогоднего хвостохранилища, например, в пос. Бурибай составляет лишь 20%. С учётом очевидной необходимости оставления предохранительной дамбы между обводнённой и осушенной частями, реальная организация подобного комплекса разработки и кучного выщелачивания представляется в долгосрочной перспективе, после полного осушения, длительного протекания процессов вторичного минералообразования и сегрегации с формированием обнаруженной структуры (рис.1.34).



Рисунок 1.34 – Вид со спутника на Бурибаевское хвостохранилище

Для условий разработки железорудных хвостохранилищ обоснованы эффективные геотехнологии, учитывающие факт неравномерного распределения сырья по влажности. Автором работы [57] подобные объекты характеризуются как «полусухие» хвостохранилища, так как им присуще слабое основание. Также автором отмечено весьма неравномерное распределение содержания ценных компонентов. Более того, в ходе разработки хвостохранилищ зафиксированы явления внезапных обрушений откосов уступов, даже при их высоте менее 10 м. Это влекло аварии и инциденты на производственной площадке, так как экскаваторщик не мог отогнать машину на безопасное расстояние. Происходили сходы экскаваторов с уступов или заиливание хвостами рабочего оборудования. По результатам многолетних лабораторных исследований и натурных наблюдений предложена оригинальная технология, суть которой реализуется по схеме на рис. 1.35.

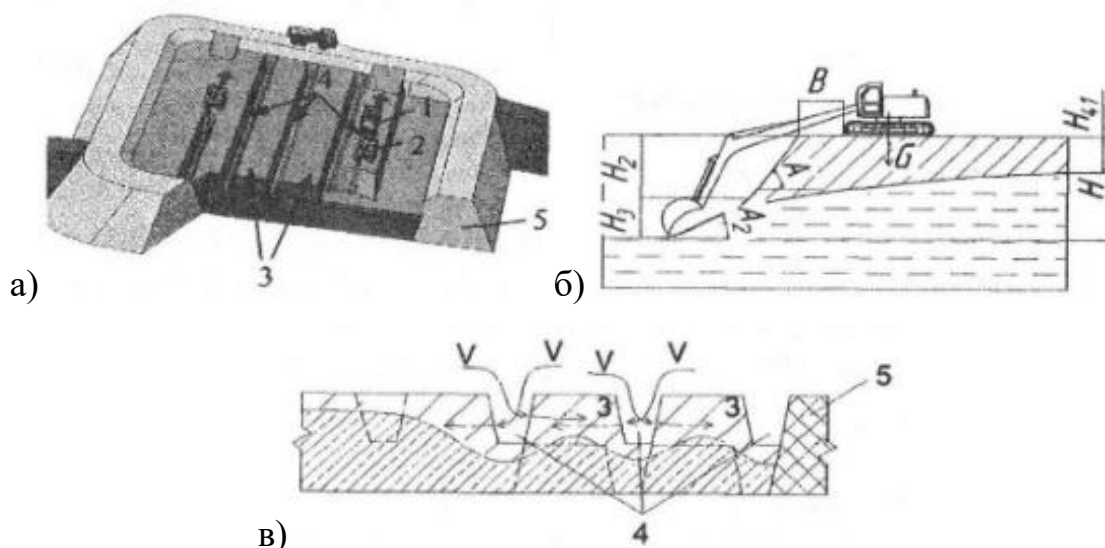


Рисунок 1.35 – Технология разработки «полусухих» хвостохранилищ со слабым основанием: а – общий план; б – параметры технологии в добычном забое; в – поперечный разрез хвостохранилища; 1 – автосамосвал; 2 – выемочно-погрузочное оборудование «обратная лопата»; 3 – готовые к выемке выемочные заходки, сухие железосодержащие хвосты; 4 – проветриваемая траншея; 5 – ограждающая дамба; H – безопасная высота добычного уступа, м; H_2 – высота верхнего уступа, м; H_3 – высота развала сыпучего материала, м; H_{41} – глубина обводнённости, м; A – угол откоса верхнего уступа, град.; A_2 – угол откоса развала сыпучего материала, град.; v – ширина бермы безопасности, м; C – вес выемочно-погрузочного оборудования, Н; V – выветривание и вымораживание

Сущность технологии состоит в опережающем понижении влажности складированных хвостов обогащения с 35 до 21%, обеспечивающей устойчивость основания хвостохранилища, а также откоса обрабатываемого уступа. Подготовка и оконтуривание обрабатываемого участка хвостохранилища и разбивку его на выемочные заходки (3) производят в замерзшем состоянии путем создания проветриваемых траншей (4), созданных с помощью экскавации на ширину ковша выемочно-погрузочного оборудования «обратная лопата» (2), с учётом направления розы ветров, а выемку сухих хвостов производят на всю ширину выемочной заходки (3), равной минимальной ширине проезжей части автотранспорта. Применение данной технологии в условиях Южного Урала затруднено, так как глубина промерзания грунта составляет в среднем 1,7 м. Ниже глубины промерзания хвостохранилище находится в естественном состоянии.

В диссертационной работе [117] предложена классификация технологических схем разработки Жезказганского хвостохранилища. По сути, все технологические схемы направлены на валовую выемку, а выбор средств механизации зависит от влажности сырья. Так, если влажность не превышает 15%, применимы механизированные способы выемки, если влажность выше – гидравлические (табл. 1.1). Выбор средств механизации при этом весьма широк. Для селективной выемки применимы одноковшовые экскаваторы типа прямой или обратной лопаты, а также многоковшовый роторный или цепной экскаваторы. Валовую выемку рекомендовано производить карьерными экскаваторами типа драглайн. Гидравлический способ выемки, применяемый на влажных участках предусматривает, согласно классификации, представленной в табл. 1.1, валовую разработку. Средства механизации в таких схемах – это плавающий земснаряд, либо погружной насос, в том числе с рыхлителем.

Пример реализации технологических схем представлен на рис. 1.36. Типовая горнотехническая система в соответствии с технологической схемой классификации предусматривает извлечение отходов из ложа хвостохранилища с применением одноковшового экскаватора. В соответствии с этой горнотехнической системой, производственная мощность по сырью обеспечивается работой нескольких забоев. Транспортировка сырья до перерабатывающего производства при этом осуществляется автосамосвалами. При необходимости непосредственно в ложе хвостохранилища организуется перегрузочный склад.

Таблица 1.1 – Классификация технологических схем разработки техногенных образований [117]

№ класса	Способ разработки	№ группы	Тип механизации выемочно-погрузочных работ	№ подгруппы	Способ выемки	Характеристика массива и физико-механические свойства техногенного сырья
1	2	3	4	5	6	7
1	Механизированный – «сухой»	1.1	Одноковшовые экскаваторы типа прямой и обратной мехлопаты	1.1.1	Валовый Селективный с возможным сезонным развитием работ на отдельных участках	Массив законсервирован и осушен. Влажность 0 - 15 % Коэффициент сжимаемости $\leq 0,18$ МПа Модуль деформации ≤ 20 МПа Коэффициент сдвига $\geq 0,7$
				1.2.1		
		1.2	Колесные погрузчики	1.2.1	Валовый	
				1.2.2	Селективный	
1.3	Карьерный экскаватор типа драглайн	1.3.1	Валовый			
1.4	Многоковшовый роторный или цепной экскаватор	1.4.1	Валовый			
		1.4.2	Селективный			
1.5	Карьерный комбайн	1.5.1	Валовый			
		1.5.2	Селективный			
2	Гидромеханизированный («мокрый»)	2.1	Плавающий земснаряд	2.1.1	Валовый	Массив под затоплением. Влажность ≥ 15 % Коэффициент сжимаемости $\geq 0,18$ МПа Модуль деформации ≥ 20 МПа
				2.2	Валовый	
				2.3	Валовый	
			Погружной насос с рыхлителем	2.3.1		

Анализ предложенных технологических схем свидетельствует, что они не учитывают доказанный мировой практикой факт неоднородной структуры и

связанные с этим особенности выбора параметров открытой разработки хвостохранилищ. Это вполне естественно, так как автором указано, что «... распределение окисленных форм меди не имеет прямой зависимости как от расположения скважин в плане, так и по глубине, и в среднем составляет – 28,35% (отн.)» [117].

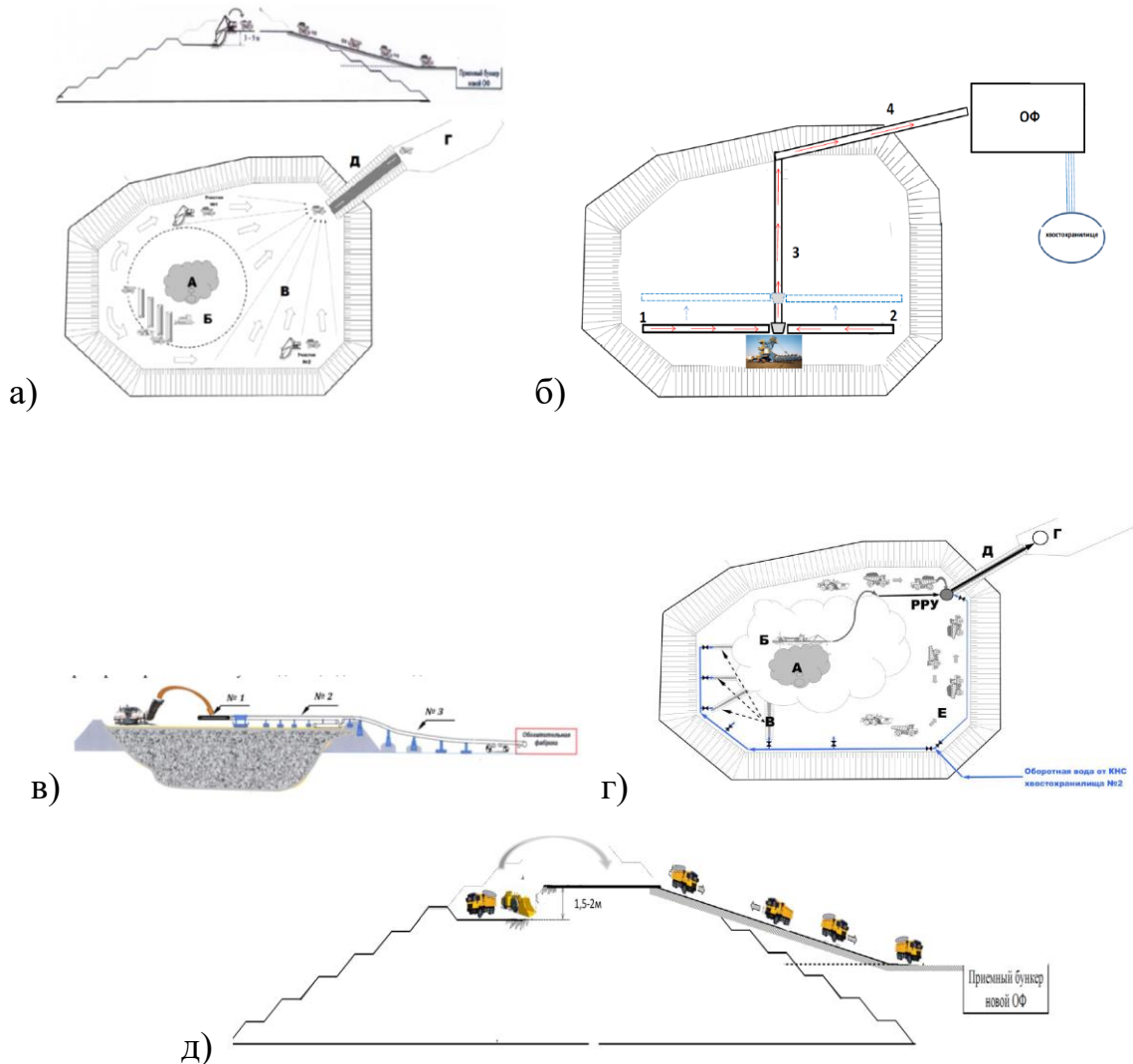


Рисунок 1.36 – Примеры предложенных типовых технологических схем отработки сухих и влажных участков хвостохранилища в соответствии с классификацией: а) схема №1.1; б) схема №1.4; в) схема №1.5; г) схема 2.1; д) схема №1.2

В работе [58] предложена оригинальная технология послойной разработки хвостохранилища, представленного отходами переработки медно-колчеданных руд Сибайской обогатительной фабрики. Технологическая схема предусматривает работу бульдозера с рыхлителем для культивирования бактерий для

последующего биовыщелачивания. Данная технология также не учитывает факт неоднородной структуры техногенных образований. Рассмотренные особенности геотехнологий свидетельствуют о необходимости создания особых режимов выемки сырья и обоснования параметров технологии с включением в перечень геотехнологических процессов специальных операций, позволяющих учесть неоднородную структуру хвостохранилищ и отвалов тонкодисперсного минерального сырья непосредственно в ходе выемки.

Для исключения в будущем неконтролируемого намыва хвостохранилищ с формированием неоднородностей в техногенном образовании в естественных условиях, многими авторами развиваются исследования в области целенаправленного создания техногенных месторождений с заданными характеристиками [63, 64, 73, 103, 107, 118, 119]. Однако, для уже сформированных техногенных образований, каким является экологически опасное Новотроицкое хвостохранилище [108], требуется принятие незамедлительных мер по его разработке, переработке сырья и утилизации конечных отходов, преимущественно в инертном или изолированном состоянии.

1.5 Цели, задачи, методы исследования

В стратегической перспективе лежалые отходы переработки руд обладают высоким промышленным потенциалом, однако воспроизводство минерально-сырьевой базы золота за счёт их переработки предусматривает специфический подход к изучению и оценке благородных металлов в структуре ресурсов золотосодержащих отходов, обусловленный особенностями вещественного состава техногенного сырья, строения и структуры техногенного образования.

Во всём мире крупные золотопромышленные регионы характеризуются наличием острых социально-экономических и экологических проблем, связанных с многолетней историей освоения месторождений благородных металлов и накоплением значительных объёмов техногенного сырья, в котором содержание ценных металлов иногда оказывается выше, чем в рудах текущей добычи. Запасы благородных металлов в старогодних хвостохранилищах золотодобычи действительно велики и исследования, направленные на поиски новых

рациональных подходов к освоению перспективных для повторной переработки техногенных ресурсов с извлечением ценных компонентов, представляют большой научный интерес для всего мирового сообщества.

Одной из причин неблагоприятной экологической обстановки в Южноуральском регионе являются потенциально опасные лежалые отходы переработки золотоносных и золото-мышьяковистых руд предприятий. Большинство отходов золотоизвлекательных фабрик и обжиговых мышьяковистых заводов Урала транспортировались в хранилища в практически сухом состоянии (содержание жидкой фазы не превышало 15%) [111], они накапливались десятками и сотнями лет и со временем высыхали, слёживались под действием остаточной влаги, представляя собой переуплотнённую тонкодисперсную массу. Поэтому в настоящее время такие отвалы, представленные кеком цианирования, огарками, хвостами флотации и амальгамации представляют собой складированные на поверхности сухие насыпи и оказывают негативное воздействие на окружающую среду. Крайне негативное влияние вызывают хвостохранилища на основе отходов обогащения мышьяковистых руд, вмещающих не только флотационные реагенты, но и токсичные минералы (пирит, арсенопирит, блеклые руды, киноварь и т.д.), дополнительно в жидкой фазе отходов золото-мышьяковистых руд может содержаться мышьяк в аморфных и растворённых формах.

Выполненные в 1 главе исследования убедительно доказывают, что при многолетнем хранении отходов переработки золотопромышленного комплекса происходит перераспределение элементов в техногенном образовании с формированием более богатых продуктивных участков, либо высокотоксичных зон, которые необходимо локализовать в ходе очистной выемки. Отсутствие конкретной геологической информации о типе руд, перерабатываемых за время эксплуатации хвостохранилища, объёмах и схеме их складирования или намыва в отвал также является сдерживающим фактором для создания геотехнологий их безопасной разработки, вовлечения техногенного сырья в переработку с последующей безопасной утилизацией и рекультивацией территории. Поэтому

актуальным является вопрос поиска новых подходов к выбору открытой геотехнологии рационального освоения техногенных образований с возможностью своевременного обнаружения скрытых обводнённых зон, участков с повышенным содержанием благородных металлов и/или токсичных элементов для их своевременной локализации и извлечения.

Цель исследования заключается в обосновании параметров рациональной технологии разработки неоднородных по составу, структуре и свойствам техногенных образований, представленных лежалыми отходами переработки золотосодержащих руд, для повышения полноты освоения техногенных ресурсов и решения эколого-социальных проблем золотодобывающих регионов.

Задачи исследования:

- анализ современных средств и методов оценки вещественного состава, строения, структуры техногенных образований как основы для обоснования геотехнологии их эффективного освоения;
- разработка методики комплексного обследования техногенных образований прошлых лет, обеспечивающей получение уточненных сведений о структуре, строении и составе зон минерализации с возможностью построения блочных моделей;
- исследование закономерностей строения, состава и свойств техногенного сырья в толще хвостохранилища, определяющих выбор приоритетного порядка и параметров выемки складированных отходов для их безопасной утилизации с последующей рекультивацией нарушенной территории;
- обоснование параметров геотехнологии разработки техногенных образований, определяющих выбор приоритетного направления ведения открытых горных работ и этапы отработки техногенного объекта;
- разработка рекомендаций по эффективной отработке золотосодержащих хранилищ отходов переработки руд и их технико-экономическая оценка.

Объектом исследования являются техногенные образования, сложенные отходами переработки золотоносных и золото-мышьяковистых руд.

Для решения поставленных в работе задач и достижения цели исследований необходимо применение комплекса методов фундаментальных исследований, направленных на обоснование параметров геотехнологии разработки неоднородных техногенных образований.

Так, применение метода анализа ранее выполненных исследований в области изучения структуры техногенных образований позволяет выявить особенности структуры техногенных объектов и ориентироваться на комплексирование методов геофизической оценки структуры хвостохранилищ и геологической разведки для отбора представительных проб. Обобщение результатов фундаментальных исследований в части выбора технологии добычи и транспортировки лежалых отходов переработки руд золота в зависимости от структуры техногенных образований других видов минерального сырья показало, что необходимо предусматривать дифференцированные подходы к выбору параметров геотехнологии в зависимости от влажности сырья. Анализ горно-геологических условий Новотроицкого месторождения золото-мышьяковистых руд по данным архивной литературы Росгеолфонда позволил оценить условия формирования Новотроицкого хвостохранилища и исходный состав сырья, складированного в него за годы работы обогатительной фабрики.

Аналитические исследования показали, что для выбора приоритетного порядка выемки техногенного сырья в ходе открытой разработки техногенного образования целесообразно использование ГИС для моделирования рельефа хвостохранилища (ArcGIS и QGIS), блочное моделирование отвала золотосодержащих отходов переработки руд с подсчётом накопленных объёмов и запасов золота возможно с применением ГГИС типа Micromine. Однако для этого требуется реализация идеи работы и нахождение условий получения всесторонней информации о хвостохранилище.

Для оценки вещественного состава сырья требуется комплексирование методов химического и оптико-минералогического анализов хвостов под микроскопом Olympus BX41 на базе анализатора «Минерал С7», комплекс

химических анализов минерального сырья и фазовый анализ на дифрактометре XRD 7000, который позволит получить сведения о минеральном составе.

Для обоснования параметров рабочих площадок выемочно-погрузочного и транспортного оборудования, выбора мест заложения автодорог и типа колёсных средств, обоснования предельных и рабочих углов откоса уступов требуется выполнение комплекса исследований физико-механических свойств образцов техногенного грунта при различной влажности, включая определение деформационных показателей при трехосном сжатии, прочностных и физических свойств, согласно действующим государственным стандартам.

Реализация комплекса исследований позволит обосновать параметры рациональной технологии разработки неоднородных по составу, структуре и свойствам техногенных образований, представленных лежалыми отходами переработки золотосодержащих руд, что, в свою очередь, будет способствовать повышению полноты освоения золоторудной провинции Кочкарского рудного поля на Южном Урале и решению эколого-социальных проблем золотодобывающего региона.

ГЛАВА 2. РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКИ НЕОДНОРОДНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА ОСНОВЕ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ РУД

2.1 Концептуальный подход к оценке структуры техногенных образований и неоднородности свойств складированного тонкодисперсного сырья, определяющих параметры открытых горных работ

Исследования по обоснованию перспективных геотехнологий вовлечения в эксплуатацию техногенных образований Южноуральского золотодобывающего региона были начаты в рамках выполнения программы Президиума РАН, Раздел 2 «Фундаментальные основы энергоэффективных технологий отработки и формирования техногенных образований в целях обеспечения перерабатывающих производств минеральным сырьём заданного качества». Золотосодержащие отходы обогащения прошлых лет на Южном Урале являются наиболее привлекательным техногенным минеральным ресурсом, ввиду того, что формирование хвостохранилищ осуществлялось ещё до модернизации фабрики и совершенствования параметров технологических процессов переработки золоторудного сырья.

Геолого-оценочные работы на одном из техногенных объектов г. Пласт – Новотроицком золото-мышьяковистом хвостохранилище – были начаты в июле 2018 г., тогда по сформированной сети 100x100 м было пробурено 4 пилотные вертикальные скважины. По результатам исследования представительных проб шнекового бурения выявлены участки с достаточно высоким для извлечения и последующей переработки содержанием благородных металлов (по некоторым интервалам содержание Au составляло более 1 г/т), что и определило перспективность освоения данного техногенного образования. Установлено, что несмотря на более чем 100-летнюю давность формирования хвостохранилища, отходы переработки руд Новотроицкой фабрики содержат мышьяк, причём в весьма ограниченном количестве по сравнению с его исходной концентрацией в хвостах обогащения перерабатываемых руд (в среднем 0,3%), который, главным образом с пылью и минерализованными водами, выносится на прилегающие сельскохозяйственные территории и городскую агломерацию. Установленный

факт позволил предположить, что при обосновании параметров технологии открытой разработки хвостохранилища в его толще перспективно выделение зон с повышенным и пониженным содержанием металлов с применением геофизических методов исследований. Также одной скважиной в толще хвостохранилища вскрыта обводнённая зона, залегающая на глубине около 7 м. Причём вскрытию этой зоны предшествовало бурение сквозь толщу весьма плотных глинистых пород. После вскрытия обводнённой зоны также наблюдалось повышенное усилие шнека на бурение подстилающей обводнённую зону глинистой пачки.

Установленная в ходе геологической оценки неоднородность строения, структуры старогоднего хвостохранилища, обусловленная неравномерным распределением вещественного состава техногенного сырья, различной степенью консолидации отходов по глубине, а также наличием скрытых в толще сильно обводнённых зон, осложняющих процесс выбуривания материала, предопределила необходимость детальной оценки хвостохранилища на базе комбинации геофизических и геологических методов обследования. Поэтому целью экспедиции в г. Пласт в 2019 году было выполнение аэромагнитной съёмки с применением беспилотных летательных аппаратов мультироторного типа – квадрокоптера «Геоскан 401». Регистрация магнитного поля выполнена квантовым магнитометром Геоскан КМ-Рб с рубидиевым магниточувствительным датчиком с оптической накачкой (рис. 2.1). По результатам проведения испытаний планировалось выделить наиболее перспективные для отработки зоны с повышенным содержанием ценных металлов.

Применение беспилотных систем позволило существенно повысить эффективность магнитных съёмок, в первую очередь, в сложных ландшафтно-морфологических условиях, а также снизить конечную стоимость. Кроме этого, выбранный метод геофизической съёмки с применением беспилотника характеризуется существенно более низким уровнем шумов по отношению к данным магнитосъёмки при пешем передвижении операторов.



Рисунок 2.1 – Применяемый в исследованиях беспилотный летательный аппарат Геоскан-401 и квантовый магнитометр геоскан QM-Rb

По результатам контрольных измерений на тестовом участке средняя квадратическая погрешность наземных измерений составила ± 2.3 нТл, погрешность аэромагнитных измерений с применением БПЛА при высоте магнитометра 50 м составила ± 0.25 нТл (рис. 2.2).

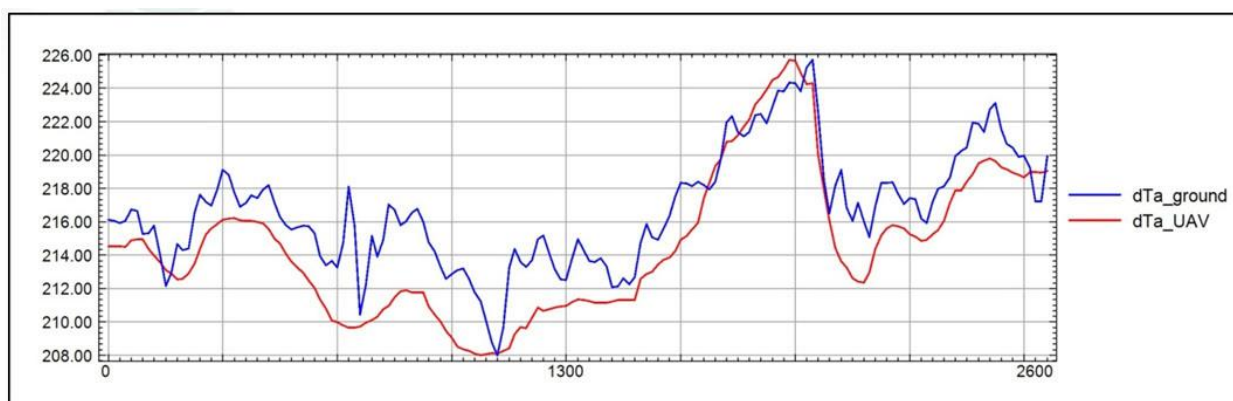


Рисунок 2.2. – Сравнение наземной магнитной съёмки и съёмки с применением БПЛА

Применённый на техногенном объекте квадрокоптер был оснащён системой автоматического управления, инерциальной навигационной системой, двухчастотным навигационным приёмником сигналов GPS/ГЛОНАСС, контроллером управления полезными нагрузками, цифровым каналом связи для передачи командно-телеметрической информации. Управление квадрокоптером осуществляется наземной станцией управления на базе ноутбука с установленным программным обеспечением Геоскан Планер, предназначенным для подготовки полётного задания, контроля и управления полетом, отображения телеметрической информации, поступающей от беспилотника (рис. 2.3).

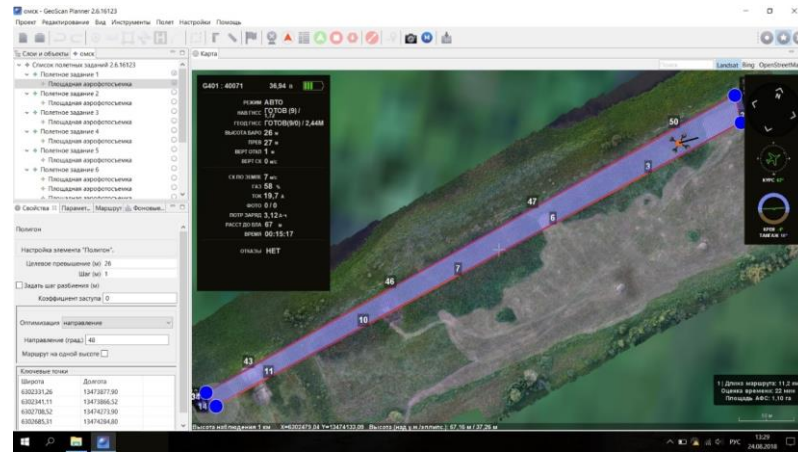


Рисунок 2.3 – Интерфейс программы Геоскан Планер с отображением координат, курса, крена, тангажа и скорости движения квадрокоптера с магнитометром

Характеристика магнитометра Геоскан КМ-Рб представлена в таблице 2.1. На выносной буксируемой штанге, вместе с магнитометром, установлен одночастотный GPS-приёмник с частотой записи данных позиционирования 10 Гц. Данные магнитометра и позиционирование синхронизируются по времени системой GPS. Погрешность плановой привязки составляет не более одного метра и определяется количеством спутников в момент проведения измерений.

Таблица 2.1 – Характеристики квантового магнитометра Геоскан КМ-Рб

Чувствительность	30-50 пТл / $\sqrt{\text{Гц}}$
Диапазон измерения поля	20000 нТл – 100000 нТл
Общая девиационная ошибка	<0,1 нТл
Частота измерений	1000 Гц
Полоса пропускания петли обратной связи	30 Гц
Диапазон допустимых углов датчика	$\pm 45^\circ$
Питание	8-35 В, 10 Вт
Диапазон рабочих температур	от -40 до +60 °С
Масса датчика / электронного блока	120 г / 300 г

Фактическая траектория полета БПЛА с магнитометром над хвостохранилищем приведена на рис. 2.4 а, на нём красными линиями представлены разработанные маршруты. Заверочная линия проходит по диагонали над хвостохранилищем. Серые линии – фактически выполненные маршруты беспилотника с магнитометром над хвостохранилищем с учётом скорости и направления ветра на день съёмки и механических отклонений.

В результате проведения аэромагнитной съёмки хвостохранилища были выявлены аномалии, характеризующиеся повышенным содержанием металлосодержащей составляющей. Необходимо отметить, что длительная консервация хвостохранилища Новотроицкой фабрики и непрогнозируемые инородные включения, например, в виде железобетонных блоков от разрушенных строений обогатительной фабрики, расположенных рядом, могли повлиять на результаты геофизической съёмки [95, 96]. Однако закономерный характер распределения установленных неоднородностей по периферии хвостохранилища позволяет свидетельствовать о сегрегации тяжёлой и легкой фракций отходов переработки руд в теле техногенного образования (рис.2.4, б).

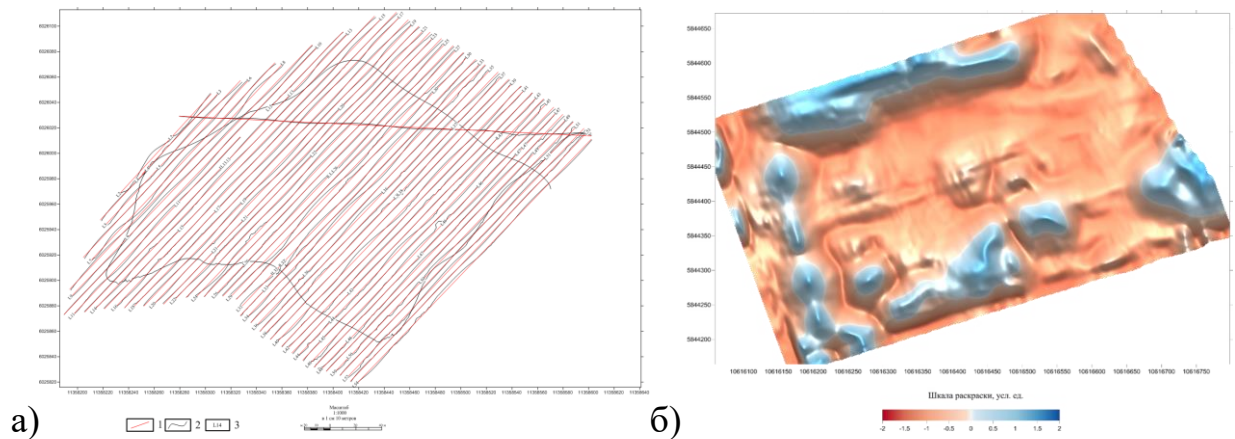


Рисунок 2.4 – Фактическая траектория полета квадрокоптера с магнитометром (а) и выявленные аномалии магнитного поля, позволяющие судить о неоднородности структуры Новотроицкого хвостохранилища (б)

Таким образом, выполненная аэромагнитная съёмка показала неоднородность строения и структуры техногенного золотосодержащего объекта с возможностью выявления слабоамплитудных магнитных аномалий в пределах хвостохранилища, которые необходимо учитывать при выборе параметров открытой геотехнологии направлений дальнейшего использования извлекаемого минерального сырья. С учётом выявленных аномалий по результатам аэромагнитной съёмки проведено сгущение сети скважин на флангах и в центральной части хвостохранилища: заложены профили №5, 6, 7 по восточной аномальной зоне для скважин №7, 12, 13 и по южной – сформированной скважинами №5-11, 14 (рис. 2.5).

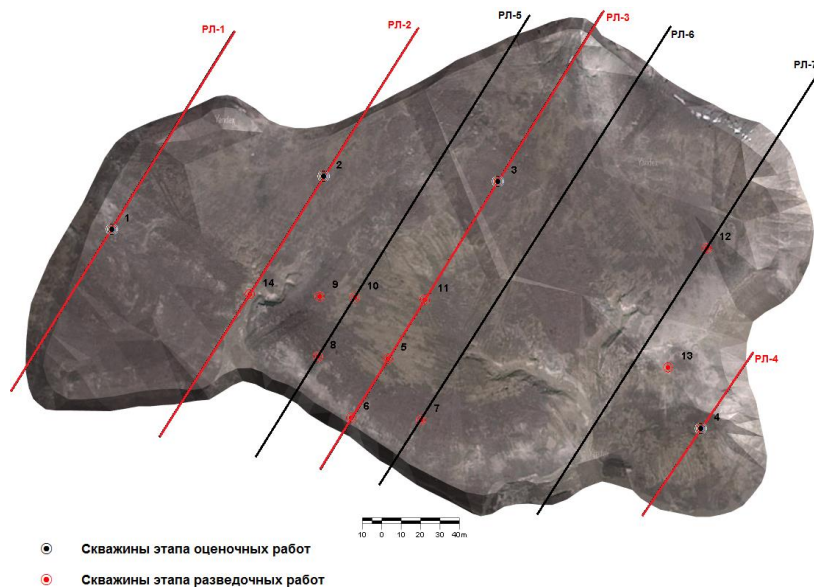


Рисунок 2.5 – Скорректированная разведочная сеть с учётом возможности беспрепятственного подъезда горной техники

Анализ результатов предварительного бурения по оценке техногенного образования подтвердил, что техногенные образования золотодобычи, сложенные тонкодисперсным сырьём, являются крайне неоднородными по структуре и распределению вещественного состава сырья, поэтому действительного «... опробование хвостохранилищ при их разведке требует создания специальной техники или разработки геофизических методов дистанционного зондирования» [62]. Оценка деталей внутреннего строения и структуры техногенных объектов существенно затруднена из-за невозможности их визуального обследования, ввиду того, что извлекаемый материал при спуско-подъёмных операциях активно перемешивается на всём интервале бурения, отсюда, для достоверной оценки распределения вещественного состава сырья требуется точечный отбор проб с точной привязкой координаты места отбора из толщи хвостохранилища.

Поэтому в полевых условиях для визуального наблюдения строения, структуры хвостохранилищ и детального опробования различных зон минерализации золотосодержащих отходов переработки руд был применён принципиально новый способ опережающей оценки структуры неоднородных техногенных объектов, сложенных тонкодисперсным сырьём. Так как в ходе бурения установлен факт высокой устойчивости стенок скважин на протяжении

длительного времени, даже в период сильных осадков, была сформулирована идея оценки структуры неоднородных техногенных образований с помощью видеоэндоскопа, что позволило отснять структуру массива по глубине, оценить степень неоднородности и размеры вскрытых в толще техногенного образования не сдренированных после вскрытия обводнённых зон, а также участков, сложенных материалом повышенной текучести (деформации стенок скважин, требующие обсадки участка).

В ходе исследования была сформулирована и реализована идея, а также разработан способ опережающей оценки структуры техногенного образования, заключающийся в следующем: в пробурённую скважину диаметром 108 мм погружается промышленный видеоэндоскоп для визуального обследования стенок скважины и устройство для опробования различных по составу и свойствам зон выявленной неоднородности на интересующем интервале бурения. Данный способ обследования техногенных образований позволил расширить диапазон исследовательских возможностей при геологической оценке, а также обеспечил получение достоверной информации о строении и структуре хвостохранилищ, основанной на актуальных уточняющих сведениях о распределении состава, свойств сырья в техногенном образовании.

В ходе визуального обследования строения хвостохранилища выбиралась область стенки скважины, представляющая интерес для оценки вещественного состава, свойств сырья, и фиксировалась координата выбранного места отбора техногенного материала. Устройство для механического отбора техногенного сырья содержало закреплённую на тросах пробоприёмную камеру с нанесёнными отметками по глубине и распорный механизм с двумя лезвиями, выполненными с возможностью вращения вокруг своей оси для выбуривания тонкодисперсного материала и сбора материала в пробоприёмник. Принцип устройства прототипа для обследования техногенных образований подробно представлен на схеме на рисунке 2.6.

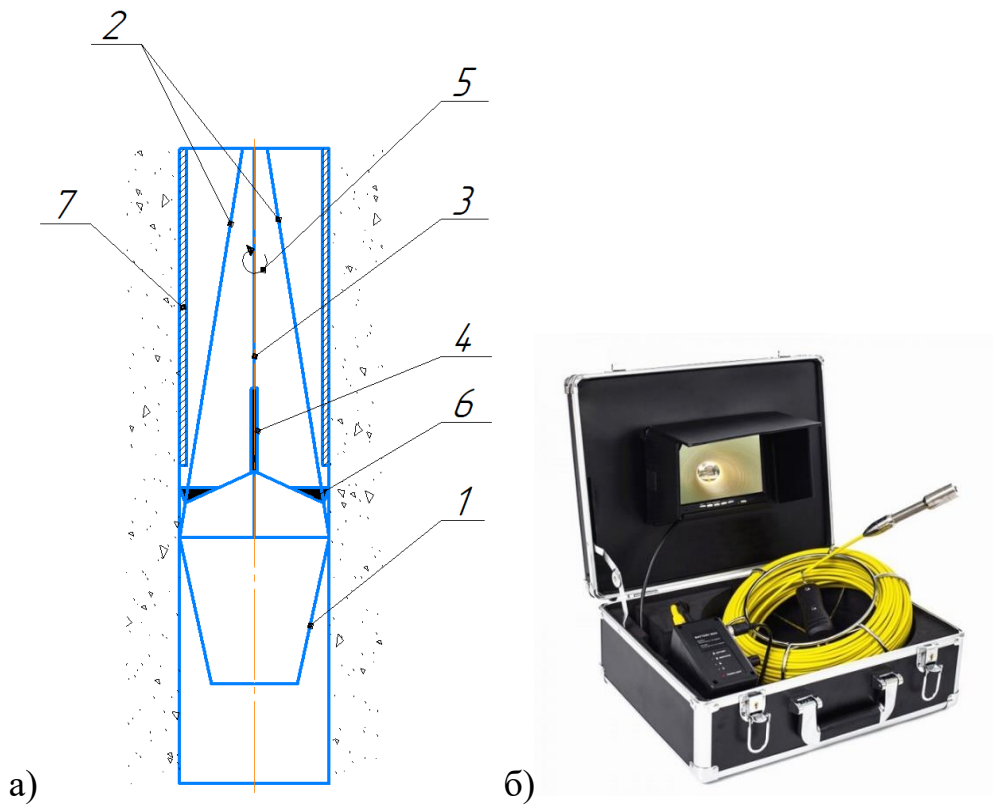


Рисунок 2.6 – Схема прототипа устройства для геологического обследования осушённых участков хвостохранилищ и точечного отбора техногенного сырья (а) и промышленный видеоэндоскоп для визуальной оценки техногенного объекта (б): 1 – пробоприёмное устройство; 2 – направляющие фиксированной длины для спуско-подъёмных операций в скважине; 3 – центrovочный трос с закреплённой видеокамерой; 4 – видеокамера; 5 – полая трубка с насаженными лезвиями (б), обеспечивающая их вращение на центrovочном тросе; 7 – обсадная труба

Прототип устройства апробирован в полевых условиях при исследовании структуры Новотроицкого хвостохранилища и по результатам исследований структуры и свойств отходов переработки руд получен патент на изобретение [91]. В случае вскрытия оценочной скважиной участка с повышенной обводнённостью техногенного сырья его необходимо изолировать обсадными трубами в целях недопущения залечивая самой выработки, выходящим из её стенок тонкодисперсным текучим материалом отходов переработки руд. Апробация прототипа устройства для оценки структуры и опробования техногенного сырья представлена на рисунке 2.7.

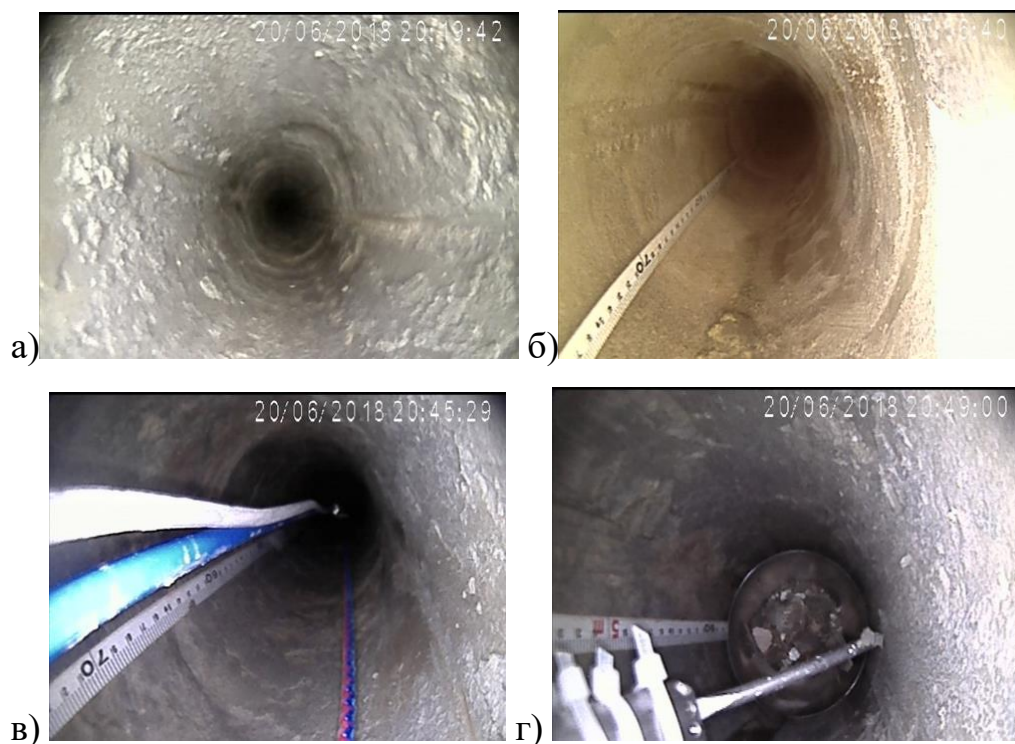


Рисунок 2.7 – Результаты полевых испытаний способа визуальной оценки строения и структуры техногенного образования и отбора сырья в ходе оценочных работ на Новотроицком хвостохранилище: а) область повышенной сульфидизации и полость в толще массива в результате вскрытия небольшой обводнённой зоны; б) однородный участок, представленный песчанистыми фракциями; в) погружение пробоприёмного устройства; г) выбуривание материала из стенки скважины и отобранная проба в пробоприёмной камере

Таким образом, при точечном отборе материала повышается достоверность геологической оценки хвостохранилищ, при которой осуществляется контроль качества опробования при различных видах бурения отходов переработки золотосодержащих руд, что позволяет с детальной точностью моделировать распределение в хвостохранилище зон различной рудной минерализации, обогащённой ценными и высокотоксичными металлами, выявлять скрытые обводнённые участки с возможностью их своевременной локализации и предварительного осушения при разработке техногенного образования.

Безопасность получения информации о структуре хвостохранилищ достигается за счёт того, что пробы из стенки скважин отбираются без непосредственного контакта человека с агрессивной, в том числе химически опасной средой. Особенно это актуально при изучении старогодних отходов золотодобывающих предприятий, насыщенных агрессивными реагентами с

остаточным количеством цианидов, а также продуктов их разложения и содержащих вредные примеси As, Hg, Se, Te, Bi и других тяжёлых металлов.

Применение способа позволило осуществить полноценную оценку структуры и отобрать пробы по глубине 14 скважин. Расстояние между разведочными линиями составило 30-50 м. В ходе оценочного бурения отходы переработки золотосодержащих руд, сложенные глинистым переувлажнённым материалом, извлекались в зависимости от факта и вида выявленной неоднородности, а также систематически через каждые 2 метра.





В полевых условиях при бурении техногенного образования наглядно установлена явная изменчивость литологического состава сырья. Как правило, материал в верхней части отвала первые 2-6 м представлен рыхлыми средне-, мелкозернистыми песчаными фракциями, необводнёнными или малообводнёнными, ниже по разрезу отходы переработки золотосодержащих руд сложены тонкодисперсными, порой сильно обводнёнными, высокоглинистыми и сложно дезинтегрированными минеральными разностями.

В строении хвостохранилища прослеживается чёткая горизонтальная слоистость, обусловленная перераспределением вещественного состава и свойств техногенных отходов переработки руд золота. Как правило, материал в верхней части техногенного образования представлен рыхлыми малообводнёнными разностями песчаной фракции, ниже по разрезу всё чаще наблюдаются сильно обводнённые участки, сложенные тонкодисперсным, сложно дезинтегрированным сырьём. Неоднородность состава и свойств золотосодержащих отходов переработки золото-мышьяковистых руд с глубиной в представлена в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Литохимическая колонка техногенного сырья Новотроицкого хвостохранилища (на примере оценочной скважины №4)

Литология	Интервал опробования, м	Краткая характеристика техногенного сырья
1	2	3
	0-2	<p>Разности серо-жёлтого цвета, материал довольно равномерной крупности, легко дезинтегрируется на более мелкие частицы при высыхании. Материал не связный, в мокром виде обладает некой пластичностью, словно с примесью глины.</p> <p>Au= 0,12 г/т, Ag=1,2 г/т, As=0,177 %.</p>
	4-6	<p>Разности тёмно-серого цвета (внешне похожи на колчеданные хвосты). Материал очень пластичный, сильно обводнённый, словно глина, довольно прочные агрегаты. При высыхании дезинтегрируется на более мелкие частицы.</p> <p>Au= 0,6 г/т, Ag=3 г/т, As=0,343 %.</p>
	6-8	<p>Разности тёмно-серого (внешне похожи на колчеданные хвосты) цвета. Связные, довольно обводнённые, глинистые разности. Материал при высыхании довольно просто дезинтегрируется.</p> <p>Au= 0,57 г/т, Ag=3,1 г/т, As=0,351 %.</p>
	8-10	<p>Разности тёмно-серого (внешне похожи на колчеданные хвосты) и светло-жёлтого цвета примерно в одинаковом соотношении. Связные, обводнённые, с примесью глинистых составляющих.</p> <p>Au= 0,55 г/т, Ag=3,5 г/т, As=0,327 %.</p>
	10-12	<p>Разности тёмно-серого цвета (внешне похожи на колчеданные хвосты) с примесью светлых частиц, материал плохо дезинтегрируется на более мелкие частицы при высыхании.</p> <p>Au= 0,31 г/т, Ag=2,9 г/т, As=0,292 %.</p>

Продолжение таблицы 2.2

1	2	3
	12-14	<p>Разности тёмно-серого цвета (внешне похожи на колчеданные хвосты), материал довольно обводнённый, плохо дезинтегрируется на более мелкие частицы при высыхании.</p> <p>Au= 0,88 г/т, Ag=4,6 г/т, As=0,557 %.</p>
	14-16	<p>Разности тёмно-серого цвета (внешне похожи на колчеданные хвосты), материал довольно обводнённый, глинистый, при высыхании превращается в весьма твёрдый консолидированный агрегат. Очень сложно извлекался со скважины, и проба долго сохла.</p> <p>Au= 0,9 г/т, Ag=2 г/т, As=0,473 %.</p>
	16-18	<p>Разности тёмно-серого (внешне похожи на колчеданные хвосты). Белого цвета, как известь. Хвосты довольно обводнённые, обладают высоким сцеплением, имеется глинистая составляющая, при высыхании легко дезинтегрируется.</p> <p>Au= 0,5 г/т, Ag=1 г/т, As=0,227 %.</p>
	Забой	<p>Разности светло-серого (внешне похожи на колчеданные хвосты) цвета с примесью белых включений, материал довольно обводнённый, высокое сцепление, при высыхании легко дезинтегрируется.</p> <p>Au= 0,33 г/т, Ag=1,4 г/т, As=0,281 %.</p>

Геологическая оценка на старогоднем золоторудном хвостохранилище показала, что выбуривание материала шнеком не позволяет получить детальные сведения о строении и структуре техногенного образования, распределении вещественного состава сырья с привязкой по глубине, кроме того, локализация в теле техногенного образования участков, сложенных тонкодисперсными сильно обводнёнными отходами переработки руд, осложняет разработку хвостохранилища и требует включения геотехнологические процессы опережающей оценки структуры массива и свойств складированного сырья. Это

позволит осуществить выбор приоритетного порядка выемки, своевременно осушать обводнённые участки, предупреждать поступление материала со свойствами, препятствующими последующей переработке отходов.

Таким образом, на разрабатываемых участках техногенного образования, где длительное время обеспечивается устойчивость стенок пробурённых в ходе геологической оценки скважин, необходимо вести по мере отработки техногенного объекта опережающее бурение и непосредственно в цикле добычи осуществлять видеоэндоскопическое обследование стенок скважин с опробованием материала из выявленных неоднородностей и оценкой его вещественного состава, свойств и структуры техногенного сырья. Выполненными исследованиями доказано, что выбор направления развития фронта первоочередной выемки и технических средств при разработке техногенных золотосодержащих образований должен базироваться на получении уточняющих сведений о строении, структуре отвала, позволяющих своевременно обнаруживать скрытые обводнённые зоны или участки с повышенным содержанием ценных и/или высокотоксичных металлов.

2.2 Классификация технологических схем открытой разработки неоднородных техногенных образований, представленных отходами переработки золотосодержащих руд

Выполненные исследования по оценке строения и структуры старогоднего техногенного образования показали, что выбор направления развития фронта выемки при разработке неоднородных техногенных объектов золотодобычи должен осуществляться в зависимости от необходимости первоочередной отработки обогащённых благородными металлами зон для быстрой окупаемости вложений, требований к своевременной локализации и ликвидации скрытых обводнённых зон для исключения прорыва переувлажнённых отходов при отработке участка, а также зон, характеризующихся повышенным содержанием токсичных металлов. В связи с тем, что тип установленной структурной неоднородности свойств и состава техногенного сырья напрямую зависит от места её локализации в объёме хвостохранилища, подходы к технологии освоения

неоднородных участков будут отличаться по условиям выбора способа добычи и транспортирования сырья, средств механизации и проведению комплекса подготовительных работ по предварительному осушению рабочей зоны техногенного образования.

С учётом полученных выводов разработана классификация выбора технологии выемки сырья при открытой разработке техногенного образования в зависимости от типа и локализации установленной неоднородности состава, свойств, строения и структуры хвостохранилища (табл. 2.3).

В соответствии с разработанной классификацией для первого класса выбора технологии разработки техногенных образований на осушённых по всей глубине отвала участках с равномерным вещественным составом и свойствами техногенного сырья, характеризующихся отсутствием обогащённых ценным металлами зон или участков с повышенным содержанием высокотоксичных элементов, предусмотрена валовая выемка на всю мощность уступа. Отработка площадки рабочего забоя хвостохранилища представлена на технологической схеме на рисунке 2.8.

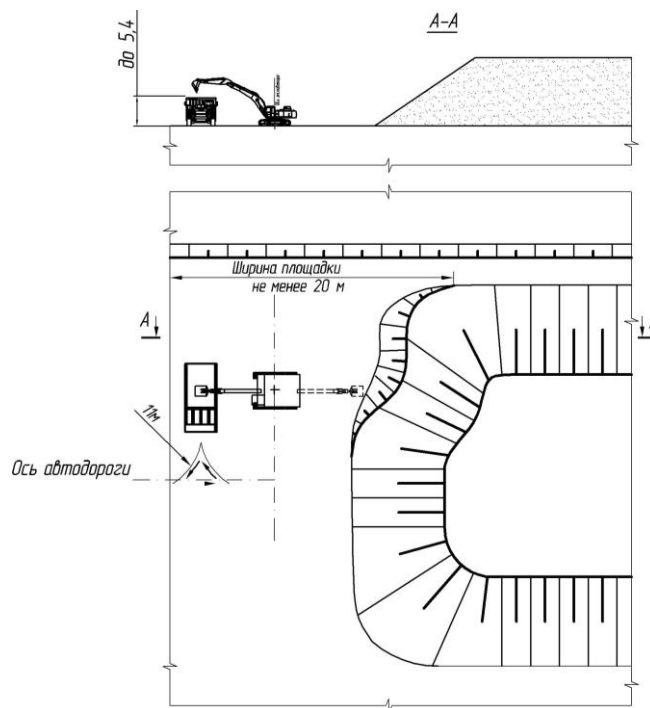


Рисунок 2.8 – Технологическая схема работы валовой выемки техногенного сырья по всей высоте отвала без учёта строения и структуры хвостохранилища

Таблица 2.3 – Предложенная классификация выбора способа выемки сырья при разработке хвостохранилищ с учётом установленной неоднородности состава, свойств, строения и структуры техногенного образования

№ класса	Способ выемки техногенного сырья	№ группы	Факторы, определяющие технологию выемки техногенного сырья	№ подгруппы	Локализация неоднородностей в техногенном образовании	Принцип выбора направления выемки при открытой разработке хвостохранилища
1	2	3	4	5	6	7
1	Валовая выемка	1.1	Равномерный вещественный состав и свойства техногенного сырья, отсутствие опасных зон по условиям выбора технологии открытой разработки	—	Отсутствует	Выемка сырья предусматривается по периферии техногенного образования, аналогично веерной сплошной рассредоточенной системе разработки. В случае превышения высоты рабочего уступа высоту черпания выемочного оборудования предусматривается деление на подступы.
2	Комбинация способов выемки, предусматривающая выбор приоритетного направления ведения открытых горных работ и средств механизации с подготовкой рабочего забоя перед извлечением техногенных отходов	2.1	Наличие обогащенных по содержанию ценных компонентов зон	2.1.1	Вблизи поверхности	Первоочередное снятие обогащённого слоя для быстрой окупаемости затрат или отгрузка на склады для последующей стабилизации качества сырья подшихтовкой
				2.1.2	В толще техногенного объекта	Снятие непродуктивного слоя с отгрузкой на специализированные площадки. Слоевая выемка продуктивного горизонта извлекается и транспортируется отдельно от остальной части разрабатываемого техногенного объекта
				2.1.3	В основании техногенного объекта	Сплошная выемка уступами до границ продуктивной залежи с ее отработкой слоями для последующего транспортирования сырья до усреднительного склада обогатительной фабрики

1	2	3	4	5	6	7
2	Комбинация способов выемки, предусматривающая выбор приоритетного направления ведения открытых горных работ и средств механизации с подготовкой рабочего забоя перед извлечением техногенных отходов	2.2	Наличие обводнённых зон	2.2.1	Вблизи поверхности	Работа на осушённых участках хвостохранилища с подготовкой следующей рабочей зоны путем проходки опережающих траншей для организации сбора поступающих осадков
				2.2.2	В толще техногенного объекта	Отработка участка до безопасных границ обводнённой зоны, обусловленных наличием и достаточной мощностью защитного слоя для обеспечения безопасного размещения горного и транспортного оборудования на поверхности рабочего уступа с её последующим осушением и созданием условий для недопущения дальнейшего подтопления площадки рабочей зоны
				2.2.3	В основании техногенного объекта	Подработка уступа до безопасных границ обводнённой зоны с размещением выемочной погрузочной техники на верхней площадке рабочей зоны с её последующим осушением и дальнейшей обработкой забоя
		2.3	Наличие опасных по содержанию высокотоксичных элементов зон	2.3.1	Вблизи поверхности	Первоочередное снятие высокотоксичного поверхностного слоя для его переработки с извлечением попутных компонентов и последующей его утилизацией в специализированные хранилища после обезвреживания высокотоксичных отходов
				2.3.2	В толще техногенного объекта	Отработка техногенного образования слоями до границ установленной неоднородности, её отдельная выемка с целью дезактивации и утилизации высокотоксичных металлов
				2.3.3	В основании техногенного объекта	Отработка уступами до границ высокоопасной зоны с целью извлечения попутных компонентов, последующего обезвреживания токсичных компонентов и утилизации отходов в гидроизолированных хранилищах

Для второго класса выбор способов, направления фронта выемки отходов переработки руд, а также средств механизации зависит от факта установленного вида неоднородности строения и структуры техногенного объекта.

В случае обнаружения на обрабатываемом участке хвостохранилища обогащённых по содержанию ценных компонентов продуктивных зон, локализованных вблизи дневной поверхности, предусматривается выемка сырья с первоочередным снятием обогащённого слоя для быстрой окупаемости затрат или отгрузкой на склады для последующей стабилизации качества сырья подшихтовкой. Разработка участка в случае локализации продуктивной зоны вблизи поверхности отвала предусматривается по технологическим схемам, представленным на рисунке 2.9.

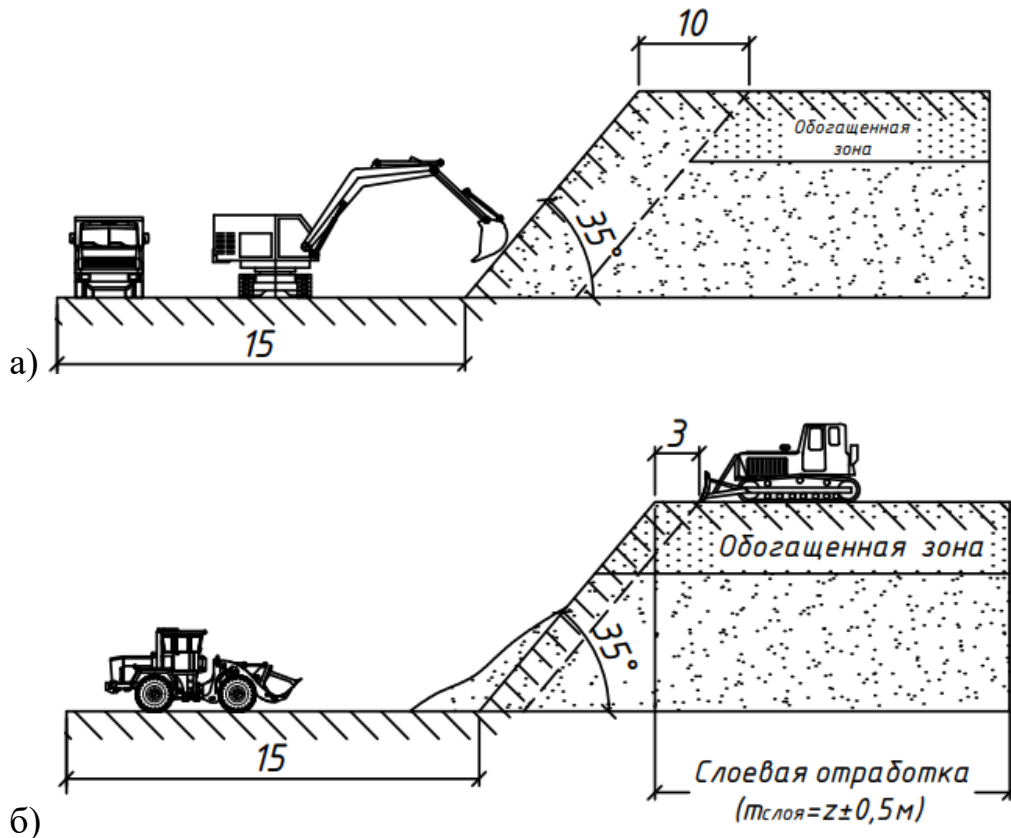


Рисунок 2.9 – Схема разработки участка неоднородного техногенного образования, предусматривающая отработку уступа до границ продуктивного горизонта (а) с последующим снятием обогащённого слоя (б)

При условии локализации обогащённого участка в толще техногенного объекта осуществляется слоевая выемка непродуктивного слоя с целью его

отгрузки на специализированные площадки, до границ зоны, обогащённой ценными металлами, которая также извлекается отдельно от остальной части обрабатываемого участка, залегающей в основании хвостохранилища. При картировании хвостохранилища и локализации продуктивного участка с промышленными содержаниями благородных металлов, залегающего в основании техногенного образования, предусматривается сплошная выемка до границ продуктивной залежи с её разработкой слоями для последующего транспортирования сырья до усреднительного склада обогатительной фабрики. Разработка участка в таком случае предусматривается по технологическим схемам на рисунке 2.10.

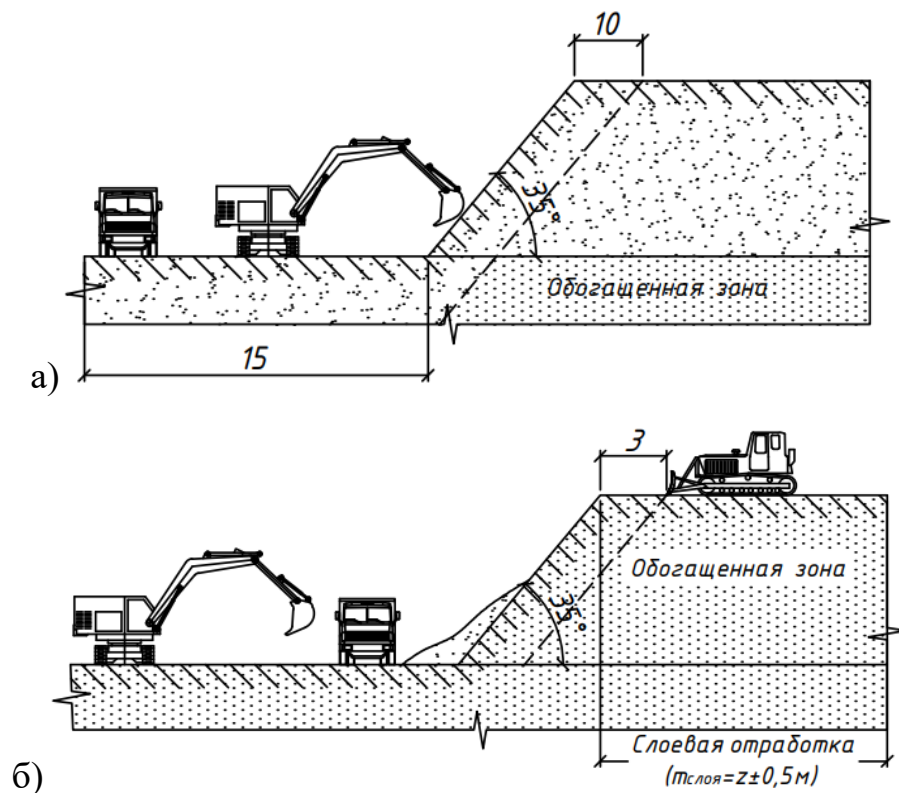


Рисунок 2.10 – Схема разработки участка неоднородного техногенного образования, предусматривающая сплошную выемку сырья по высоте уступа до границ обогащённой зоны (а) с последующей слоистой обработкой продуктивного горизонта (б)

При наличии прудковой зоны на поверхности хвостохранилища рассматриваемый участок открытых горных работ разрабатывается по технологической схеме на рисунке 2.11 при условии подготовки площадки

рабочей зоны путём проходки дренажных канав и/или траншей для организации сбора поступающих осадков.

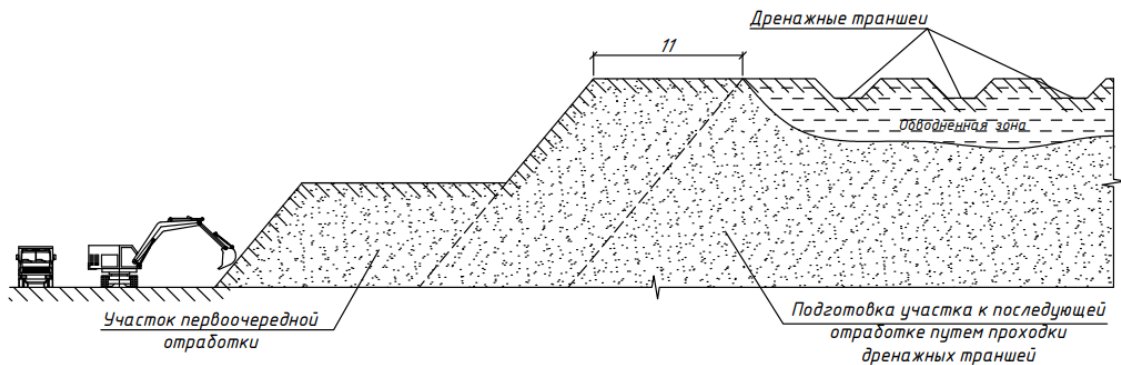


Рисунок 2.11 – Принципиальная технологическая схема разработки хвостохранилища вблизи прудковой зоны, предусматривающая порядок отработки техногенного объекта

При локализации обводнённого горизонта в толще хвостохранилища отработка участка техногенного образования осуществляется до безопасных границ обводнённой зоны, обусловленных наличием и достаточной мощностью защитного слоя для обеспечения безопасного размещения горного и транспортного оборудования на поверхности рабочего уступа, с её последующим осушением и созданием условий для недопущения дальнейшего подтопления площадки рабочей зоны. Выемка техногенного золотоносного сырья в таком случае характеризуется технологической схемой на рисунке 2.12.

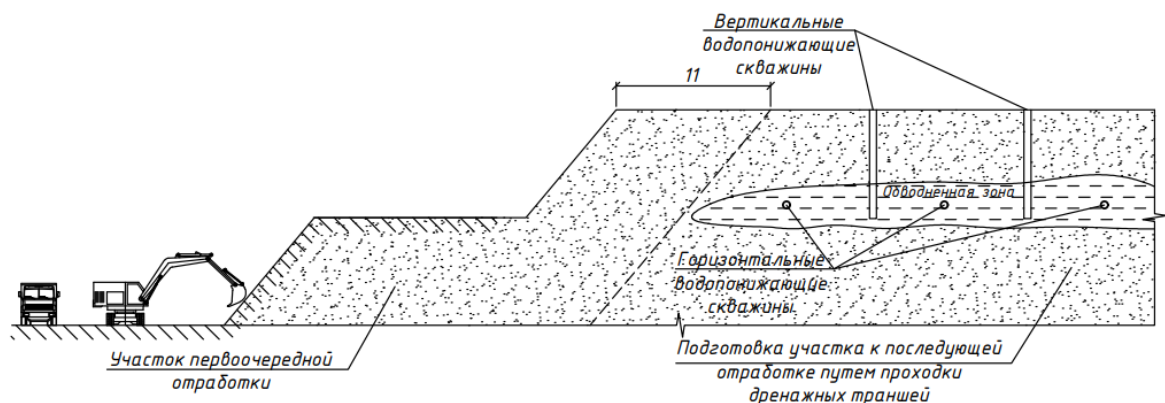


Рисунок 2.12 – Принципиальная технологическая схема разработки хвостохранилища с локализацией обводнённой зоны в толще хранилища отходов переработки руд, предусматривающая подготовку следующего участка отработки

В случае локализации обводнённой зоны в основании техногенного образования выемка золотосодержащего сырья осуществляется по технологической схеме на рисунке 2.13 и предусматривает подработку уступа до безопасных границ обводнённой зоны с размещением выемочно-погрузочной техники на верхней площадке рабочей зоны, с её последующим осушением и дальнейшей отработкой рабочего забоя техногенного отвала.

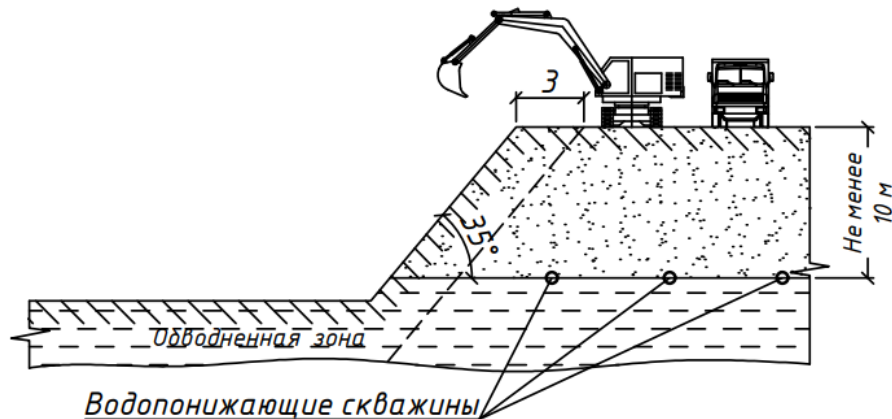


Рисунок 2.13 – Технологическая схема разработки обводнённого участка техногенного образования, предусматривающая предварительное осушение участка по мере выемки сырья экскаваторами с верхним черпанием и верхней погрузкой

Наличие обогащённых по содержанию высокотоксичных элементов зон, локализованных вблизи поверхности техногенного образования, предусматривает снятие высокотоксичного поверхностного слоя с возможностью комплексной переработки сырья с переводом высокотоксичных компонентов в товарную продукцию и последующей утилизацией после обезвреживания в гидроизолированных специализированных хранилищах. Технология освоения участка хвостохранилища с повышенным содержанием высокотоксичных металлов в таком случае предусматривает организацию мероприятий по снижению пыления, предусматривающих орошение рабочего забоя и изоляцию сырья брезентом при погрузке и транспортировании в автосамосвалы. При локализации в толще хвостохранилища неоднородной зоны, обусловленной наличием опасных по содержанию высокотоксичных металлов, выемка сырья проводится слоями до границ установленной неоднородности, далее

осуществляется её раздельная выемка с дальнейшей обработкой техногенного образования по всей высоте рабочего забоя. В случае локализации зоны, обогащённой высокотоксичными компонентами, в основании отвала, разработка участка хвостохранилища предусматривает выемку сырья с разделением на уступы до границ опасной зоны, её дальнейшим извлечением из отвала и утилизацией высокотоксичных отходов в гидроизолированных хранилищах после комплексной переработки техногенного сырья (рис.2.14).

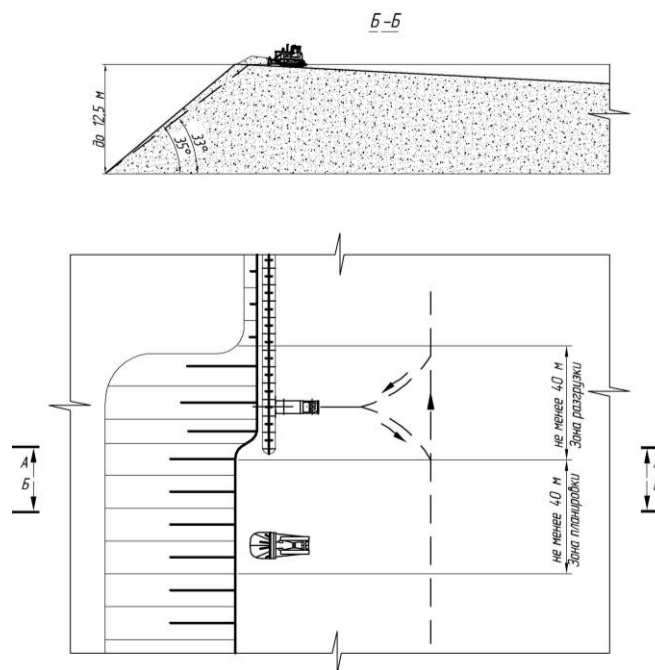


Рисунок 2.14 – Технологическая схема складирования пород для последующей дезактивации высокотоксичных отходов переработки руд

В целом, выемка техногенного сырья проводится по аналогичным технологическим схемам, представленным на рисунках 2.9, 2.10. Отличие состоит в соблюдении требований к минимизации пыления при их погрузке и транспортировании высокотоксичных отходов для последующей дезактивации и утилизации токсичных элементов.

Предложенный технологический процесс опережающей оценки структуры и свойств техногенных образований позволил сформулировать вывод, что выбор направления развития фронта выемки при разработке неоднородных техногенных образований золотосодержащего сырья осуществляется в зависимости от необходимости первоочередной обработки обогащённых благородными

металлами зон для эффективного управления качеством извлекаемого сырья, исключения прорыва пульпы из скрытых обводнённых зон, а также требований к локализации участков, характеризующихся повышенным содержанием токсичных элементов.

2.3 Методика исследований вещественного состава хвостов для выбора параметров открытой разработки неоднородных техногенных образований

В целях установления закономерностей распределения ценных металлов хвостохранилище, выбора приоритетного порядка отработки и обоснования параметров открытой разработки техногенного объекта проведены комплексные исследования химического, минерального и гранулометрического составов отобранных отходов обогащения золотосодержащих руд.

Химический состав рядовых проб лежалых отходов обогащения руд на определение Au, Ag и Cu исследовался в аналитической лаборатории АО «ЮГК» методами пробирного и атомно-абсорбционного анализа по сертифицированным методикам определения содержания благородных металлов НСАМ №505-Х и МА ИАЦ-44/01.00057//2012 и меди – МА ИАЦ-49/01.00057/2013. Оценка содержания попутных компонентов (в количестве 51 элемента) проводилась по 20 пробам в сертифицированной лаборатории Stewart Geochemical and Assay методами атомно-эмиссионной спектроскопии и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой после мультикислотного и царсководочного разложения.

Согласно методике подготовки проб к лабораторным исследованиям, рядовые пробы высушивались в сушильных шкафах при температуре 110⁰С. Образцы перемешивали методом кольца и конуса и перекачиванием. Перемешивание осуществлялось способом трехкратного пересыпания пробы из кольца на конус и наоборот. Перекачивание применялось для проб массой в несколько килограммов, размещённых на клеёнке. При этом проба многократно перекачивалась при подъёме углов клеёнки. Для исключения сегрегации хвостов с образованием комков применялось просеивание и перетирание, для этого пробу помещали на сито с заведомо большими, чем крупность материала, отверстиями,

и просеивали пробу на клеёнку. Данную операцию совмещали с растиранием на сите комков и корочек, возникающих при сушке пробы. Сокращение проб до требуемой контрольной массы проводилось методом квартования. В результате сокращения отобранных проб получены контрольные представительные пробы массой 300 г, дубликаты которых хранятся в лаборатории АО «ЮГК».

Для определения физико-химических показателей среды отходов обогащения руд отбор образцов проводился в герметично закрывающиеся zip-пакеты, упакованные в плёнку, для сохранения природной влажности отобранного материала. В целях исследований технологических параметров переработки техногенного золотосодержащего сырья с извлечением благородных металлов хвостов была подготовлена усреднённая технологическая проба массой 500 кг.

Комплексные оптико-минералогические исследования состава отходов переработки руд осуществлялись на базе рекомендаций ФГБУ ВИМС методик №31 «Виды и последовательность минералогических исследований для обеспечения технологических работ», № 162 «Оптико-минералогический анализ шлиховых и дроблённых проб», №194 «Минераграфическое изучение руд». Минералогический анализ складированных в Новотроицком хвостохранилище отходов переработки руд выполнялся на микроскопе Olympus BX 51 с применением программного комплекса по анализу изображений «Минерал С7».

Подготовка образцов к минералогическим исследованиям состояла в обесшламливании пробы в воде через сито -0,044 мм, последующем фракционировании «мокрым» способом зернистой составляющей хвостов переработки руд золота на классы крупности: >2,5 мм; -2,5+1 мм; -1+0,25 мм; -0,25+0,1 мм; -0,1+0,071 мм; -0,071+0,044 мм и делении полученных классов крупности в бромформе. На базе полученных узких диапазонов классов крупности отходов переработки золоторудного сырья формировались полированные образцы на основе эпоксидной смолы для определения их минерального состава, проведения анализа морфологии свободных зёрен и сростков, выявления особенностей взаиморасположения минеральных агрегатов,

их количественного соотношения, размеров и формы агрегатов в исследуемых образцах (рис.2.15).

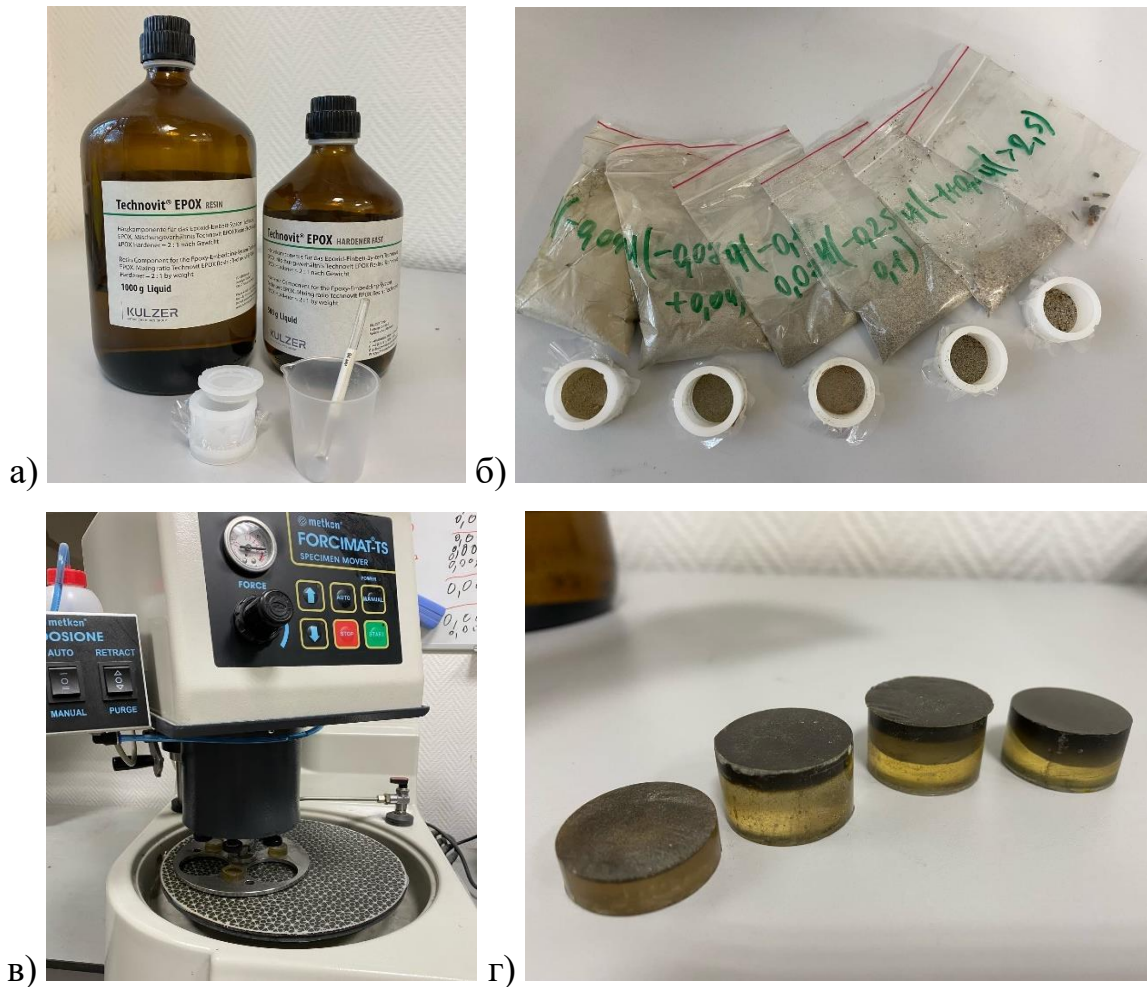


Рисунок 2.15 – Процесс подготовки отходов переработки золотосодержащего сырья для проведения оптико-минералогических исследований: а) материалы для формирования образцов на основе эпоксидной смолы; б) классифицированная по крупности проба хвостов, подготовленная для формирования брикетов из эпоксидной смолы; в) процесс полировки образцов на шлифовально-полировальном станке FORCIPOL 300-1V; г) подготовленные полированные образцы

Класс крупности более 1 мм были отсеяны и сохранены для оптико-минералогического изучения под бинокляром, но не отправлялись в лабораторию на исследования ценных и попутных компонентов, т.к. явно не содержали сульфидную составляющую и не представляли промышленной значимости. При изучении тонких классов менее 0,044 мм, преобладающих в отходах переработки золотосодержащих руд Новотроицкого месторождения,

шламовый материал анализировался исключительно под микроскопом в сочетании с методом РФА.

Для подготовки к оптико-минералогическим исследованиям материал отходов переработки руд, представленный выделенными классами крупности, предварительно был разделён в тяжёлой жидкости бромформе CHBr_3 на лёгкую и тяжёлую (рудную) составляющую. В качестве дополнительного метода изучения сульфидных минералов в отходах переработки руд использовался бинокляр Микромед МС-2-ZOOM вар.2CR (рис. 2.16).

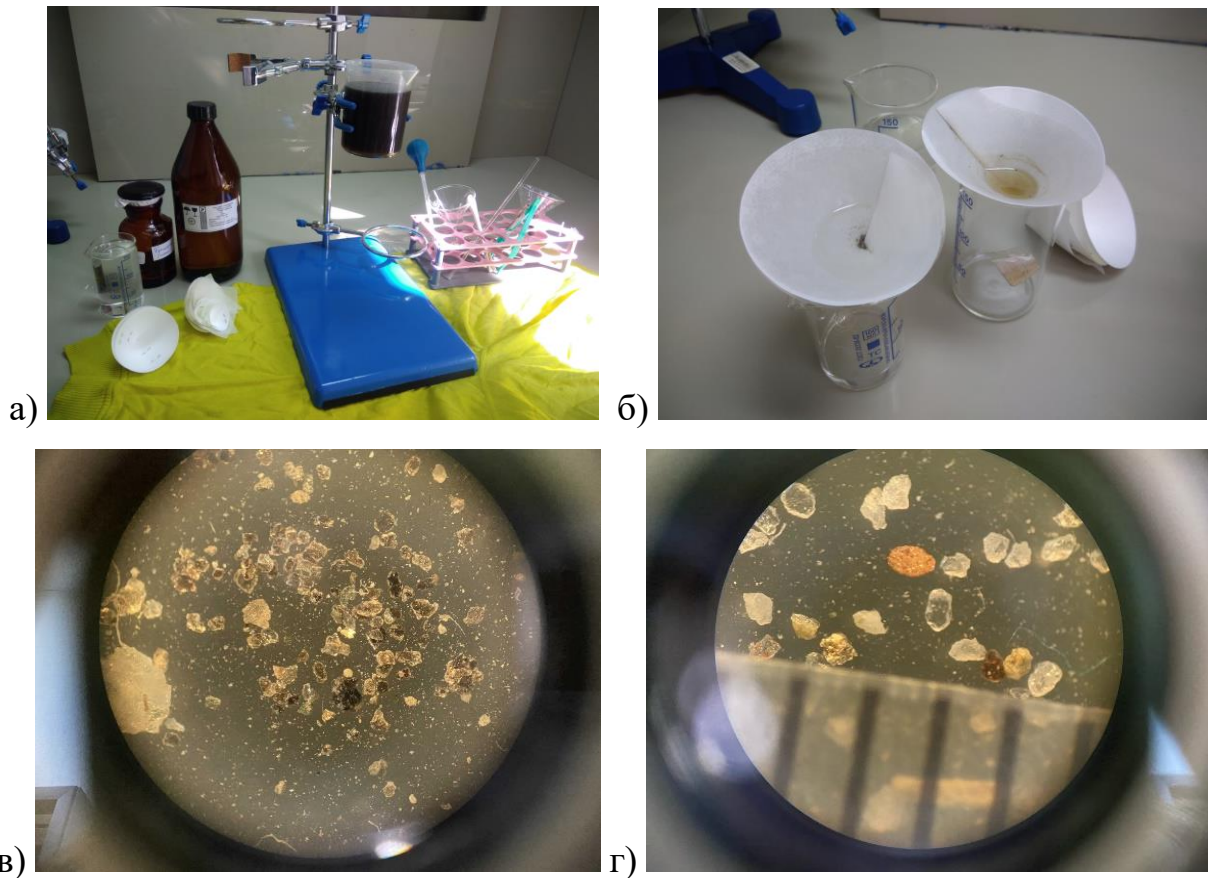


Рисунок 2.16 – Методика выполнения разделения материала отходов Новотроицкого хвостохранилища в бромформе: а) начальный процесс фракционирования по плотности; б) выделенная сульфидная фракция отходов переработки руд по результатам разделения; исследуемая под бинокляром рудная минерализация техногенного сырья в классе крупности $-0,071+0,044$ мм (в) и окисленная форма арсенопирита (ярко-оранжевый) в классе крупности $-1+0,25$ мм (г)

Полный минеральный состав техногенного золотосодержащего сырья Новотроицкого месторождения устанавливался по результатам исследования трёх

объединённых проб с разной глубины из одной опробованной оценочной скважины и выполнялся методом порошковой рентгеновской дифрактометрии на дифрактометре XRD 7000 («SHIMADZU») с использованием $\text{CuK}\alpha$ -излучения (рис. 2.17).



Рисунок 2.17 – Рентгеновский дифрактометр XRD 7000 («SHIMADZU») для определения фазового минерального состава техногенного золотосодержащего сырья

Гранулометрический состав техногенного сырья определялся для всех отобранных образцов в аккредитованной лаборатории ЭКОН ИПКОН РАН на сертифицированном оборудовании путем механического отсева на встряхивателе и уточнялся по результатам испытаний в инженерной лаборатории исследования грунтов «Petromodeling». Продукты отсева на ситах взвешивались с помощью аналитических весов высокой точности. Строились зависимости суммарного выхода классов крупности от размера ячеек сит. Исследования гранулометрического состава золотосодержащих отходов выполнялись комбинированным ситовым и седиментационным методами, согласно действующим стандартным методикам определения содержания частиц определённого класса крупности, по ГОСТ 12536-2014 [68].

2.4 Методика исследований физико-механических свойств отходов переработки руд для обоснования параметров геотехнологии разработки золотосодержащих техногенных образований

Для выбора параметров эффективной технологии освоения старогодних золотосодержащих техногенных образований, основанной на детальном изучении строения и структуры хвостостохранилища путём превентивной оценки стенок сформированных скважин, помимо исследования вещественного и гранулометрического состава техногенного сырья, необходима оценка изменения физико-механических свойств техногенного сырья по глубине хвостохранилища с учётом характеристик техногенного образования – обводнённости, влияния климатических условий, мощности складированных отходов, компрессионных и фильтрационных свойств [97]. В ходе оценочных работ установлено, что повышенная механическая устойчивость скважин на Новотроицком хвостохранилище обеспечивается даже в период дождей за счёт специфических свойств и вещественного состава техногенного сырья, представленного тонкодисперсными частицами, и определяется показателями изменчивости основных физических, прочностных и деформационных свойств при различных значениях влажности складированного в отвал сырья.

Образцы для проведения испытаний по определению их прочностных, деформационных и физических характеристик отобраны из оценочной скважины №4 в интервале глубин от 0 до 2 м, от 6 до 8 м и от 12 до 14 м. Испытания образцов проводились в состоянии их естественной влажности, которую обеспечили при отборе проб на этапе оценочных работ на хвостохранилище. Природная влажность исследуемых проб составляет 9%, 18% и 29.9%, соответственно, что определяет минимальный, средний и максимальный показатели влажности техногенного золотосодержащего сырья по исследуемой скважине.

В условиях инженерно-испытательной лаборатории «Petromodeling» выполнены исследования физико-механических свойств отходов переработки золотосодержащих руд, включающее определение комплекса показателей, таких как установление гранулометрического состава, определение прочностных и

деформационных характеристик техногенного сырья при различных показателях влажности, показателей физического состояния и свойств отходов переработки руд (плотность, пористость, показатели консистенции хвостов). Испытания по определению модуля упругости, коэффициента Пуассона, сцепления и угла внутреннего трения техногенного сырья проведены в автоматизированном режиме по апробированным методикам на оборудовании «Геотек», в соответствии с ГОСТ 12248.2-2020 (рис. 2.18) [67].

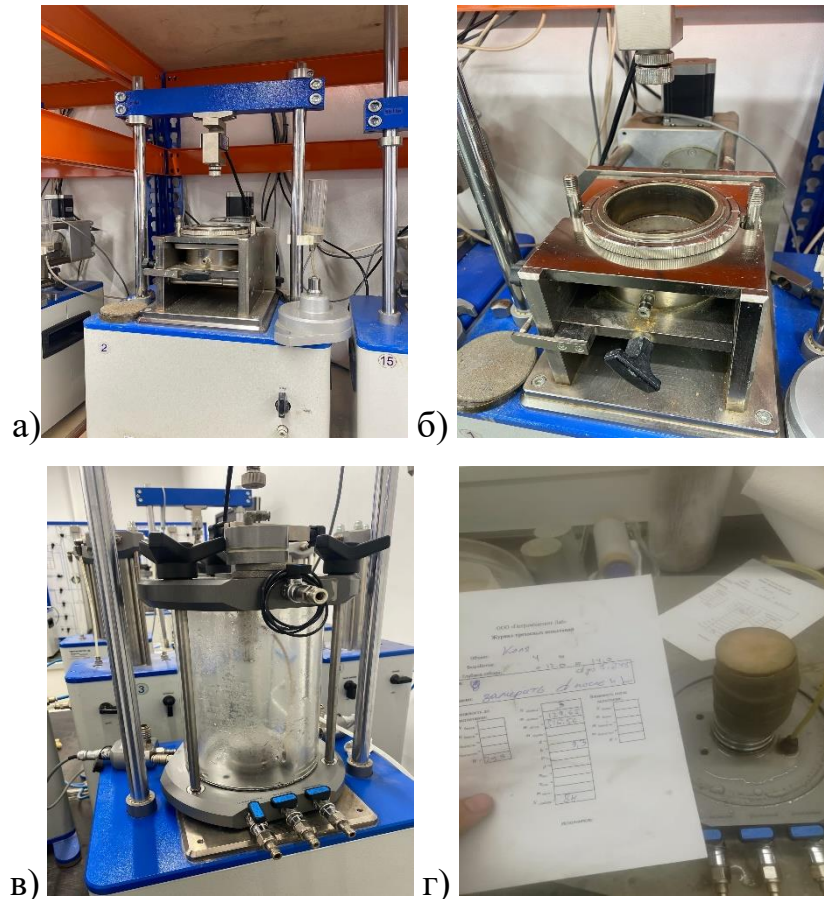


Рисунок 2.18 – Оборудование и методика проведения испытаний деформационных и прочностных свойств техногенного золотосодержащего сырья: а-б) прибор для определения сцепления и угла внутреннего трения несвязных грунтов по схеме консолидировано-дренированного среза; в) прибор «Геотек» для определения деформационных характеристик методом трехосного сжатия; г) протокол испытаний хвостов в результате выполнения исследования техногенного сырья на определение предела прочности

Для оценки влияния влажности техногенного золотосодержащего сырья на исследуемые показатели испытания проводились по консолидировано-дренированной схеме. Помимо определения прочностных и деформационных

характеристик отходов переработки руд в их естественном состоянии, получены дополнительные показатели механических свойств образцов в ходе насыщения каждого испытуемого образца до выбранного предела влажности. Варьируемые показатели влажности при определении механических свойств хвостов переработки руд золота представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Варьируемые показатели влажности техногенного сырья при определении прочностных и деформационных свойств золотосодержащих отходов

№ серии испытания	Интервал отбора образца, м	Изменяемые в ходе проведения испытания показатели влажности техногенного сырья, %		
1	0-2	9	18	29,9
2	6-8	3	11	18
3	12-14	9	18	29,9

*жирным выделена естественная влажность испытуемых образцов отходов переработки руд

Испытания по определению характеристик прочностных и деформационных свойств техногенных грунтов нарушенной структуры включали определение следующих показателей: угол внутреннего трения, удельное сцепление, секущий модуль деформации, модуль деформации на участке при повторном нагружении, коэффициент поперечной деформации. Характеристики деформационных свойств техногенного сырья определялись по результатам испытаний деформационных свойств отходов переработки руд с заданными показателями плотности и влажности в камерах установки трехосного сжатия (стабилометре компании «Геотек»). Давление в стабилометре составило 100,8 кПа. Изменение параметров техногенного сырья до и после проведения испытания показано в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Изменяемые параметры техногенного грунта при испытании методом трехосного сжатия

	Высота образца, см	Площадь образца, см²
до опыта	10,00	19,63
после опыта	8,50	-

Исследования проводились путем увеличения вертикального полного напряжения вплоть до разрушения образца при фиксированном значении горизонтального полного напряжения. Графики изменения давления нагружения от вертикальной деформации образцов техногенного золотосодержащего сырья при проведении испытания представлены на рисунке 2.19.

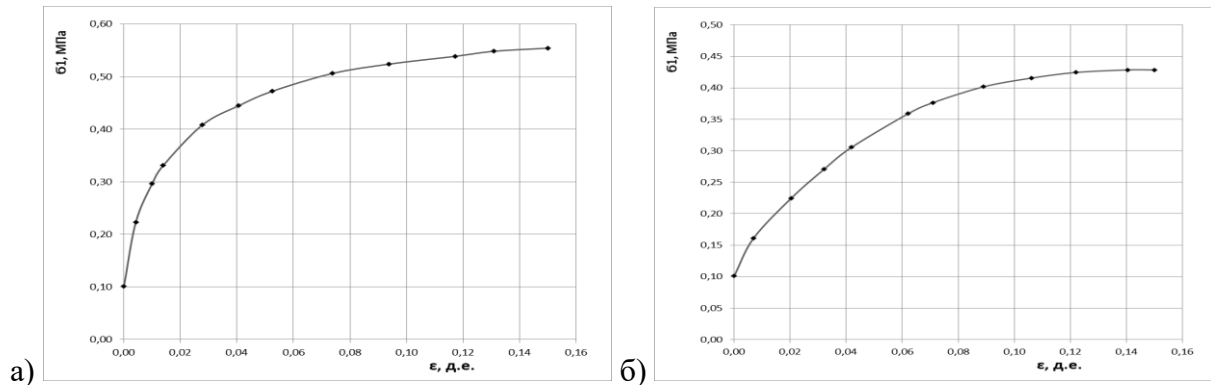


Рисунок 2.19 – Изменение давления нагружения (σ_1) при увеличении относительной вертикальной деформации (ϵ) при испытании методом трехосного сжатия в образцах техногенного грунта, отобранных с глубины 0-2 м (а) и 12-14 м (б)

Испытания образцов техногенного золотосодержащего сырья методом одноплоскостного среза проводились для определения угла внутреннего трения и удельного сцепления в одноплоскостных срезных приборах с фиксированной плоскостью среза путем сдвига одной части образца относительно другой его части горизонтальной нагрузкой при предварительном нагружении образца нагрузкой, нормальной к плоскости среза. Предварительное уплотнение образцов проводят при нормальных давлениях, при которых определяют сопротивление срезу. Значение максимального нормального давления устанавливают с учётом передаваемых на основание нагрузок и бытового давления. Продолжительность предварительного уплотнения при срезе образца составила 12 часов, продолжительность самого среза 2,3 часа. Условия проведения испытания с характеристикой изменения давления при срезе образца различной степени водонасыщения отражены на рисунке 2.20.

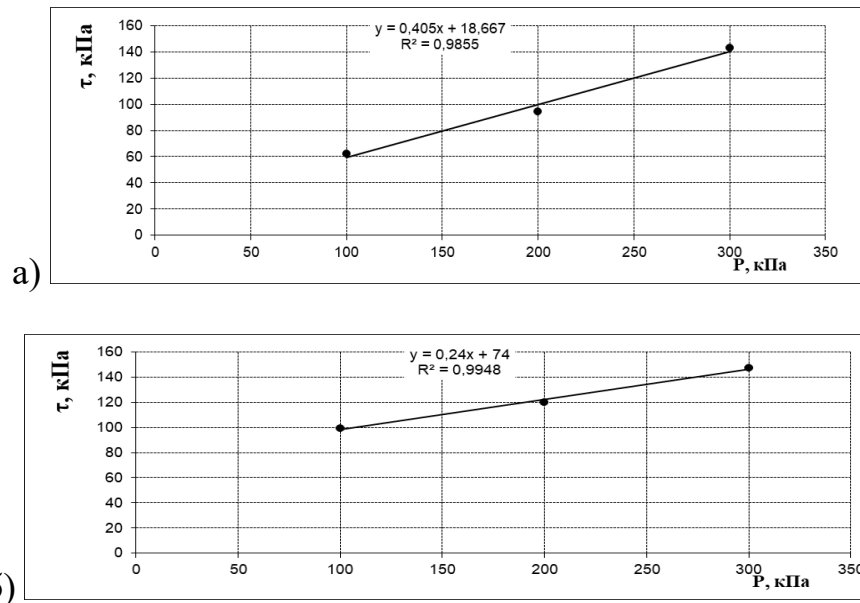


Рисунок 2.20 – Изменение нормального давления (P) при увеличивающемся сопротивлении грунта срезу (τ) в образце техногенного грунта при заданной влажности 29,9 % (а) и 18 % (б)

Полученные по результатам испытаний показатели плотности частиц, сцепления, угла внутреннего трения, модуля упругости и коэффициента Пуассона отходов обогащения золото-мышьяковистых руд легли в основу последующих геомеханических расчётов устойчивости откоса уступа и оценки влияния на коэффициент запаса устойчивости влажности техногенного сырья.

Выводы по 2 главе:

1. Предложен концептуальный подход к оценке структуры техногенных массивов и неоднородности свойств складированного тонкодисперсного сырья, определяющих параметры открытых горных работ. Выполненная аэромагнитная съёмка показала неоднородность строения и структуры техногенного золотосодержащего объекта с возможностью выявления слабоамплитудных магнитных аномалий в пределах хвостохранилища, которые необходимо учитывать при выборе параметров открытой геотехнологии направлений дальнейшего использования извлекаемого минерального сырья. Так как в ходе бурения установлен факт высокой устойчивости стенок скважин на протяжении

длительного времени, даже в период сильных осадков, была сформулирована идея оценки структуры неоднородных техногенных образований с помощью видеоэндоскопа, что позволило отснять структуру массива по глубине, оценить степень неоднородности и размеры вскрытых в толще техногенного образования не сдренированных после вскрытия обводнённых зон, а также участков, сложенных материалом повышенной текучести (деформации стенок скважин, требующие обсадки участка).

2. В ходе визуального обследования строения хвостохранилища выбиралась область стенки скважины, представляющая интерес для оценки вещественного состава, свойств сырья и фиксировалась координата выбранного места отбора техногенного материала. Устройство для механического отбора техногенного сырья содержало закреплённую на тросах пробоприёмную камеру с нанесёнными отметками по глубине и распорный механизм с двумя лезвиями, выполненными с возможностью вращения вокруг своей оси для выбуривания тонкодисперсного материала и сбора материала в пробоприёмник. Прототип устройства апробирован в полевых условиях при исследовании структуры Новотроицкого хвостохранилища и по результатам исследований структуры и свойств отходов переработки руд получен патент на изобретение.

3. Доказано, что выбор направления развития фронта первоочередной выемки и технических средств при разработке техногенных золотосодержащих образований должен базироваться на получении уточняющих сведений о строении, структуре отвала, позволяющих своевременно обнаруживать скрытые обводнённые зоны или участки с повышенным содержанием ценных и/или высокотоксичных металлов.

4. Разработана классификация выбора технологии выемки сырья при открытой разработке техногенного образования в зависимости от типа и локализации установленной неоднородности состава, свойств, строения и структуры хвостохранилища.

5. В соответствии с разработанной классификацией определены типовые технологические схемы открытой разработки неоднородных техногенных

образований. Область применения той или иной схемы определяется типом выявленной неоднородности и её локализации в массиве разрабатываемого объекта.

6. В целях установления закономерностей распределения ценных металлов в хвостохранилище, выбора приоритетного порядка отработки и обоснования параметров открытой разработки техногенного объекта разработана методика проведения комплексных исследований химического, минерального и гранулометрического составов отобранных отходов обогащения золотосодержащих руд.

7. Разработана методика исследований физико-механических свойств отходов переработки золотосодержащих руд. Полученные по результатам испытаний показатели плотности частиц, сцепления, угла внутреннего трения, модуля упругости и коэффициента Пуассона отходов обогащения золото-мышьяковистых руд являются основой последующих геомеханических расчётов устойчивости откоса уступов и оценки влияния на коэффициент запаса устойчивости влажности техногенного сырья.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И СВОЙСТВ СКЛАДИРОВАННОГО СЫРЬЯ, КАК ОСНОВА ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЙ ИХ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКИ (НА ПРИМЕРЕ НОВОТРОИЦКОГО ХВОСТОХРАНИЛИЩА)

3.1 Исследование вещественного состава складированных отходов Новотроицкого хвостохранилища для выбора приоритетного порядка его отработки

Впервые закономерности распределения содержания ценных и попутных металлов были изучены в 2018 году по результатам опробования четырёх оценочных скважин. Согласно полученным результатам опробования на первом этапе оценочных работ, содержание золота и серебра в отдельных образцах достигает 1,2 г/т и 4,6 г/т, соответственно, концентрация меди в золото-мышьяковистых отходах незначительна и составляет менее 0,01%, что является благоприятным фактором для вовлечения в повторную переработку техногенного золотосодержащего сырья [94, 100, 101, 106]. Отобранные пробы отходов обогащения руд Новотроицкого золото-мышьяковистого месторождения, подготовленные по методике, представленной в параграфе 2.3, были изучены в Обособленном подразделении Лаборатории ЭКОН ИПКОН РАН на Южном Урале с целью определения содержания благородных металлов и меди. В ходе дополнительного изучения техногенного образования в 2019 году получены данные по содержанию ценных и попутных компонентов в 109 пробах.

Анализ полученных данных химического состава отходов переработки руд показал, что среднее содержание золота в скважинах №№6, 8, 9 и 11 наиболее высокое, находится в пределах 0,43-0,71 г/т, что косвенно подтверждено результатами проведённой аэромагнитной съёмки хвостохранилища на предмет наличия аномальных по содержанию металлов участков в теле техногенного объекта. В целом, среднее содержание золота в представленной зоне составляет 0,45 г/т.

Сравнение результатов определения содержаний золота скважин юго-западного участка хвостохранилища, расположенных по периферии отвала, со скважиной №14, пройденной в центральной части, указывает на достоверность

проведённых геофизических исследований по выявлению неоднородностей структуры и свойств золотосодержащего сырья. Содержание золота на данном участке характеризуется содержанием не выше 0,24 г/т, что в два раза ниже, чем в среднем на исследуемом участке.

Результаты исследований химического состава восточной «аномальной» зоны представлены в таблице 3.1. Данный участок хвостохранилища характеризуется достаточно высоким содержанием благородных металлов с содержанием золота до 1,26 г/т и серебра – 18 г/т. Содержание меди на всём изученном участке техногенного образования также незначительно, что не влияет на показатели на технологические показатели переработки техногенного сырья и определяет перспективность переработки сырья выщелачиванием на существующих в регионе обогатительных фабриках АО «ЮГК».

Определены закономерности распределения содержания благородных металлов с глубиной. Первые 4 м хвостохранилища представлены горизонтами, сложенными техногенным золотосодержащим сырьём с содержаниями золота ниже 0,5 г/т. Повышенные содержания ценных металлов, как правило, отвечают горизонту 4-12 м.

В ходе проведения исследований из вредных примесей ожидаемо выявлен мышьяк. Анализ изменения концентраций мышьяка с глубиной показал, что верхние слои хвостохранилища (до 6 м) обеднены металлом, его содержание не достигает 0,2 %. Нижние горизонты характеризуются более высоким содержанием вредного компонента – от 0,24% до 0,56%. Показано, что среднее содержание вредной примеси в отходах переработки руд, согласно проекту отработки месторождения, составляет не менее 0,9%, при том, что содержание мышьяка в настоящее время по результатам опробования в среднем составляет 0,25%, что свидетельствует о перераспределении хорошо растворимых мышьяковистых соединений в теле техногенного объекта и миграции за его пределы [102].

Таблица 3.1 – Результаты определения содержания благородных металлов и меди по восточному участку Новотроицкого хвостохранилища

№ п/п	Маркировка проб	Содержание Au, г/г	Содержание Ag, г/г	Содержание Cu, %
89	12-0-2	0,43	10,2	0,01
90	12-2-4	0,23	3,4	0,0005
91	12-4-6	0,39	10,7	0,011
92	12-6-8	0,49	7,6	0,01
93	12-8-10	0,49	17,4	0,01
94	12-10-12	0,17	3,4	0,0005
95	12-12-14	0,09	6,0	0,01
96	12-14-16	0,18	3,2	0,0005
97	12-16-18	0,55	6,4	0,01
98	13-0-2	0,13	3,04	0,001
99	13-2-4	0,20	3,8	0,01
100	13-4-6	0,25	18,0	0,005
101	13-6-8	0,62	12,4	0,01
102	13-8-10	0,63	12,1	0,01
103	13-10-12	1,12	10,5	0,01
104	13-12-14	1,26	8,6	0,01
105	13-14-16	0,45	3,8	0,005
106	13-16-18	0,44	3,9	0,005
107	13-18-20	0,60	5,4	0,01
108	13-20-22	0,30	6,8	0,01
109	13-забой	0,33	2,4	0,005

* - при маркировке пробы в шифре первая цифра соответствует номеру скважины; последняя цифра — максимальной глубине отбора проб на данном интервале

Закономерный характер распределения благородных металлов и мышьяка по глубине техногенного образования, на примере одной скважины, представлен на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Характер изменения содержания ценных металлов и мышьяка по глубине хвостохранилища

Из данных рис. 3.1 следует, что содержание благородных металлов и мышьяка в отходах с глубиной увеличивается. Верхние слои техногенного образования обеднены металлами, что объяснимо их локализацией вблизи поверхности, где они окисляются и претерпевают потерю качества. Вместе с тем, наиболее опасные подвижные формы мышьяка в верхней части техногенного образования [102] и низкое содержание благородных металлов определяют целесообразность локализации верхнего слоя хвостохранилища с возможностью дезактивации мышьяка и последующем складировании в специализированных хранилищах.

Также установлен крайне неравномерный характер распределения ценных компонентов и мышьяка по классам крупности в исследуемых пробах техногенного золотосодержащего сырья (рис. 3.2). Установлено, что наибольшее содержание благородных металлов приурочено к мелким классам крупности отходов переработки руд. Анализ полученных результатов показал, что повышенные концентрации металлов соответствуют двум классам крупности: - 1+0,25 мм и -0,04+0 мм, что и определило направление дальнейших исследований по изучению вещественного состава техногенного золотосодержащего сырья в части эффективной переработки с извлечением благородных металлов из лежалых отходов переработки руд.

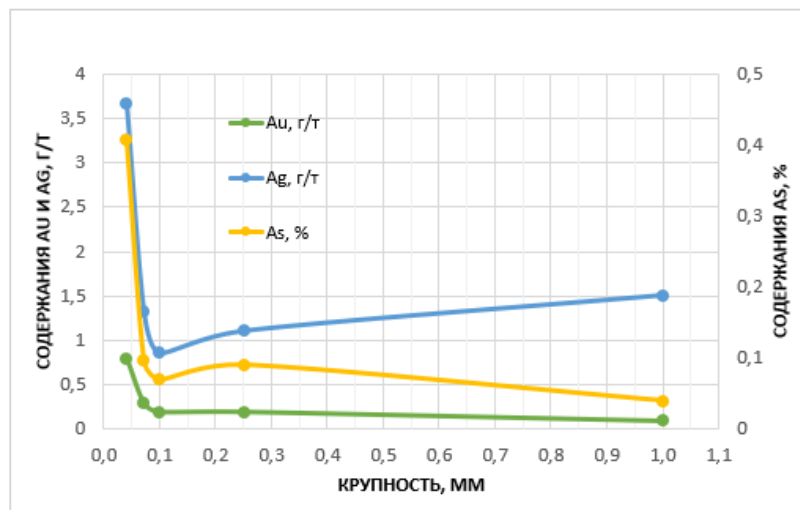


Рисунок 3.2 – График распределения содержаний благородных металлов и мышьяка в скважине №4 при различной крупности техногенного сырья

Известно, что рудные минералы Новотроицкого месторождения составляют от 1 до 15% (редко до 40–60%) массы руды. Среди них преобладают арсенопирит, пирит, в меньших количествах отмечаются халькопирит, галенит, сфалерит, пирротин, золото, еще реже – буланжерит, бурнонит, блеклые руды, рутил и ильменит. Среди нерудных минералов, составляющих 85–99% массы руды, главное значение имеет кварц, в подчинённых количествах присутствуют серицит, мусковит, актинолит, хлорит, флогопит, биотит, кальцит и другие.

Золото в сульфидно-кварцевых жилах месторождения встречается в кварце, пирите, арсенопирите и представлено в виде мелких зёрен, чешуек, листочков, пластинок, пленок, дендритовидных и жилковидных агрегатов. Размеры золотинок – от 0,001 до 2,5 мм [87].

Распределение золота в рудах неравномерное, характерно чередование промышленных участков жил с непромышленными, протяжённость которых колеблется от нескольких метров до десятков, а иногда и сотен метров. Форма его выделений разнообразна, преимущественно комковатая и дендритовая. Размеры золота варьируются от тысячных долей до нескольких миллиметров. Околорудные изменения выражены окварцеванием, карбонатизацией, серицитизацией, хлоритизацией, пиритизацией.

Исследование полного минерального состава отходов переработки руд по результатам фазового анализа показало высокое содержание в исследуемых пробах глинистых минералов – до 40%. Основным минералом в пробе является кварц (более 50 %), в количестве не более 20% присутствуют глинистые минералы, а также минералы группы слюд и гидрослюд (табл.3.2).

Таблица 3.2 – Результаты исследования фазового минерального состава золотосодержащего сырья на основе отходов переработки руд Новотроицкого месторождения

Минерал	Образец / Содержание		
	4-0-2	4-10-12	4 забой
Кварц SiO_2	60	55	50
Каолинит $\text{Al}_2[\text{Si}_2\text{O}_5] [\text{OH}]_4$	5	5	10
Мусковит $(\text{K}, \text{Al}_2) [\text{Si}_3\text{AlO}_{10}] (\text{OH}, \text{F})_2$	15	15	20
Глауконит $(\text{K}, \text{Na}) (\text{Fe}^{+3}, \text{Al}, \text{Mg})_2 [(\text{Si}, \text{Al})_4 \text{O}_{10}] [\text{OH}]_2$	10	15	10
Хлорит $\text{Mg}_2\text{Al}_3 [\text{Si}_3\text{AlO}_{10}] [\text{OH}]_8$	5	5	5
Прочие	5	5	5

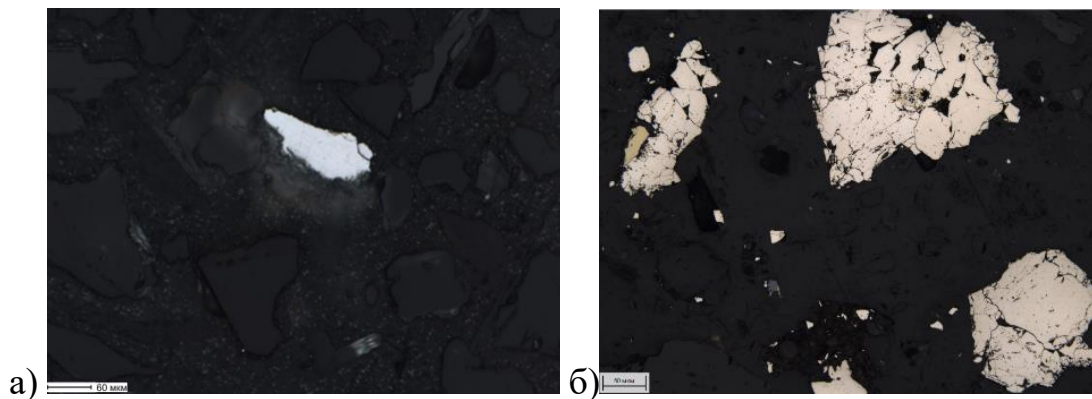
Рудные минералы в техногенном сырье в количественном отношении не превышают 5%, что подтверждается результатами фазового и оптико-минералогического исследования отходов переработки руд. Среди рудных минералов встречаются агрегаты золото-арсенопиритовой минеральной ассоциации в виде арсенопирита, сульфосолей, пирита, халькопирита, сфалерита и самородного золота. Оксидная составляющая встречается повсеместно в образцах и представлена рутилом, магнетитом, реже ильменитом. Сульфидная минерализация проявлена слабо, их доля не превышает 3 об. %.

В лежалых отходах переработки руд арсенопирит образует мелкую рассеянную вкраплённость идиоморфных призматических кристаллов, не образует больших скоплений (рис. 3.3, а). Нередко кристаллы катаклазированы, и

тогда в них по трещинкам нередко проникают более поздние сульфиды и золото. Чаще наблюдается в исследуемых образцах с кварцем или другими сульфидами в тонкозернистых агрегатах $-0,04+0$ мм и классе крупности $-1+0,25$ мм. Размеры зёрен изменяются от $0,002 \times 0,004$ мм до $0,06 \times 0,1$ мм.

Пирит имеет подчинённое значение по отношению к арсенопириту в хвостах переработки руд золота и представлен в виде вкраплённости в кварце. Преобладает пирит неправильной формы выделения, соответствующей жильному типу рудной минерализации. Крупнокристаллические формы в хвостах переработки руд достигают размера $0,1 \times 0,5$ мм. Как правило, в отличие от арсенопирита, в лежалых хвостах чаще встречается в крупнозернистом классе крупности, образуя сплошные скопления агрегатов, нередко катаклазированные более поздним халькопиритом (рис. 3.3, б). В свободных зёрнах преобладает в тонкозернистых классах крупности $-0,04+0$ мм и $-0,071+0,04$ мм. Халькопирит находится в тесной ассоциации с пиритом, проникает по трещинкам катаклазированного минерала или находится в нём в виде выделений округлой формы. Форма выделения – аллотриоморфные зёрна, ксеноморфные выделения, выступающие в виде цемента для разрозненных зёрен пирита. В образцах представлен в подчинённом количестве – не более 0,3 об. %.

Сфалерит и галенит в образцах встречаются в основном в виде сростков с пиритом, халькопиритом и зёрнами нерудных минералов. Отдельные зёрна имеют неправильные очертания и обладают раковистыми неровными границами. Включения сфалерита в пирите характеризуются округлыми очертаниями и имеют размеры до $0,002$ мкм.



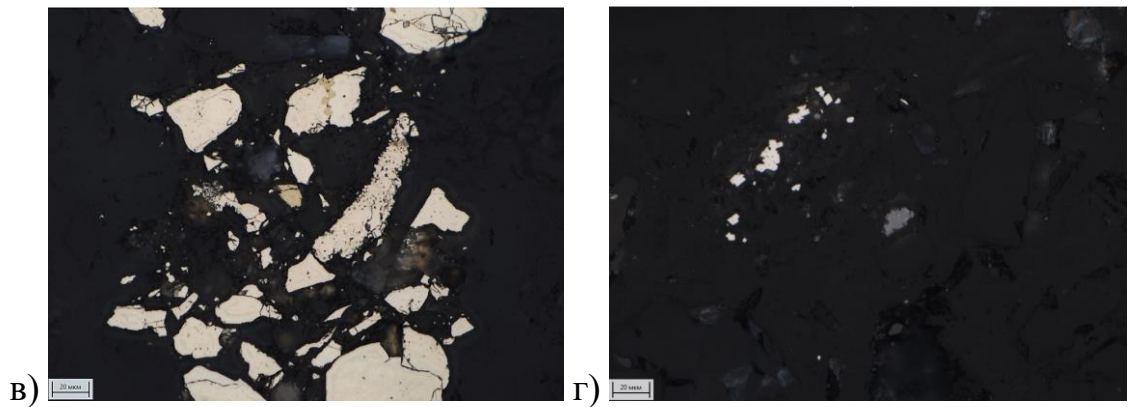


Рисунок 3.3 – Характер сульфидной минерализации в отходах переработки золотосодержащих руд: а) метавкрапленник арсенопирита среди крупнозернистого кварца в классе крупности $-0.071+0,004$ мм; б) катаклазированные халькопирит-пиритовые агрегаты, сцементированные тонкодисперсной глинистой составляющей; в) гипидиоморфное строение пирита в сростке с редкими включениями аллотриоморфного халькопирита; г) скопления идиоморфных зёрен арсенопирита

В исследуемых образцах, особенно в тонких классах крупности, широко представлены процессы окисления и замещения жильных рудных минералов – ильменита и рутила (рис. 3.4), чем и объясняется повышенное содержание Ti в исследуемых пробах, представленное в таблице 3.2. Наличия свободного золота в хвостах переработки руд не было обнаружено, установлено, что основная часть золота образует включения в виде округло-огранённых, прожилковидных и неправильной формы выделений в ранних сульфидах – арсенопирите и пирите.

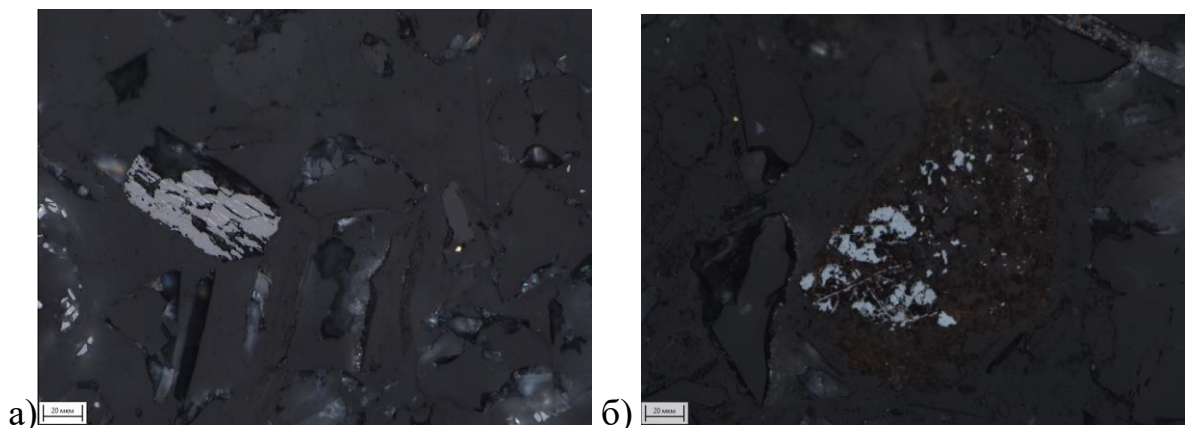


Рисунок 3.4 – Структуры замещения первичных минералов: а) тонкозернистые агрегаты гематита замещают ильменит; б) гематит-рутиловый агрегат в массе гидроокислов железа с формированием решетчатой структуры распада ильменита

Выполненная оценка минерального состава сырья показала достаточно хорошее раскрытие сростков сульфидных минералов, благоприятное для выщелачивания отходов переработки золотосодержащих руд при минимальных дополнительных энергетических затратах на доизмельчение сырья, что позволяет рекомендовать его переработку на одной из обогатительных фабрик, функционирующих в Южноуральском регионе.

Таким образом, по результатам изучения вещественного состава техногенного золотосодержащего сырья установлены следующие закономерности: 1) в нижних слоях хвостохранилища отмечаются повышенные концентрации благородных металлов и мышьяка, что связано с сегрегацией материала по глубине или отработкой и складированием сначала отходов переработки руд богатых жил на ранних стадиях эксплуатации месторождения; 2) наибольшее содержание благородных металлов характерно для мелких и тонких классах крупности золотосодержащего техногенного сырья; 3) основная часть золота связана с сульфидными минералами; 4) с глубиной содержание глинистых тонкодисперсных минералов, цементирующих зёрна рудных минералов, увеличивается.

3.2 Исследование физико-механических и физико-химических свойств складированного сырья техногенных образований для обоснования параметров их открытой разработки

Для определения основных физико-механических параметров на Новотроицком хвостохранилище в Лаборатории ЭКОН ИПКОН РАН на Южном Урале был проведён анализ отобранных из стенок скважин образцов хвостов обогащения в количестве 142 проб для определения влажности и показателей рН среды. Результаты исследования рН среды показали, что для хвостохранилища характерна нейтральная, ближе к слабощелочной среда. Отсутствие кислой среды, несмотря на содержание сульфидов, говорит об относительной экологической безопасности и перспективности выщелачивания благородных металлов из хвостов переработки руд в установленных на обогатительных фабриках режимах. В соответствии с нормативными значениями техногенных грунтов по степени

влажности: при $W_p \leq 5\%$ – породы считаются сухими; $5\% \leq W_p \leq 15\%$ – породы нормальной влажности; $15\% \leq W_p \leq 25\%$ – переувлажнённые породы; $W_p > 25\%$ – породы сильно переувлажнённые. Как правило, все глинистые грунты обладают хорошей влагоёмкостью, в то время как пески характеризуются наибольшей фильтрационной способностью и не способны задерживать влагу в таком объёме. Отсюда, естественная влажность материала составляет не более 10%, для супесей – 10-15%, у суглинков и глин влажность может превышать 25%.

По результатам опробования в программе Surfer методом триангуляции с линейной интерполяцией (Triangulation with Linear Interpolation) были отстроены разрезы через скважины, отражающие изменение показателя естественной влажности по глубине (рис. 3.5).

На разрезе через скважины №14-2, по всей глубине выработки №14, прослеживается зона с влажностью грунтов более 17% (рис. 3.5, а). В целом, на представленном разрезе по профилю №1 преобладают грунты нормальной природной влажности, не превышающей 15%, за исключением участка на глубине 6-8 м, где различима зона песчаных, практически не обводнённых пород с влажностью менее 3%. Закономерности в характере распределения показателей естественной влажности по глубине и периферии хвостохранилища не выявлено. Явная изменчивость обводнённости хвостов прослеживается по площади и тяготеет к центральной части техногенного объекта. На разрезе по разведочной линии №3 (рис. 3.5, б) выделяется довольно протяжённая зона обводнённых хвостов с влажностью более 20%, залегающая на глубине 10-14 м.

Вблизи скважины №11 первые 4 м хвостохранилища представлены сильно переувлажнёнными отходами переработки руд. Максимальная влажность данного участка составляет 30%, что близко к пределу текучести. Приповерхностная часть данного участка хвостохранилища первые 4 м, вблизи скважины №11, характеризуется переувлажнённым грунтом. Кроме того, на разрезе вблизи скважины №3, до глубины 14 м отходы обогащения представлены сухим песчаным материалом. Как и на разрезе по профилю №1, вертикальная зональность не так отчётливо наблюдается ввиду изменчивости влажности

хвостов по площади массива. На рисунке 3.5, в фрагментарно прослеживаются области переувлажнённых пород с влажностью более 26% и зоны, которые расположены вблизи скважины №10, лишённые природной влаги.

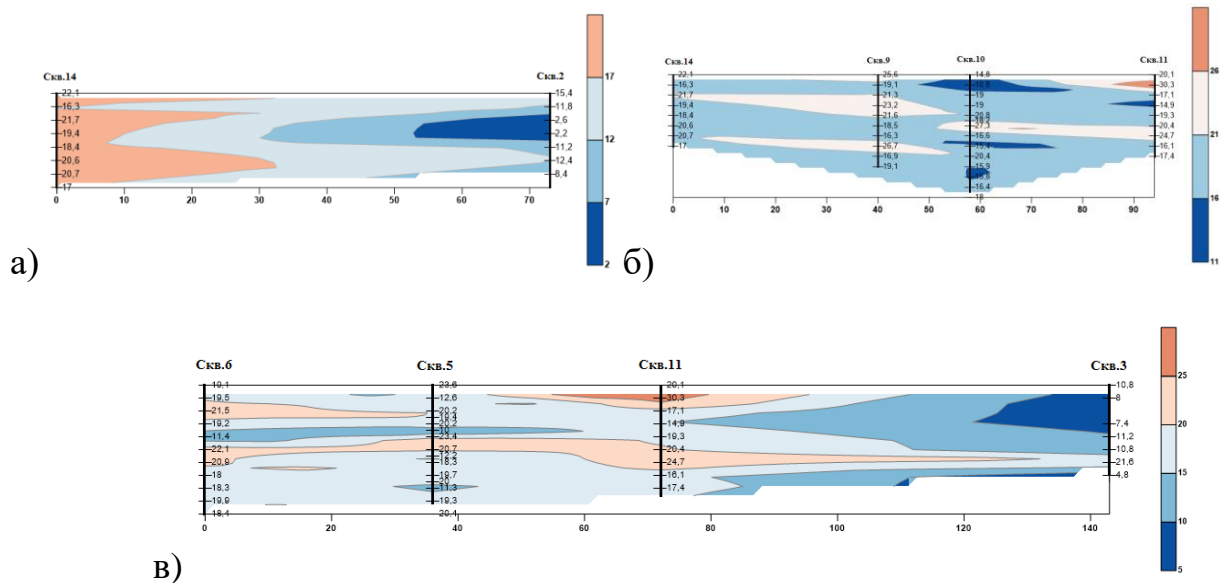


Рисунок 3.5 – Показатели влажности хвостов на разрезе по профилям №1 (а), №3 (в) и по линии через скв. №№14-9-10-11 (б)

В целом, весь участок хвостохранилища между скважинами №14-11 сложен довольно переувлажнёнными отходами обогащения, влажность которых составляет выше 16%. Стоит отметить, что зона максимальной влагонасыщенности соответствует приповерхностной части представленного участка и составляет не более 4 м. Таким образом, установлено, что на разрезе через скважины №14-11 показатель естественной влажности хвостов обогащения никак не зависит от гипсометрической отметки точки отбора пробы.

На разрезе через скважины №№4, 12 (рис. 3.6, а) явно прослеживается вертикальная зональность в изменении естественной влажности хвостов обогащения. Приповерхностная часть данного участка хвостохранилища первые 6 м характеризуется в основном породами нормальной природной влажности, не превышающей 13%, следовательно, грунт здесь представлен песчаным материалом с незначительной долей глинистой составляющей.

Участок, представленный обводнённым тонкодисперсным сырьем влажностью 28% и выше, залегает на глубине 10-14 м и приурочен к юго-

западному периферийному участку техногенного массива. Оставшаяся область на разрезе соответствует показателю влажности грунта для переувлажнённых пород с наибольшей долей дисперсного глинистого материала. Зона повышенной влагонасыщенности техногенного сырья прослеживается на участке между скважинами №№8, 5, 13 и составляет по глубине массива первые 4 м (рис. 3.6, б). На разной глубине фрагментарно выделяются участки техногенного грунта, соответствующие показателям нормальной естественной влажности, не превышающей 15%. Область переувлажнённых пород вблизи скважины №8, окрашенная на разрезе в голубой цвет, приурочена к глубине 8-10 м.

В результате оценки показателя влажности грунта на техногенном объекте Ново-Троицкого хвостохранилища установлено, что изменчивость в характере обводнённости хвостов прослеживается по площади массива, при этом область сильно переувлажнённых пород выделяется в центральной и юго-восточной части хвостохранилища. Первые 4 м хвостохранилища относятся к категории грунтов с нормально допустимой естественной влажностью, не превышающей 15%. Гипсометрически ниже встречаются зоны переувлажнённых и сильно обводнённых отходов переработки руд, скрытые в теле хвостохранилища, выемка которых для дальнейшей переработки без предварительного осушения массива не представляется безопасной и экономически рентабельной.

Наличие зон переувлажнённого сырья в хвостохранилище предопределяет целесообразность его разработки в зимний период, когда смерзание техногенного сырья будет способствовать росту устойчивости техногенного образования и позволит обеспечить безопасные условия труда при открытых горных работах на техногенном объекте. Изменчивость физико-механических свойств лежалых отходов переработки руд обуславливает неоднородное строение и структуру техногенного образования, определяемое содержанием частиц сырья различной крупности, его распределением в теле отвала по площади и глубине. Так, для лежалых отходов золотодобычи характерно неравномерное распределение разностей по глубине хвостохранилища.

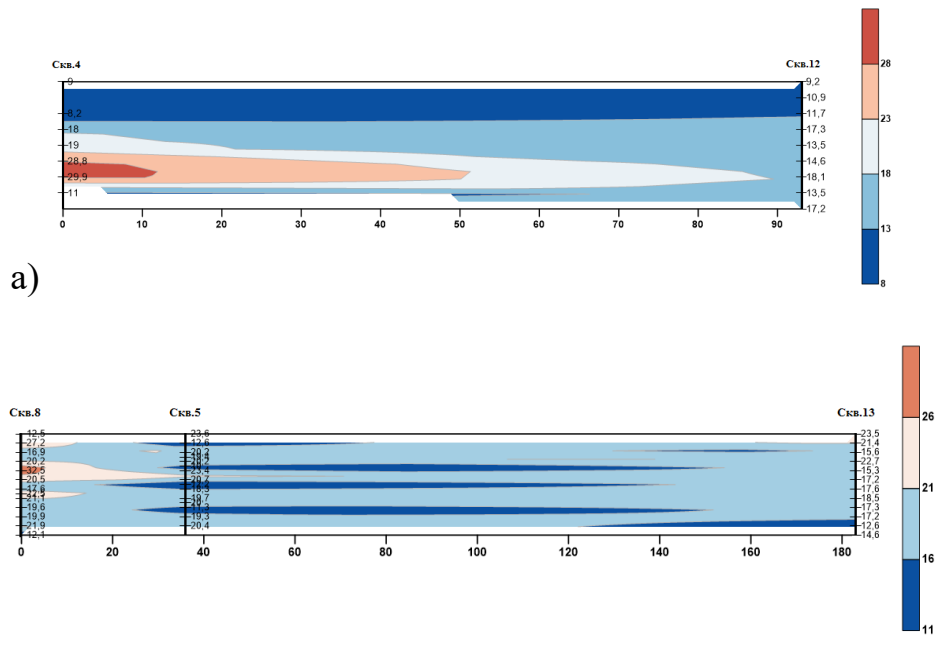


Рисунок 3.6 – Показатели влажности хвостов на разрезе через скв.№№4, 12 (а) и скв. №№8, 5, 13 (б)

Техногенное золотосодержащее сырье, складированное в хвостохранилище, представлено суглинками пылеватыми, тяжёлыми твердыми или текучепластичными. Исследованиями гранулометрического состава техногенного сырья комбинированным ситовым и седиментационным методом анализа установлено, что содержание тонких классов крупности $-0,05+0,002$ мм в исследованных пробах составляет большую часть, не менее 70%, что и определяет повышенное сцепление хвостов переработки руд и обеспечивает устойчивость стенок скважин длительное время (табл.3.3).

Таблица 3.3 – Результаты исследования гранулометрического состава техногенного сырья на основе отходов переработки золото-мышьяковистых руд

№ п/п	Глубина отбора, м	Содержание частиц, %										Наименование грунта по ГОСТ 25100-2020
		10 - 5 мм	5 - 2 мм	2 - 1 мм	1 - 0,5 мм	0,5 - 0,25 мм	0,25 - 0,10 мм	0,10 - 0,05 мм	0,05 - 0,01 мм	0,01 - 0,002 мм	< 0,002 мм	
1	0-2	0,2	0,0	0,0	0,1	0,4	3,2	8,3	52,5	24,9	10,4	Суглинок пылеватый тяжёлый, твердый
2	6-8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	4,4	9,7	49,7	25,1	10,5	Суглинок пылеватый тяжёлый, твердый
3	10-12	0,0	0,0	0,0	0,3	2,9	11,8	13,0	39,1	23,5	9,4	Суглинок пылеватый тяжёлый, текучепластичный

Анализ полученных результатов показал, что выход класса $-0,05+0,01$ мм в грунтах, отобранных на верхних горизонтах хвостохранилища, составляет 13%, на нижних – 28%, что обусловлено особенностями сегрегации, природной эрозии и выщелачивания (рис. 3.7).

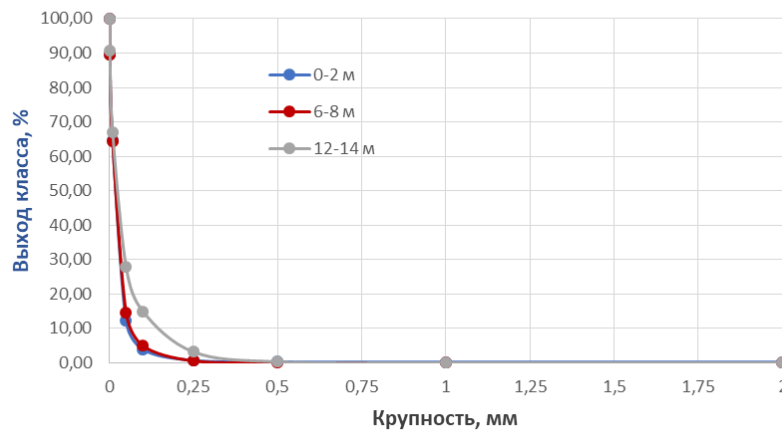


Рисунок 3.7 – Изменение гранулометрического состава отходов переработки руд по глубине хвостохранилища на примере одной оценочной скважины

Определяющее влияние на устойчивость горнотехнических конструкций, откосов и основания хвостохранилища при выборе средств механизации при разработке техногенного объекта оказывают сцепление, угол внутреннего трения,

плотность, пористость и показатели консистенции отходов переработки руд. Результаты определения основных физико-механических характеристик техногенного золотосодержащего сырья приведены в таблице 3.5. Плотность материала в естественном состоянии с глубиной и с повышением влажности техногенного сырья с 9% до 29,9% увеличивается с 1,59 до 1,97 г/см³. Плотность хвостов в сухом состоянии составляет от 1,46 до 1,52 г/см³, что характеризует материал техногенного образования как достаточно уплотнённый. Изменение коэффициента пористости с глубиной незначительно и в среднем составляет 0,8 д. е., что, возможно, обусловлено высоким содержанием кварца – 55-60%, определяющим хорошую проницаемость хвостохранилища. В приповерхностной зоне с увеличением влажности отходов переработки руд коэффициент пористости уменьшается с 0,92 до 0,84 д. е., в основании техногенного образования – с 0,74 до 0,9 д. е.

Таблица 3.4 – Результаты анализа физико-механических свойств техногенных образований золота при естественной влажности сырья

№ п/п	Глубина отбора, м	Гигроскопическая влажность, %	Плотность частиц грунта, г/см ³	Влажность природная, %	Плотность сухого грунта природного сложения, г/см ³	Плотность грунта природного сложения, г/см ³	Коэффициент пористости, д. е.	Влажность на границе текучести, %	Влажность на границе раскатывания, %	Число пластичности, %	Показатель текучести, д. е.	Коэффициент водонасыщения, д. е.
1	0-2	0,5	2,80	9,0	1,46	1,59	0,919	36,2	21,0	15,20	-0,79	0,27
2	6-8	0,6	2,78	18,0	1,53	1,80	0,822	35,7	20,4	15,30	-0,16	0,61
3	10-12	0,4	2,79	29,9	1,52	1,97	0,840	30,4	18,1	12,30	0,96	0,99

Показатель текучести материала отходов в верхней части техногенного образования представлен суглинками пылеватыми, тяжёлыми, твердыми ($I_L < 0$), ближе к основанию хвостохранилища находится в пределах $0,75 < I_L \leq 1$ и соответствует текучепластичной разновидности техногенного золотосодержащего сырья. Исследованиями показателя текучести техногенного золотосодержащего

сырья установлено, что влажность отходов обогащения руд не превышает 30% и не достигает влажности на границе текучести, что обеспечивает повышенную механическую устойчивость пробуренных скважин длительное время, достаточное для проведения экспресс-оценки строения и структуры техногенного объекта, предусматривающей видеоэндоскопическое обследования ее стенок и точечный отбор проб (рис.3.8).

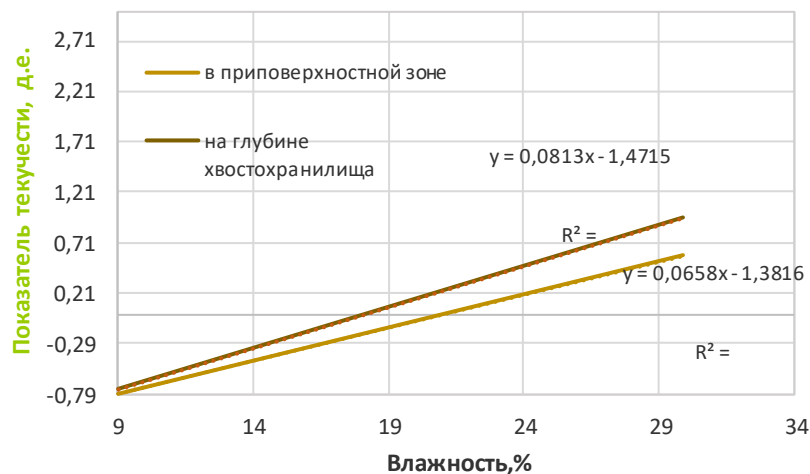


Рисунок 3.8 – Оценка влияния влажности техногенного сырья на показатель текучести отходов переработки руд, определяющий их устойчивое состояние в оценочных скважинах

Для обоснования параметров технологии разработки техногенного образования, определения конструктивных параметров уступов, ширины рабочих площадок и выбора средств механизации при выемочно-погрузочных и горнотранспортных работах исследовались прочностные и деформационные свойства отходов переработки золото-мышьяковистых руд. Сравнительные результаты изменения прочностных свойств отходов переработки руд при различной влажности, на примере одной скважины, представлены на рисунке 3.9. Установлено, что с увеличением естественной влажности техногенного сырья с 9 до 29,9% сцепление снижается, а угол внутреннего трения – наоборот увеличивается, что дополнительно обусловлено влиянием тонкодисперсного глинистого материала, преобладающего в составе техногенного золотосодержащего сырья

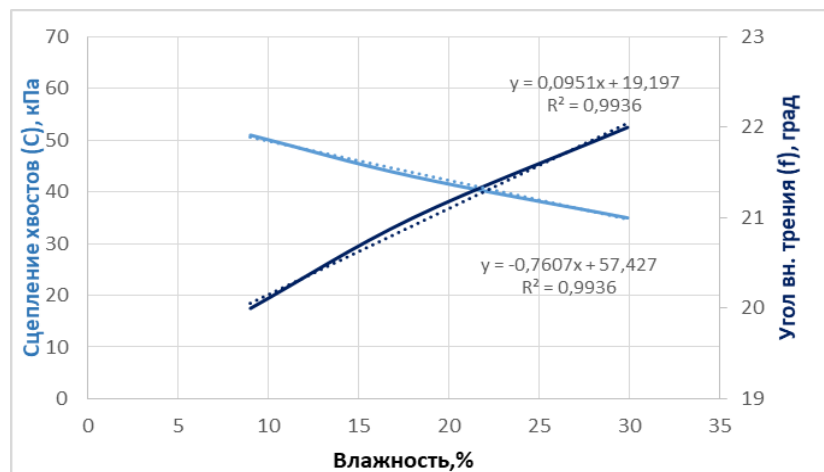


Рисунок 3.9 – Изменение прочностных характеристик отходов переработки золото-мышьяковистых руд, складированных в отвал на глубине 12-14 м, при различной влажности

Полученные результаты исследования физико-механических свойств техногенного золотосодержащего сырья легли в основу выбора оптимального выемочно-погрузочного и горнотранспортного оборудования по условиям обеспечения устойчивости поверхности отвала и горно-технических конструкций при опережающей оценке строения Новотроицкого хвостохранилища и его последующей отработке.

3.3 Исследование устойчивости горнотехнических конструкций при выявлении в толще техногенных образований скрытых обводнённых зон

Для определения влияния опасной обводнённой зоны на параметры разработки уступа хвостохранилища построена геомеханическая модель, предусматривающая оценку напряжённо-деформированного состояния массива при освоении техногенного образования. Определены условия, при которых область пластических деформаций при наличии в массиве скрытых обводнённых зон выходит на поверхность откоса (рис. 6), что в свою очередь приводит к быстрому прогрессирующему разрушению поверхности откоса с выдавливанием ослабленной области (плывуна) с последующим его оседанием и сползанием верхних слоев.

В основу построенной модели были заложены физико-механические свойства сырья и геометрические параметры реально выявленной обводнённой

зоны, локализованной в Новотроицком хвостохранилище. Для выполнения расчётов по оценке влияния влажности на устойчивость откоса использовался метод конечных элементов. Геометрические параметры моделей представляют собой насыпь высотой 15 м, которая состоит из 3 слоёв с различной влажностью и показателями физико-механических свойств, которые зависят от влажности. В представленных моделях изменено соотношение объёмов пород с различной влажностью. Модели, по которым оценивалось влияние различных пределов влажности техногенного золотосодержащего сырья на величину коэффициента запаса устойчивости, представлены на рис. 3.10.

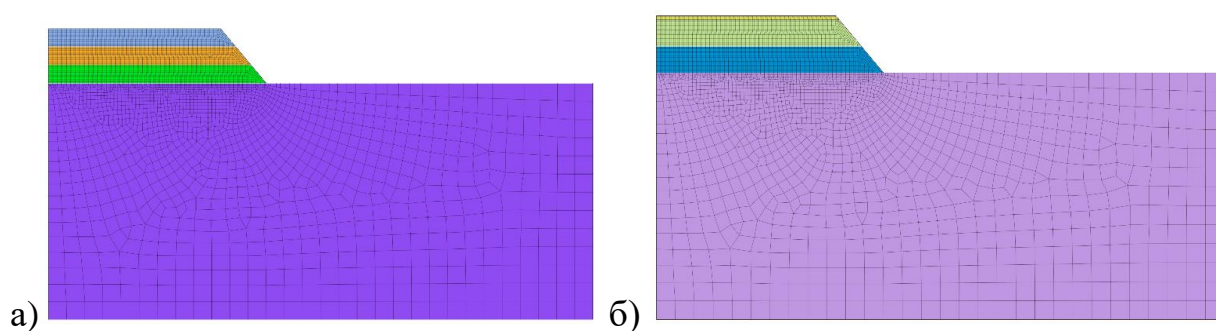


Рисунок 3.10 – Геомеханическая модель хвостохранилища для оценки влияния влажности на устойчивость откоса уступа

По результатам моделирования удалось установить, что колебание влажности, которое в модели было представлено изменением соотношения объёмов пород с разными свойствами, приводит к уменьшению коэффициента запаса устойчивости от 5% и более при увеличении влажности исследуемого массива. Данный факт необходимо учитывать при использовании упрощённых схем оценки устойчивости уступов и обоснования их безопасных параметров путем увеличения нормативного коэффициента запаса устойчивости на 5-10%.

Для оценки ширины предохранительного целика, который необходимо оставить перед сильно обводнёнными и ослабленными участками, дополнительно включена область сильно ослабленных пород, в модели эта область моделировалась по слабым пескам, свойства которых принимались по справочным материалам (рис. 3.11).

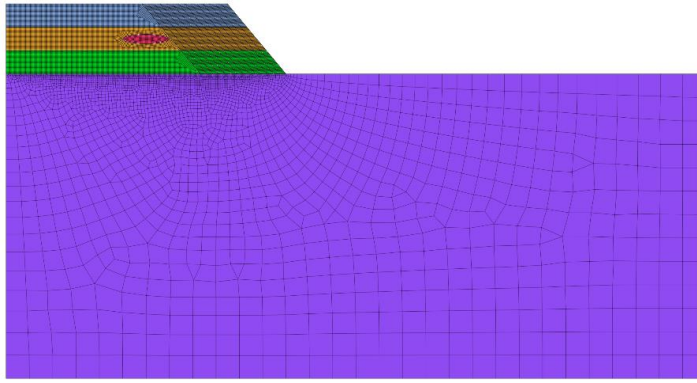


Рисунок 3.11 – Геомеханическая модель хвостохранилища для оценки размера предохранительного целика возле опасной зоны

В представленной модели моделировалась последовательная отработка насыпи заходками шириной в 1 м. На каждом шаге отработки выполнялась оценка напряжённо-деформированного состояния с последующим анализом полученных величин напряжений и деформаций. Свойства для всех вариантов моделей принимались по результатам испытаний. Сводная таблица характеристик техногенного сырья, принятого для моделирования, представлена в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Физико-механические свойства слоёв, принятых для моделирования

№ слоя	Модуль упругости E, кН/м ²	Коэффициент Пуассона ν	Плотность γ , кН/м ³	Сцепление C, кН/м ²	Угол внутреннего трения
1 слой	19500	0.35	16	26	25
2 слой	16800	0.36	18	24	24
3 слой	6100	0.39	20	35	22
4 слой	100000	0.27	27	14	28
Слабый прослой	6100	0.36	18	19	25

По данным построенной геомеханической модели удалось установить, что при отработке 7 заходки область пластических деформаций, образованная в районе ослабления, выходит на поверхность откоса (рис. 3.12), что в свою очередь приведёт к аварийной ситуации за счёт процессов сдвижения в ослабленной зоне.

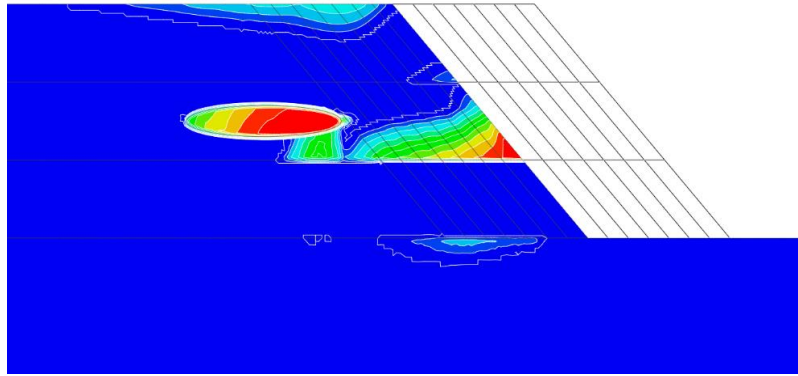
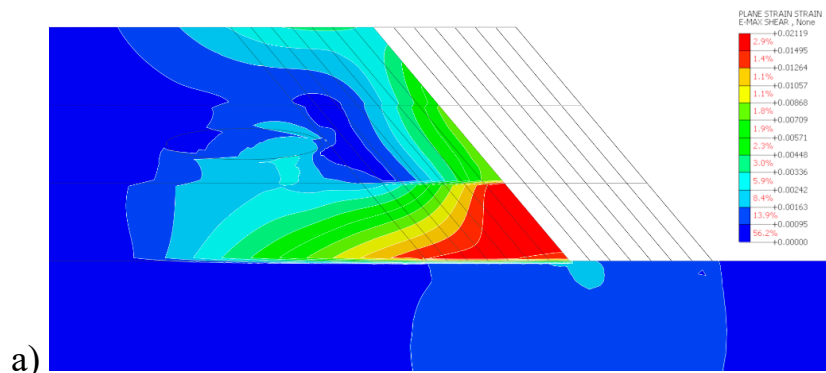


Рисунок 3.12 – Модель численного моделирования влияния скрытой обводнённой зоны на размер защитного целика при отработке уступа, показывающая выход области пластических деформаций в откос уступа

При таком развитии событий размер опасной зоны составит порядка 11 метров от верхней бровки уступа в рассматриваемых условиях. При стандартном процессе обрушения указанная опасная зона верхней площадки уступа составит всего 5-6 метров. Так же следует отметить, что при отработке 7 заходки в основании уступа образуется область, в которой сдвиговые деформации превысят величины $20 \cdot 10^{-3}$ (рис. 3.13, а), а максимальные – $15 \cdot 10^{-3}$ (рис 3.13, б). Указанный факт свидетельствует о том, что грунты в основании уступа находятся в предельном состоянии и будут быстро разрушены, что окажет дополнительное воздействие на развитие процессов разрушения уступа. Таким образом установлено, что целик в рассматриваемых условиях вокруг опасной обводнённой зоны должен составлять не менее 8 м. Очевидно, что данный пример является частным случаем, а для каждой выявленной в ходе опережающей оценки структуры хвостохранилища зоны (их может быть несколько) должна проводиться подобная оценка.



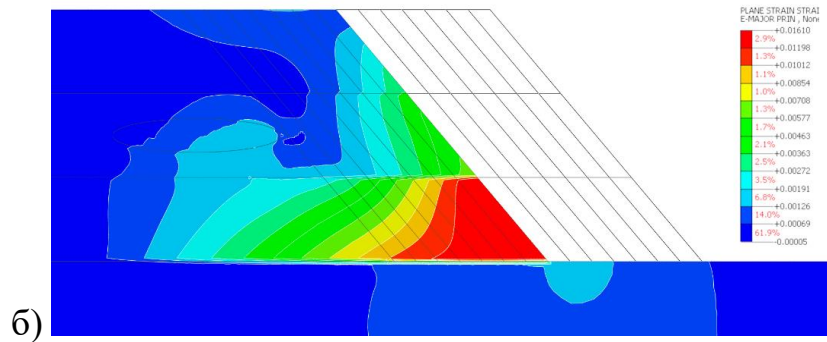


Рисунок 3.13 – Результаты моделирования распределения сдвиговых деформаций в уступе на 7 заходке при отработке хвостохранилища (а) с данными по распределению максимальных (главных) деформаций при прорыве пливуна в техногенном образовании

Таким образом, для условий Новотроицкого хвостохранилища с выявленной обводнённой зоной $78,5 \text{ м}^2$ и мощностью 3 м при обосновании параметров технологии разработки сильнообводнённого участка, локализованного в толще, возможность безопасной экскавации и транспортирования сырья обеспечивается шириной защитного предохранительного целика, который должен составлять не менее 8 м и равен расстоянию от границы обводнённой скрытой зоны до границ откоса уступа.

В целом, проведёнными исследованиями доказано, что отсутствие скрытых обводнённых и неоднородных зон на обрабатываемом участке техногенного образования определяет возможность экскавации и выемки сырья уступами до границ выявленной неоднородной зоны, безопасное расстояние до которой определяется в зависимости от свойств среды на неоднородном участке.

3.4 Алгоритм выбора технологии открытой разработки техногенных образований на базе опережающей оценки строения и структуры техногенного объекта

Выполненными исследованиями доказано, что выбор эффективной технологии разработки неоднородных по составу, свойствам и структуре техногенных образований золотодобычи базируется на требованиях к локализации в объёме хвостохранилища участков, характеризующихся повышенным содержанием ценных или токсичных компонентов, своевременному

обнаружению обводнённых зон в целях исключения риска прорыва области водонасыщенного складированного сырья и утраты горного оборудования при его размещении на ослабленной поверхности техногенного образования. Таким образом, для обоснования предпочтительного способа и направления ведения открытых горных работ с подбором соответствующей технологической схемы разработки хранилища отходов переработки руд разработан алгоритм выбора технологии выемки неоднородного по составу, свойствам и структуре техногенного сырья, представленный на рисунке 3.14.

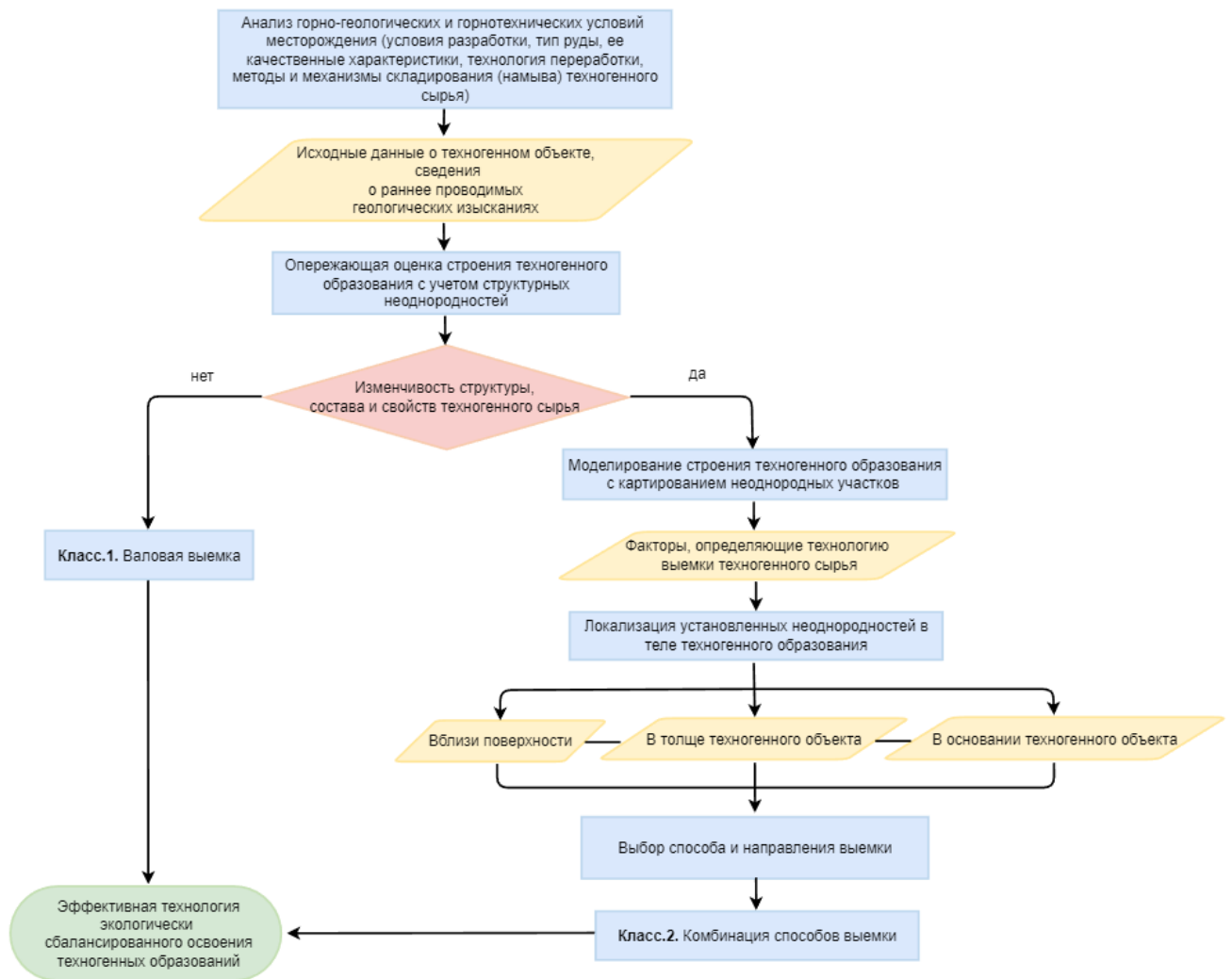


Рисунок 3.14 – Алгоритм выбора технологии выемки техногенного сырья на базе оценки изменчивости состава, свойств и структуры техногенного образования

Разработанный алгоритм условно можно разделить на три основных этапа:

1) Сбор и анализ первичных данных о горно-геологических и горнотехнических условиях разработки месторождения, отходы которого сформировали техногенное образование;

2) Выполнение опережающей оценки изменчивости состава, свойств и структуры хвостохранилища, обуславливающая неоднородное строение техногенного образования;

3) Районирование техногенного объекта по типу и локализации установленной неоднородности распределения состава, свойств, структуры сырья, с выбором способа и порядка ведения горных работ на выделенных участках разработки техногенного в соответствии с представленными в параграфе 2.2 технологическими схемами.

К исходной геологической информации при обосновании технологии добычи и переработки техногенного сырья относятся сведения об условиях разработки месторождения, типе руды, ее качественных характеристиках и технологии обогащения, методах и механизмах формирования техногенных отходов в хранилище с учётом объемов складированных отходов, данные о проведенных ранее исследованиях по изучению состава, свойств техногенного сырья.

Основная задача второго и третьего этапа реализации алгоритма заключается в установлении структурной неоднородности исследуемого техногенного образования на базе выполнения опережающей оценки состава и свойств техногенного сырья. При таком подходе к выбору технологии освоения хранилищ отходов переработки руд, с целью его последующей переработки и безопасной утилизации, предусматривает включение дополнительной технологической операции, опережающей основной процесс разработки хвостохранилищ – добычу и транспортировку техногенного сырья до обогатительной фабрики.

В случае установления неоднородного строения и структуры хвостохранилища по результатам оценки изменчивости вещественного состава, физико-механических свойств сырья, характеризующегося наличием в теле

отвала скрытых обводнённых зон, обогащенных участков по содержанию ценных и вредных металлов проводится районирование техногенного образования с моделированием выявленных участков неоднородности, определяющее технологию выемку складированного сырья.

Выводы по 3 главе:

1. Выполнены исследования вещественного состава проб, отобранных из стенок пробурённых скважин с привязкой по глубине. Определено крайне неравномерное распределение обогащённых и обеднённых по золоту зон. Результаты исследований химического состава восточной «аномальной» зоны показали, что данный участок хвостохранилища характеризуется достаточно высоким содержанием благородных металлов с содержанием золота до 1,26 г/т и серебра – 18 г/т. Это определяет приоритетность первоочередной выемки сырья на данном участке в случае принятия решения о быстрой окупаемости затрат.

2. Определены закономерности распределения содержания благородных металлов с глубиной. Первые 4 м хвостохранилища представлены горизонтами, сложенными техногенным золотосодержащим сырьем с содержаниями золота ниже 0,5 г/т. Повышенные содержания ценных металлов, как правило, отвечают горизонту 4-12 м. Наиболее опасные подвижные формы мышьяка в верхней части техногенного образования и низкое содержание благородных металлов определяют целесообразность локализации верхнего слоя хвостохранилища с возможностью дезактивации мышьяка и последующего складирования в специализированных хранилищах.

3. Установлено, что содержание меди на всём изученном участке техногенного образования незначительно, что не влияет на технологические показатели переработки техногенного сырья и определяет перспективность переработки сырья выщелачиванием на существующих в регионе обогатительных фабриках АО «ЮГК».

4. Исследование полного минерального состава отходов переработки руд по результатам фазового анализа показало высокое содержание в исследуемых пробах глинистых минералов – до 40%. Основным минералом в

пробе является кварц (более 50%), в количестве не более 20% присутствуют глинистые минералы, а также минералы группы слюд и гидрослюд. Повышенное содержание кварца определяет достаточно хорошие фильтрационные характеристики в большей части массива, что обуславливает повышенную устойчивость пробурённых скважин и возможность проведения опережающей оценки техногенного образования. Исследованиями показателя текучести техногенного золотосодержащего сырья установлено, что влажность отходов обогащения руд не превышает 30% и не достигает влажности на границе текучести, что обеспечивает повышенную механическую устойчивость пробурённых скважин в течение длительного времени, достаточного для проведения экспресс-оценки строения и структуры техногенного объекта, предусматривающей видеоэндоскопическое обследование её стенок и точечный отбор проб. Вместе с тем, наличие глинистых минералов определяет формирование локальных уплотнённых зон в теле техногенного образования и скопление жидких пульпообразных масс, требующих локализации и предварительного осушения.

5. Получены результаты исследования физико-механических свойств техногенного золотосодержащего сырья, которые легли в основу выбора выемочно-погрузочного и горнотранспортного оборудования по условиям обеспечения устойчивости поверхности отвала и горно-технических конструкций для эффективной и безопасной разработки Новотроицкого хвостохранилища.

6. Для условий Новотроицкого хвостохранилища с выявленной обводнённой зоной 78,5 м² и мощностью 3 м при обосновании параметров технологии разработки сильнообводнённого участка, локализованного в толще, возможность безопасной экскавации и транспортирования сырья обеспечивается шириной защитного предохранительного целика, который должен составлять не менее 8 м и равняться расстоянию от границы обводнённой скрытой зоны до границ откоса уступа. В целом, проведёнными исследованиями доказано, что отсутствие скрытых обводнённых и неоднородных зон на отработываемом участке техногенного образования определяет возможность экскавации и выемки

сырья уступами до границ выявленной неоднородной зоны, безопасное расстояние до которой определяется в зависимости от свойств среды на неоднородном участке.

7. Выполненная оценка минерального состава сырья показала достаточно хорошее раскрытие сростков сульфидных минералов, благоприятное для выщелачивания отходов переработки золотосодержащих руд при минимальных дополнительных энергетических затратах на доизмельчение сырья, что позволяет рекомендовать его переработку на одной из обогатительных фабрик, функционирующих в Южноуральском регионе.

8. Разработан алгоритм выбора технологии открытой разработки техногенных образований на базе опережающей оценки строения и структуры техногенного объекта, который с учётом полученных результатов исследований вещественного состава сырья, структуры и свойств отвала позволяет выбрать наиболее рациональную технологическую схему разработки неоднородного участка в соответствии с классификацией технологических схем, представленной в разделе 2.2.

4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ И ОЦЕНКА ИХ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

4.1 Обоснование приоритетного порядка разработки неоднородного техногенного образования с использованием блочной модели

Разработанный способ опережающей оценки участков техногенных образований с привязкой точки отбора пробы по глубине позволяет строить структурные модели техногенных образований по аналогии с ГГИС для рудных месторождений [98, 99]. Ранее такой возможности не было, ввиду усреднения и перемешивания шлама, компрессии и низкого выхода керна.

Для обоснования приоритетного порядка разработки неоднородных техногенных образований с выделением наиболее продуктивных зон, подлежащих первоочередной выемке, построена блочная модель двух разведанных участков техногенного золотосодержащего объекта Южного Урала. Исходными данными для построения блочной модели в Micromine послужили: 1) маркшейдерская съёмка мест отбора проб на каждом участке техногенного золотосодержащего объекта в режиме «Стой-Иди»; 2) распределение содержаний золота по глубине хвостохранилища по результатам экспресс-опробования свойств и состава техногенного сырья; 3) 3D-границы поверхностей техногенного образования в пределах их контуров в формате (*.dxf), импортируемые в Micromine из Autocad. Точная привязка полученных результатов экспресс-оценки техногенного сырья в хранилище отходов переработки руд позволила оцифровать данные и создать модели двух разведанных участков техногенного образования (рис. 4.1).

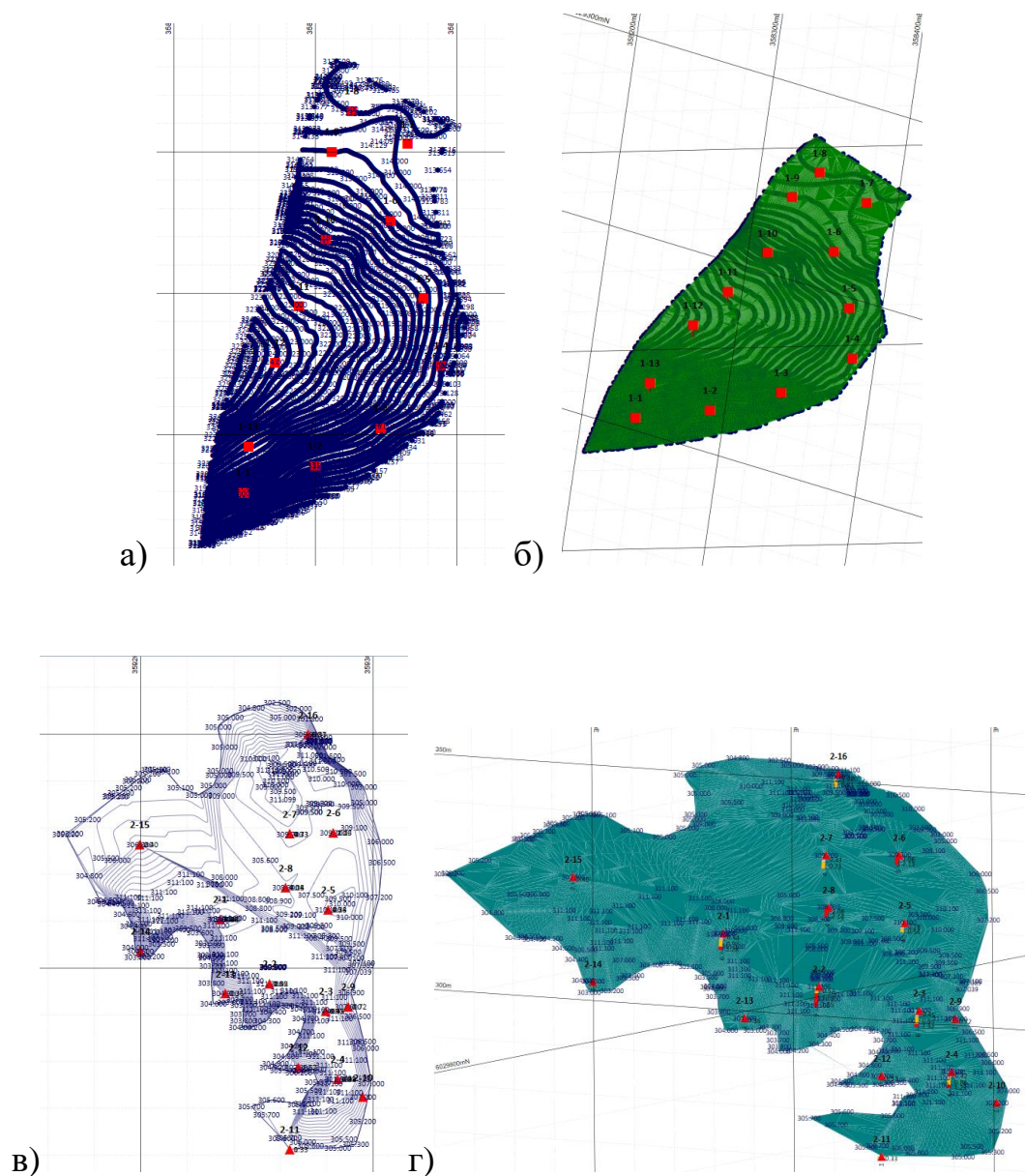


Рисунок 4.1 – Оцифровка 3D-поверхности техногенного образования в топоповерхность на разведанных участках: участок №1 (а, б) и участок №2 (в, г)

Для формирования базы данных проекта предварительно были созданы таблицы с координатами места отбора проб (рис. 4.2), производилось интерполирование на глубину содержания золота по опробованным скважинам с учётом их порядкового номера, интервала опробования в метрах (from-to) и содержания Au. Координаты мест опробования определены в ходе опережающего бурения по результатам экспресс-опробования пробуренных скважин. За счет встроенных алгоритмов проверки выявлялись возможные несоответствия при составлении базы данных.

№	x	y	z	h
1-1	358248.952	6029059.093	315.994	6.222
1-2	358299.703	6029077.967	315.148	5.590
1-3	358346.228	6029104.699	315.996	6.205
1-4	358388.847	6029148.904	315.672	5.986
1-5	358376.262	6029196.185	317.269	6.630
1-6	358353.070	6029251.573	315.160	3.165
1-7	358365.259	6029305.777	313.739	3.271
1-8	358325.675	6029328.864	313.500	2.813
1-9	358311.661	6029299.953	314.490	2.552
1-10	358307.172	6029238.037	318.360	5.471
1-11	358288.428	6029190.887	321.927	10.457
1-12	358271.542	6029151.028	323.995	13.187
1-13	358252.609	6029091.778	320.253	10.436

№	x	y	z	h
2-1	359234.115	6029820.932	309.900	5.934
2-2	359255.349	6029793.305	311.300	6.945
2-3	359279.578	6029781.707	311.400	5.820
2-4	359284.678	6029752.615	311.600	5.452
2-5	359280.579	6029825.032	310.100	3.974
2-6	359282.758	6029858.016	309.300	3.421
2-7	359264.066	6029857.397	309.700	4.135
2-8	359262.287	6029834.329	308.900	3.839
2-9	359289.199	6029783.602	307.600	1.157
2-10	359295.559	6029744.829	307.200	0.967
2-11	359264.034	6029722.538	305.700	1.000
2-12	359267.794	6029757.711	307.200	1.277
2-13	359236.364	6029789.060	304.900	1.195
2-14	359199.818	6029807.369	304.500	0.812
2-15	359199.504	6029852.875	306.800	1.968
2-16	359271.866	6029899.891	306.900	4.907

Рисунок 4.2 – Сформированные по результатам экспресс-оценки структуры техногенного образования уточнённые координаты места отбора проб на участках №1 (а) и №2 (б)

На этапе перехода к блочному моделированию файл опробования был преобразован, все пробы пересчитывались на 2 м композитный интервал (рис. 4.3).

№	from	to	C(Au).%	x	y	z	PT
1-1	0	2	0.30	358248.952	6029059.093	314.994	обрезанный каркас
1-1	2	4	0.62	358248.952	6029059.093	312.994	обрезанный каркас
1-1	4	6	0.94	358248.952	6029059.093	310.994	обрезанный каркас
1-2	0	2	0.33	358299.703	6029077.967	314.148	обрезанный каркас
1-2	2	4	0.71	358299.703	6029077.967	312.148	обрезанный каркас
1-2	4	5	0.99	358299.703	6029077.967	310.648	обрезанный каркас
1-3	0	2	0.24	358346.228	6029104.699	314.996	обрезанный каркас
1-3	2	4	0.49	358346.228	6029104.699	312.996	обрезанный каркас
1-3	4	6	0.75	358346.228	6029104.699	310.996	обрезанный каркас
1-4	0	2	0.27	358388.847	6029148.904	314.672	обрезанный каркас
1-4	2	4	0.56	358388.847	6029148.904	312.672	обрезанный каркас
1-4	4	5	0.78	358388.847	6029148.904	311.172	обрезанный каркас
1-5	0	2	0.30	358376.262	6029196.185	316.269	обрезанный каркас
1-5	2	4	0.60	358376.262	6029196.185	314.269	обрезанный каркас
1-5	4	6	0.92	358376.262	6029196.185	312.269	обрезанный каркас
1-6	0	2	0.58	358353.070	6029251.573	314.160	обрезанный каркас
1-6	2	3	1.18	358353.070	6029251.573	312.660	обрезанный каркас
1-7	0	2	0.50	358365.259	6029305.777	312.739	обрезанный каркас
1-7	2	3	1.02	358365.259	6029305.777	311.239	обрезанный каркас
1-8	0	2	0.47	358325.675	6029328.864	312.500	обрезанный каркас
1-9	0	2	0.81	358311.661	6029299.953	313.490	обрезанный каркас
1-10	0	2	0.33	358307.172	6029238.037	317.360	обрезанный каркас
1-10	2	4	0.69	358307.172	6029238.037	315.360	обрезанный каркас
1-10	4	5	0.96	358307.172	6029238.037	313.860	обрезанный каркас
1-11	0	2	0.23	358288.428	6029190.887	320.927	обрезанный каркас

Расчет композитов вдоль скважин

Ввод Вычисленные поля **Расчет композитов** Вывод

Композитный интервал

Диапазон композитов: ВСЕ

От

До

Мин. длина композита

Работа с остатком

Нет (исключить короткий остаток)

Добавить остаток к последнему интервалу

Распределить остаток между всеми интервалами

Метод по умолчанию

Числовые поля: СРЕДНЕВЗВЕШ (ДЛИНА)

Символьные поля: ПЕРВЫЙ

Процесс будет длиться дольше, если выбран метод ПО ПРЕВЛАДАЮЩЕМУ

Другие методы

Рисунок 4.3 – Пример расчёта композитов по одному из участков техногенного образования (а) с заданными параметрами (б)

Основание модели техногенного объекта ограничивалось контуром, отстроенным по нижним отметкам пробурённых скважин, исключая интервалы резкого падения содержания ценного металла, указывающего на перебур в подстилающие породы техногенного образования. Отстроенные каркасы разведанных участков хвостохранилища обрезались топоповерхностью при помощи функции пересечения каркасов (рис.4.4).

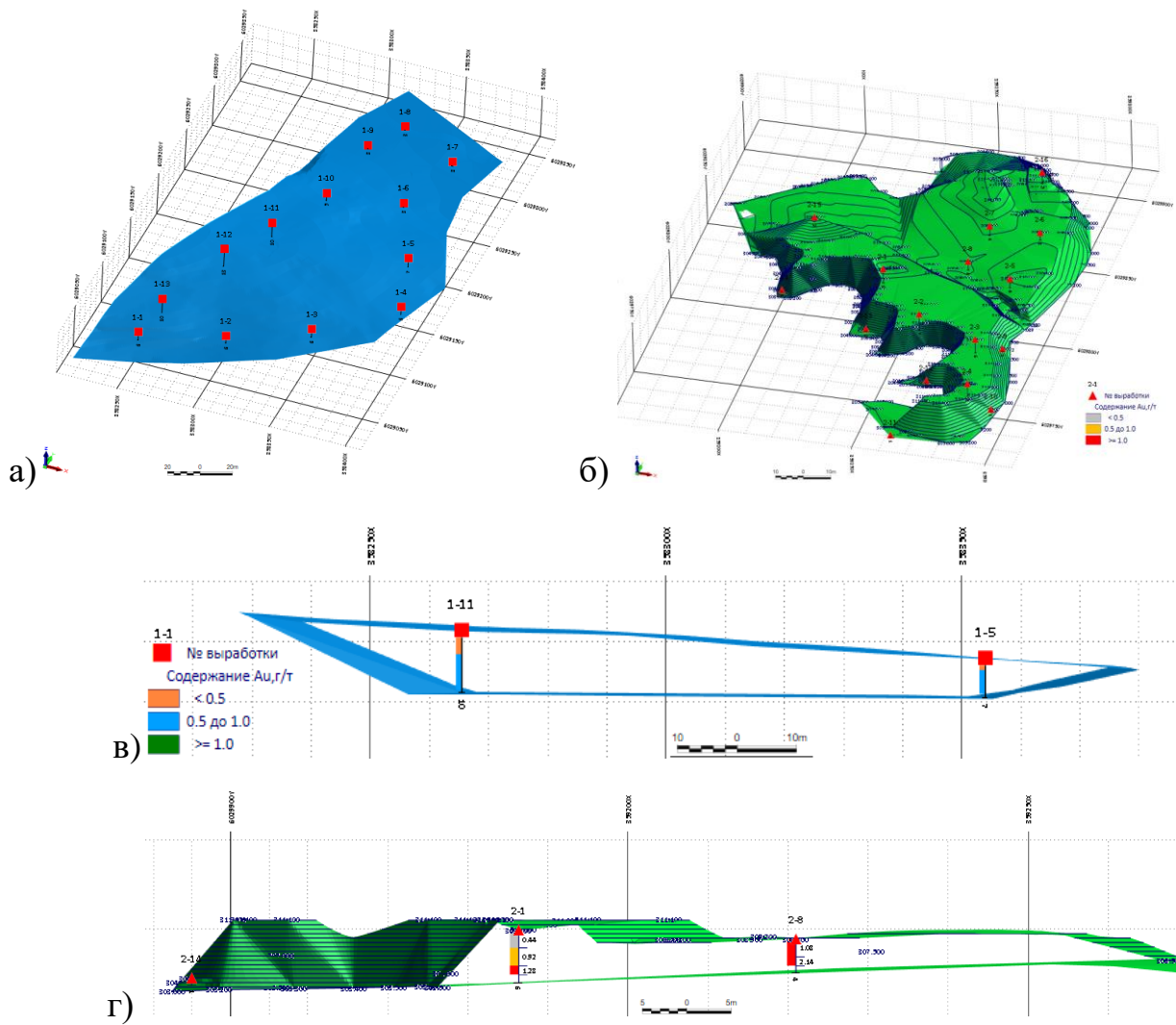


Рисунок 4.4 – Каркасные модели по двум отстроенным участкам техногенного образования в проекции (а, б) и на разрезе через разведочные скважины (в, г)

Размеры блока в модели составили 10x10x5 м, то есть 1/4 расстояния между разведочными выработками (рис. 4.5, а). В качестве метода субблокирования при создании пустой блочной модели применялись «субблоки» размером 2x2x2 м. Параметры и направление эллипсоида поиска выбирались с учётом неравномерной плотности разведочной сети и в соответствии с элементами простираения техногенного образования (рис. 4.5, б).

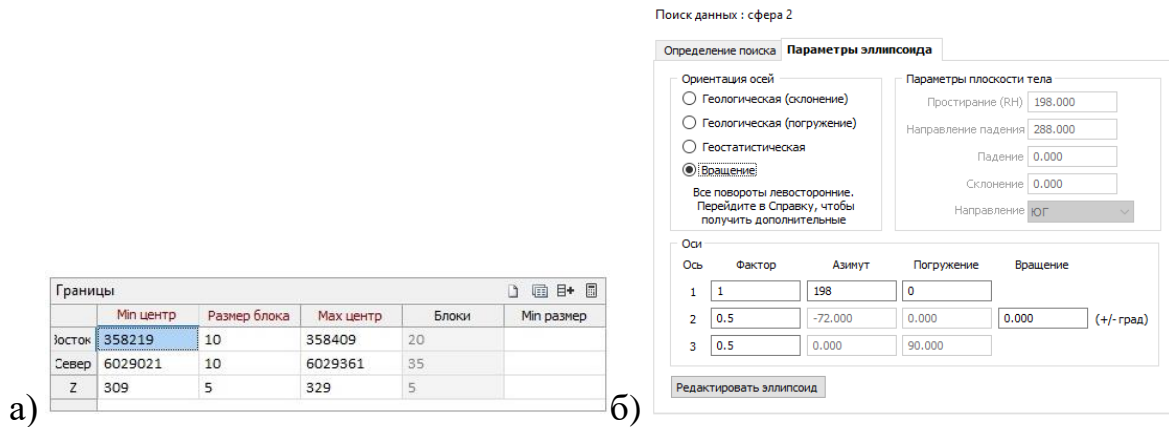


Рисунок 4.5 – Параметры блочного моделирования участка техногенного золотосодержащего образования: а) определяемые границы блочной модели; б) пространственная ориентация эллипсоида поиска

Результаты опробования техногенного образования интерполировалось в модель методом пространственной интерполяции обратных расстояний IDW второй степени. Композитные интервалы вдоль скважин составили 2 м. Оценка блоков каждого яруса производилась поэтапно путем нескольких прогонов с использованием приёма увеличения радиуса поиска в несколько раз: для первого разведанного участка радиус составил 40 и 80 м; для второго – 25 и 50 м. Построенная блочная модель по золоту двух участков техногенного образования представлена на рис. 4.6 и 4.7. Таким образом, по аналогии с разработкой рудных месторождений, для условий освоения хвостохранилищ получены данные о распределении качества техногенного сырья для оперативного планирования горных работ.

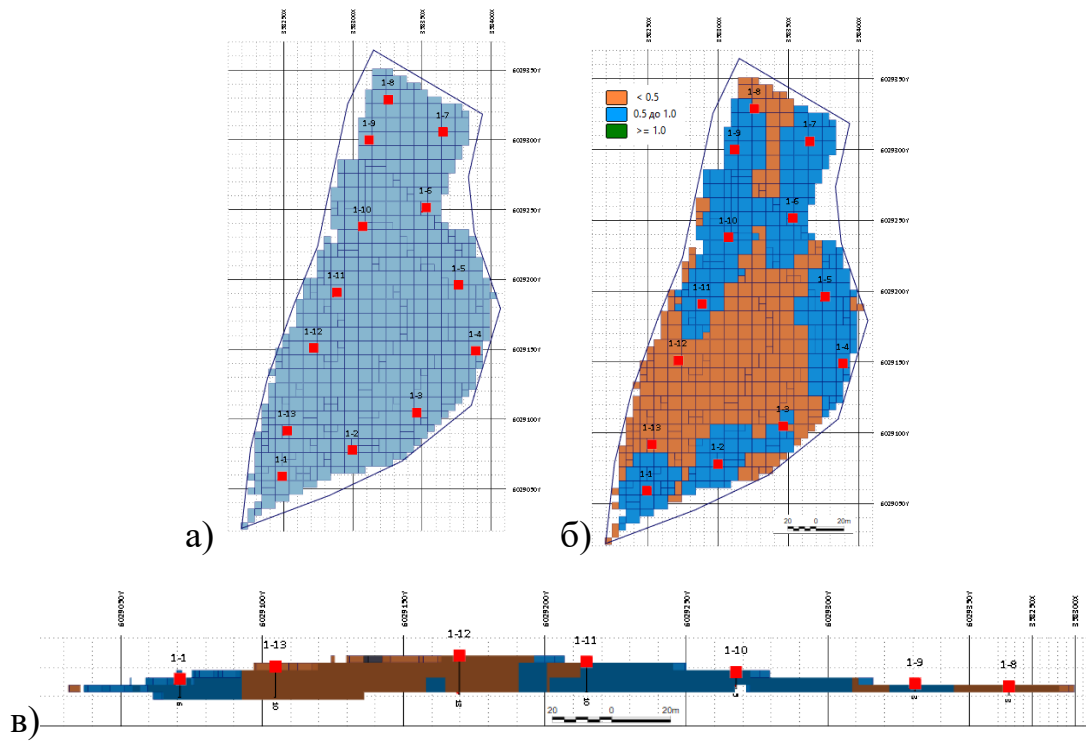


Рисунок 4.6 – Процесс интерполяции содержаний в прототип блочной модели разведанного участка №1: пустая блочная модель в границах отстроеного каркаса (а), вид в плане (б) и на продольном разрезе (в)

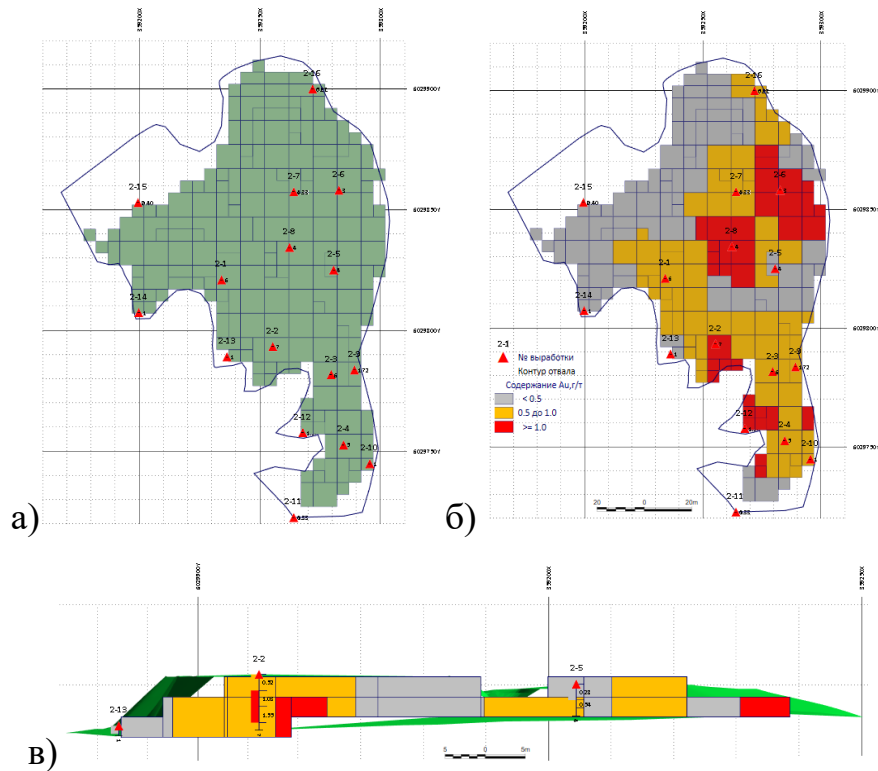


Рисунок 4.7 – Процесс интерполяции содержаний в прототип блочной модели разведанного участка №2: пустая блочная модель в границах отстроеного каркаса (а), вид в плане (б) и на разрезе через выработки №2 – 13, 2-2, 2-5 (в)

Сводные результаты подсчёта запасов техногенного золотосодержащего сырья по двум участкам хвостохранилища подсчитывались на основании набора бортовых содержаний в пределах отстроенных каркасов, ограничивающих блочные модели, и представлены в таблице 4.1. Объёмный вес золотосодержащих отходов золотодобычи составил 1,9 т/м³.

Таблица 4.1 – Результаты подсчета запасов золота по двум участкам техногенного золотосодержащего объекта в Южноуральском регионе

Разведанный участок №1					
Набор борга, г/т	Объём, м³	Объёмный вес, т/м³	Тоннаж, т	С_Au, г/т	Z_Au, кг
<0.5	110 375	1,9	209 712,5	0,2	41,9
0.5-1	89 437,5	1,9	169931,3	0,6	102
Всего:	199812,5		37 643,8		143,9
Разведанный участок №2					
Набор борга, г/т	Объём, м³	Объёмный вес, т/м³	Тоннаж, т	С_Au, г/т	Z_Au, кг
<0.5	19 812,5	1,9	37 643,78	0,2	7,5
0.5-1	21 562,5	1,9	40 968,8	0,8	32, 8
>1	6 625	1,9	12 587,5	1,2	15,1
Всего:	48 000		91 200		55,4

Таким образом, на примере блочного моделирования и подсчёта запасов золота в пределах двух разведанных участков техногенного объекта Южного Урала выделен наиболее перспективный участок для первоочередной отработки хвостохранилища, общие запасы золота в котором составили 55,4 кг. Исходя из полученных результатов подсчёта запасов по бортовым содержаниям ценного компонента, кондиционные участки со средним содержанием золота 0,8 и 1,2 г/т в их пределах представляются наиболее перспективными для первоочередной выемки с последующей переработкой техногенного сырья и доизвлечением благородных металлов. Оцифровка техногенного образования с точной привязкой к системе координат при моделировании в полном объёме выполняется по аналогии с методикой геологической оценки структуры и свойств складированного сырья, описанной в параграфе 2.1.

4.2 Принципы выбора направления фронта ведения открытых горных работ и этапов отработки Новотроицкого золото-мышьяковистого техногенного образования

Эффективное экологически сбалансированное освоение старогоднего техногенного объекта Южного Урала – Новотроицкого золото-мышьяковистого хвостохранилища предусматривается в два этапа: 1) выемки материала с целью извлечения ценных металлов, последующего обезвреживания и утилизации продуктов переработки золото-мышьяковистых отходов; 2) проведении биологической рекультивации земель, нарушенных открытыми горными работами, с возможностью создания на восстановленной территории объектов городской инфраструктуры.

Представленная на рисунке 4.8 блочная модель хвостохранилища построена по результатам экспресс-опробования структуры и свойств отходов техногенного образования с позиции выделения обогащённых участков по содержанию ценных металлов или токсичных примесей и их возможной отдельной выемки. Установленные в ходе моделирования закономерности распределения состава и свойств техногенного сырья на основе отходов переработки руд золота определяют выбор направления и очередности ведения открытых горных работ при освоении техногенного объекта, а также учитываются при технологической оценке качества перерабатываемого минерального сырья для получения концентратов с требуемым содержанием ценных металлов.

По результатам построения блочной модели проведено районирование техногенного объекта, установлено пространственное расположение в теле отвала продуктивных зон с содержанием золота более 0,4 г/т и некондиционных участков, переработка которых в едином цикле с рудами золота может привести к значительному снижению уровня извлечения ценного металла из перерабатываемого сырья.

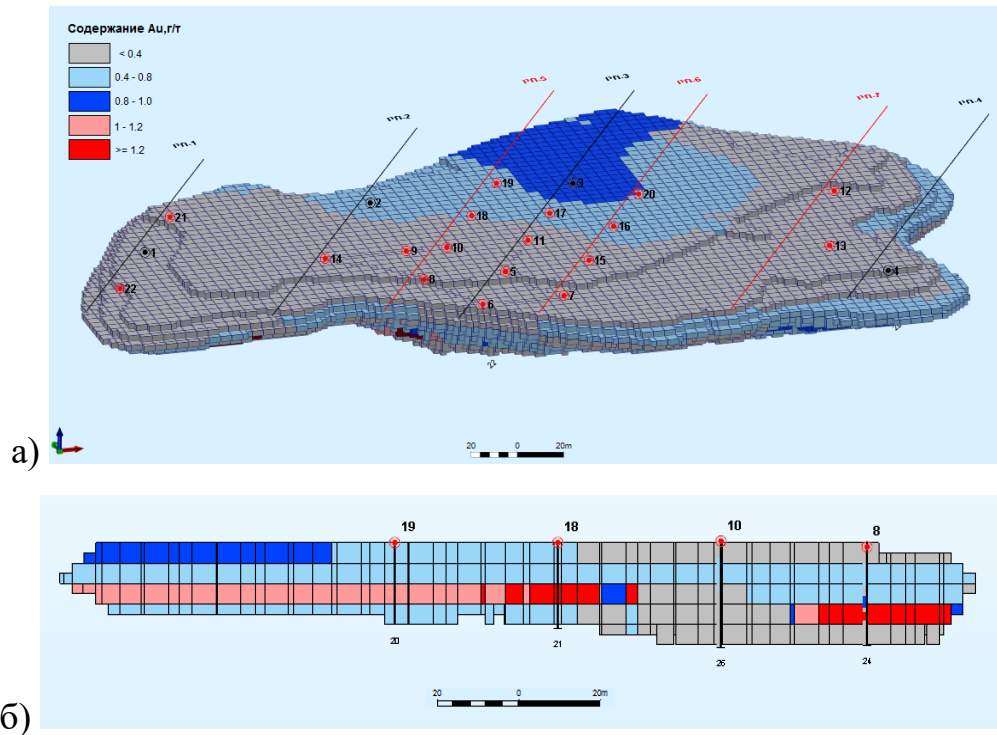


Рисунок 4.8 – Зональность распределения содержаний золота в блочной модели техногенного образования в проекции (а) и на разрезе через скв. №19-18-10-8 (б), определяющая выбор направления первоочередной разработки

Оценка объёмов складированного техногенного сырья и подсчёт запасов золота показали наличие зон, обогащённых по содержанию ценного металла, в количестве не более 136 тыс. м³ в общей массе хвостохранилища (табл. 4.2), что свидетельствует о неперспективности отдельной выемки зонированных участков техногенного образования ввиду его малых объёмов. Среднее содержание золота в подсчётных блоках практически не отличается и приближено к значению 0,5 г/т. Концентрация золота в приповерхностном слое техногенного образования в зоне активной аэрации составляет не более 0,3 г/т.

Таблица 4.2 – Сводная таблица подсчёта запасов золота в старогоднем хвостохранилище Новотроицкой фабрики по результатам опережающей оценки структуры техногенного объекта

Подсчетный блок	Объёмный вес, т /м ³	Объём, м ³	Запасы руды, т	Среднее содержание Au, г/т	Запасы Au, кг
Разведанные	1,6	55 394	88 631	0,43	38,2
Оцененные	1,6	1 045 299	1 672 478	0,54	908,4
<i>Итого:</i>		1 100 693	1 761 109		946,6

Исходя из полученных результатов детального обследования Новотроицкого хвостохранилища предпочтительен механизированный способ разработки с выемкой сырья по периферии техногенного объекта, аналогично веерной сплошной рассредоточенной системе разработки с продвижением фронта работ с юго-востока на северо-запад. Вскрытие техногенного образования предусматривает проведение комплекса подготовительных работ по предварительному осушению рабочей зоны техногенного образования с формированием пруда-накопителя. Данное решение обеспечит сбор поверхностных вод с территории горных работ в период дождей и снеготаяния, а также вод из обводнённых зон отвала, вскрытых по мере его разработки с пониженной части рельефа. При отработке сильно обводнённых участков для повышения прочностных свойств сырья и устойчивости поверхности отвала при размещении горной техники рекомендуется использовать период отрицательных температур с целью обеспечения промерзания грунта [71]. Схема порядка производства горных работ и расположения основных объектов при разработке техногенного образования представлена на рисунке 4.9.

В силу характера рельефа в западной части техногенного объекта наблюдается минимальное превышение абсолютной отметки его поверхности над господствующим рельефом, следовательно, на восточном и юго-восточном участке – его максимальная высота. Предположительно, складирование отходов обогащения руд Новотроицкой фабрики проводилось с севера на юг, что и обусловило разность абсолютных отметок поверхности хвостохранилища и рельефа местности до 20 м. Таким образом, высота уступа по условиям безопасного выполнения работ составляет 15 м с делением на подступы на восточном и юго-восточном участке разработки техногенного образования.



Рисунок 4.9 – Схема разработки Новотроицкого хвостохранилища, предусматривающая порядок и направление выемки техногенного золото-мышьяковистого сырья

Северная, восточная и южная части хвостохранилища имеют сопряжение с действующими автомобильными дорогами, по которым осуществляется городское транспортное сообщение. Погружённая в автосамосвалы порода техногенного образования по существующим дорогам перемещается до промплощадки Пластовской ЗИФ с разгрузкой на площадке усреднительных складов для последующей дезактивации и извлечения ценных компонентов. Поскольку техногенный объект расположен в городской черте, минимизация воздействия на окружающую среду в период его разработки осуществляется путем максимальной изоляции техногенного сырья в процессе добычи и транспортирования. При перемещении материала хвостохранилища предусматривается использование полога для укрытия отходов в кузове автосамосвала. Минимизация воздействия на атмосферу в процессе выемочно-погрузочных работ достигается принятым порядком организации работ с пылеподавлением в сухой и жаркий период года.

С учётом строения, состава и физико-механических свойств техногенного сырья для разработки хвостохранилища рекомендуется следующее горнотранспортное оборудование, имеющееся на предприятии, и способное обеспечить устойчивость горных конструкций и требуемую производительность с

возможностью работы в городских условиях, в первую очередь, для движения по существующим автомобильным дорогам:

- выемочное оборудование: экскаватор Hyundai R800LC; колёсный погрузчик Hyundai HL 780 или Hyundai HL 730;
- транспортное оборудование: автосамосвалы Shacman 366 или Shacman 384, бульдозер Т-35-01;

Ширина проезжей части рассчитывается по нижеприведённой формуле:

$$П_{п} = 2 \cdot (a + y) + x, \quad (4.1)$$

где a – ширина автосамосвала; y – ширина предохранительной полосы между автомобилем и краем проезжей части; x – безопасный зазор между встречными машинами.

Так, $П_{п} = 2 (2,5 + 0,5) + 1,0 = 7 \text{ м}$.

В соответствии со сводом правил по промышленному транспорту значение ширины проезжей части принято 7,5 м. Высота предохранительного вала принимается не менее 0,5 диаметра колеса автосамосвала максимальной грузоподъемности. Диаметр колеса автосамосвала Shacman 366 составляет 1,07 м. Таким образом, высота предохранительного вала составляет 0,7 м, ширина вала – 2 м. С учётом ширины призмы возможного обрушения рекомендуемая ширина транспортной бермы – 15 м (рис. 4.10).



Рисунок 4.10 – Поперечный профиль транспортной бермы

Определение предельного угла откоса уступа, обеспечивающего безопасность ведения открытых горных работ на техногенном образовании, проводилось по методу снижения прочности. В качестве основы для расчёта принималась геомеханическая модель, геометрические параметры которой

определяются длиной основания, принятой 320 м, превышением между краями основания насыпи, равным 6 м, высотой насыпи мощностью 14 м и наличием слабого прослоя толщиной 1 м. По результатам расчёта угол откоса, при котором обеспечивается устойчивость формируемой насыпи техногенного сырья, составил 50° .

Комплекс работ при освоении экологически опасного техногенного образования с последующей рекультивацией территории предусматривает выполнение планировочных работ по подготовке и предварительному выравниванию поверхности хвостохранилища и разработку техногенного образования с выемкой и транспортированием материала до усреднительного склада перерабатывающей фабрики. Технологическая схема проведения планировочных работ представлена на рисунке 4.11.

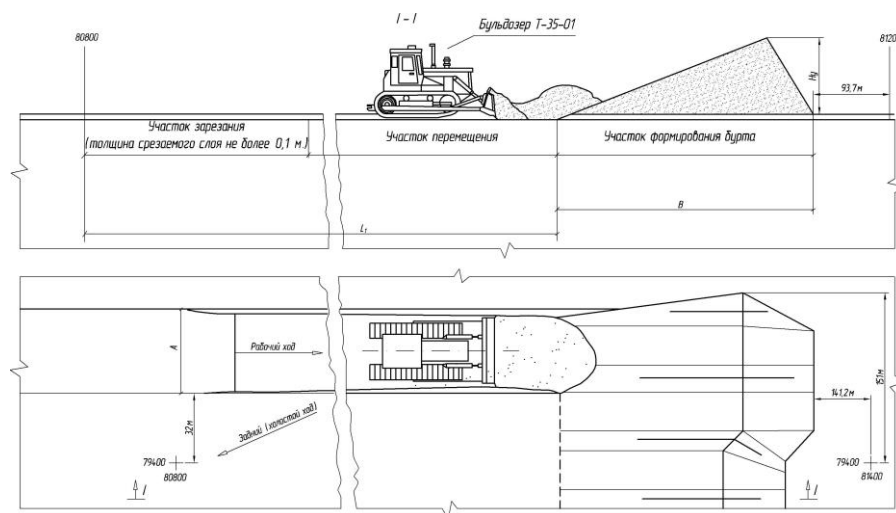


Рисунок 4.11 – Технологическая схема работы бульдозера Т-35-01 на планировочных работах при разработке Новотроицкого хвостохранилища

Технология и порядок производства выемочно-погрузочных и горнотранспортных работ при разработке техногенного золото-мышьяковистого образования показана на технологических схемах (рис. 4.12).

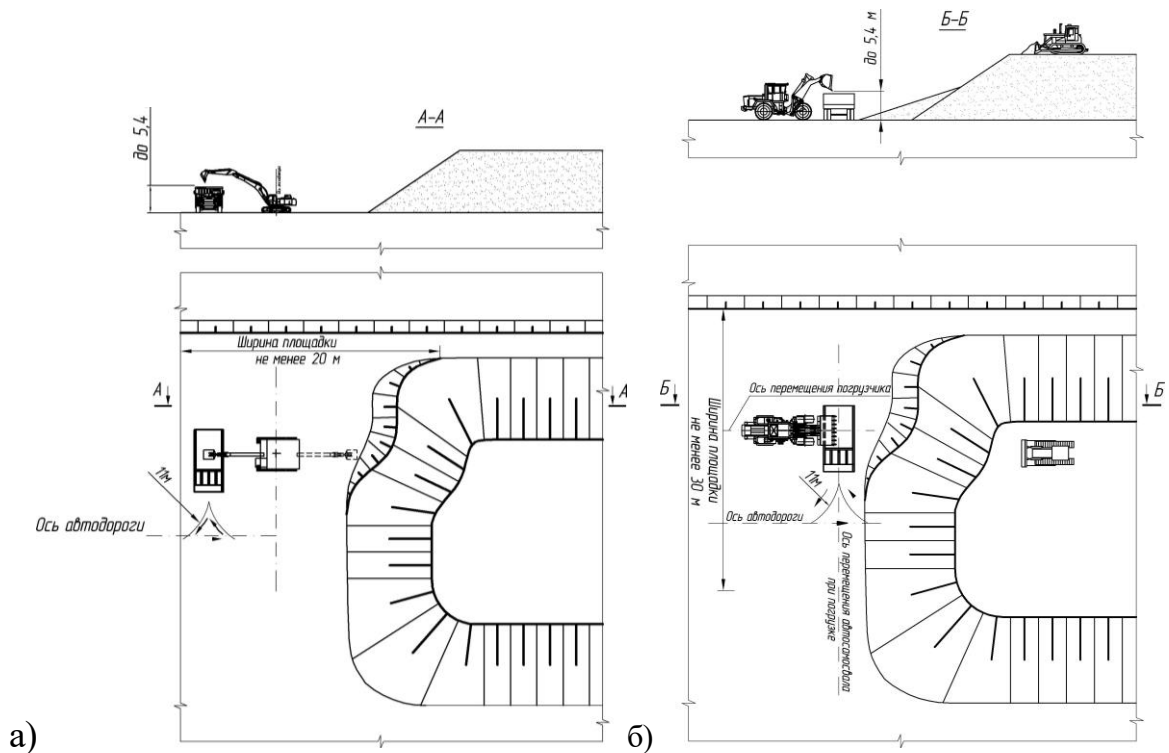


Рисунок 4.12 – Технологические схемы производства выемочно-погрузочных и горнотранспортных работ, предусматривающие отгрузку техногенного сырья экскаватором Hyundai R800LC (а) и погрузчиком Hyundai HL 780 (б) в автосамосвалы Shacman 366

После отработки всего объёма складированного техногенного сырья предусматривается организация рельефа в соответствии с выбранным направлением рекультивации земель, нарушенных открытыми горными работами. С целью восстановления рельефа до требуемых абсолютных отметок предусматривается использование вскрышных пород и иных материалов, являющихся инертными и пригодными по физико-механическим характеристикам для осуществления работ по планированию земельного участка. Поскольку разрабатываемый техногенный объект представляет собой горнопромышленный ландшафт, формирование которого обусловлено многовековой деятельностью градообразующего золотодобывающего предприятия Южного Урала, предусматривается восстановление его природоохранной и эстетической ценности в соответствии с потребностями населения.

4.3 Технико-экономическая оценка рекомендаций по разработке Новотроицкого хвостохранилища и переработке техногенного сырья с использованием мощностей действующей золотоизвлекательной фабрики на Южном Урале

В целях определения перспективности переработки лежалых техногенных отходов золотодобычи в едином цикле с рудами месторождения на Южном Урале выполнены исследования по выщелачиванию благородных металлов по схеме, принятой на действующей золотоизвлекательной фабрике. Исследования по обоснованию параметров эффективной технологии переработки техногенного сырья проводились в обособленном подразделении лаборатории ЭКОН ИПКОН РАН на Южном Урале [69]. Методика подготовки технологической пробы для проведения эксперимента заключалась в дополнительном измельчении техногенного сырья готового класса крупности $-0,075$ мм до содержаний 75%, 80%, 85% и 90 %. В качестве дробящей среды использована шаровая загрузка. Истирание выполнялось сухим способом в лабораторном стаканчиковом вибрационном истирателе (рис. 4.8, а). Время истирания подбиралось экспериментальным путем экспресс-отмывкой отходов переработки руд на контрольном сите – $0,075$ мм. Методика и лабораторное оборудование при выполнении эксперимента представлены на рисунке 4.13.

В ходе опытно-промышленных испытаний по выщелачиванию золота из отходов обогащения золото-мышьяковистых руд варьировались крупность помола, концентрация цианида натрия, продолжительность выщелачивания. Расход СаО, объём растворителя, объём агитационной емкости, скорость вращения ротора агитатора и плотность пульпы принимались неизменными (табл. 4.3). Расход извести принимался с учётом фактической активности извести, имеющейся в исследовательской лаборатории. Активность извести определялась экспериментальным путем. Расход СаО составил 3 кг/т хвостов. Содержание твердого в пульпе принималась равным 45%.

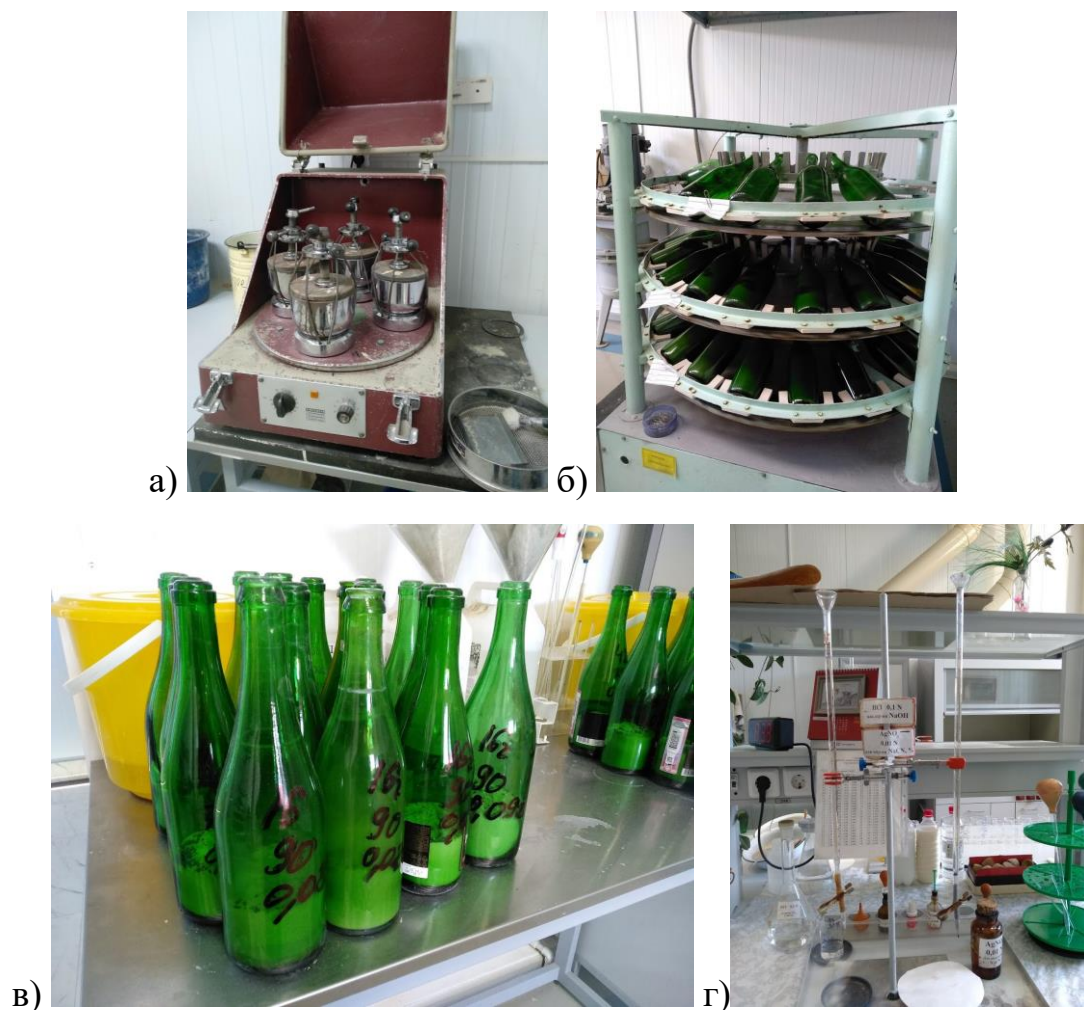


Рисунок 4.13 – Оборудование исследовательской лаборатории, использованное при проведении испытаний: лабораторный стаканчиковый истиратель для обеспечения требуемой крупности хвостов (а); бутылочный агитатор с размещёнными емкостями (б); емкости с измельчёнными хвостами, подготовленные для эксперимента (в); стенд для титрования (г)

Таблица 4.3 – Матрица планирования эксперимента по выщелачиваю отходов переработки руд методом «уголь в пульпе»

Серия опытов	Изменяемые параметры		
	Время агитации, час	Крупность материала, мм	Исходная концентрация NaCN, %
1	+	-	-
2	-	+	-
3	-	-	+

+ - варьируемый параметр в данной серии опытов

Расход цианида натрия в серии опытов составил 0,02%, 0,03%, 0,07% и 0,09%. Ввиду повышенного расхода реагента при длительном выщелачивании, в

течение 42 часов пульпу подкрепляли. Время агитации варьировалось от 16 до 42 часов. Верхний предел времени проведения агитации определялся, исходя из полного цикла цианирования на обогатительной фабрике. В ходе проведения испытания установлено, что отходы переработки золото-мышьяковистых руд относятся к легкоцианируемому сырью, так как даже при концентрации реагента 0,02% за 16 часов цианирования достигается извлечение металла на уровне 65%, что сопоставимо с фактическими показателями работы фабрики. Сводная таблица результатов выщелачивания с показателями извлечения золота больше 76 % представлена в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Систематизированные показатели извлечения золота по результатам цианирования техногенного сырья в исследовательской лаборатории

Доля готового класса -0,075 мм, %	Время выщелачивания, час	Концентрация цианида в растворе, %	Извлечение золота, %
75,0	16	0,090	77,2
	24	0,090	77,9
	30	0,090	76,9
	42	0,090	84,9
80,0	16	0,090	79,2
	24	0,070	86,5
	30	0,030	80,4
	42	0,030	88,2
85,0	16	0,070	85,3
	24	0,070	87,4
	30	0,030	88,2
	42	0,030	84,9
90,0	16	0,090	83,3
	24	0,090	81,1
	30	0,090	83,3
	42	0,090	84,9

Анализ данных, представленных в таблице свидетельствует о том, что увеличение тонины помола до 80% готового класса -0,075 мм позволяет незначительно повысить уровень извлечения золота с 77,2 до 79,2%. Вместе с тем, максимальное извлечение золота на уровне 88,2% при цианировании 80% готового класса -0,075 мм сопоставимо с таковым при цианировании исходного сырья. Дальнейшее увеличение тонины помола не оказывает существенного влияния на возможности повышения технико-экономических показателей

переработки лежалых отходов переработки руд. При выщелачивании тонких фракций на протяжении 30 часов обеспечивается извлечение ценного металла на уровне более 88,2%, а увеличение продолжительности цианирования до 42 часов во всех сериях опыта значительно снижает показатель извлечения золота. Показано, что выщелачивание золота благоприятно протекает при самых низких концентрациях реагента, что указывает на хорошее раскрытие сульфидных минералов и определяет оптимальные технико-экономические при переработке сырья в связи с низким расходом реагента.

Результаты проведённых исследований показали перспективность переработки техногенного золотосодержащего сырья цианированием в условиях действующей золотоизвлекательной фабрики на Южном Урале. Без предварительного доизмельчения материала прогнозируемый уровень извлечения золота составит не менее 65%. Высокие показатели извлечения золота достигаются при цианировании сырья в растворах NaCN концентрацией 0,09%, в течение 42 часов при измельчении до 75% готового класса -0,075 мм, что соотносится с реальными условиями полного цикла выщелачивания на фабрике.

Учитывая высокую привлекательность и перспективность переработки техногенного золото-мышьяковистого сырья в условиях действующей обогатительной фабрики Южного Урала, с подшихтовкой к золотосодержащим рудам, благоприятными факторами для разработки старогоднего хвостохранилища с минимальными капитальными затратами являются:

- расположение объекта по отношению к объекту перерабатывающего комплекса: Пластовской ЗИФ;
- доступное транспортное сообщение техногенного объекта с действующими автомобильными дорогами;
- наличие оборудования для выполнения подготовительных, планировочных и выемочно-погрузочных работ в резерве у горнодобывающего предприятия АО «ЮГК»;
- наличие резервных мощностей Пластовской ЗИФ по рудоподготовке;

– наличие оборудования, способного обеспечить доизмельчение хвостов обогащения с содержанием до 75% готового класса крупности $-0,075$ мм.

Таким образом, основную долю затрат при освоении техногенного золотосодержащего образования составляют транспортные расходы на отгрузку и доставку техногенного сырья от рабочего забоя до склада перерабатывающей фабрики, также при ведении горных работ в период ливневых дождей и паводка могут потребоваться дополнительные затраты.

В настоящее время технология переработки руды включает двухстадиальное дробление, одностадиальное измельчение в шаровых мельницах, работающих в цикле со спиральными классификаторами. Вторая стадия классификации проводится в гидроциклонах. Измельчённая руда сгущается в трех сгустителях. Слив сгустителей направляется в сгуститель, который выполняет функции чана оборотной воды. Сгущённый продукт собирается в сгустителе, который выполняет функции накопительного чана, откуда пульпа по трубопроводу направляется на Пластовскую ЗИФ, где подвергается сорбционному цианированию в цепочке пачуков по технологии «уголь в пульпе».

В рамках обоснования стратегии вовлечения отходов обогащения руд в повторную переработку целесообразно вывести одну из шаровых мельниц для работы на техногенном сырье [110]. При подготовке проекта к опытно-промышленной апробации технологии необходимо определить условия и технологию обособленной подачи хвостов в мельницу. Учитывая работу мельниц в замкнутом цикле со спиральными классификаторами, целесообразно в опытно-промышленном режиме определить параметры измельчения хвостов до 75% класса крупности $-0,075$ мм. Вещественный состав хвостов обогащения позволяет объединить доизмельчённые хвосты с измельчённой рудой, а сгущённую объединённую пульпу по трубопроводу направить на переработку на обогатительную фабрику.

Поскольку производительность при разработке хвостохранилища ограничена технологическими возможностями Пластовский ЗИФ, производительность участка ведения горных работ определена в 200 тыс. т в

месяц, исходя из следующего:

– проектная и фактическая производительность Пластовской ЗИФ составляет 5 млн т/год и 350 тыс. т/мес., в том числе 250 тыс. т/мес. приходится на перерабатываемые отходы;

– согласно техническому заданию срок ведения горных работ не должен превышать одного года.

Производительность участка в 200 тыс. т/мес. позволяет отработать техногенное образование в течение одного календарного года, при этом непосредственно выемка сырья для отгрузки на склад обогатительной фабрики не превысит 9 месяцев, работы по восстановлению, планировке и благоустройству нарушенной горными работами территории отвала будут реализованы в срок до 3 месяцев. Кроме того, не потребуется дополнительное горнотранспортное оборудование на участок ведения разработки отвала за счёт его переброски с работ по переработке хвостов действующего хвостохранилища, что снизит производительность на нём в 5 раз. Календарный план работ по освоению техногенного золото-мышьяковистого хвостохранилища с учётом производственной мощности перерабатывающей фабрики представлен в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Календарный план ведения горных работ при освоении Новотроицкого золото-мышьяковистого хвостохранилища

Вид работ	Объём	Производительность	Срок выполнения, мес.													
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Удаление приповерхностного слоя	71,6 тыс. м ³	1,5 тыс. м ³ /см	■													
Выемка и перевозка техногенного сырья	1 100 тыс. м ³ 1 761 тыс. т	341 т/сут.	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■			
Восстановление рельефа	86,0 тыс. м ³	1,5 тыс. м ³ /см											■			
Планировочные работы	100,0 тыс. м ²	7,3 тыс. м ² /см												■		
Нанесение почвенного слоя	20,0 тыс. м ³	1,5 тыс. м ³ /см													■	

Таким образом, продолжительность разработки Новотроицкого хвостохранилища с последующей рекультивацией нарушенных земель составит 1

год. Всего в Южноуральском регионе обнаружено более 40 техногенных объектов отходов добычи и переработки руд золота.

Согласно выполненному моделированию техногенного образования объём складированных отходов составил 1 100 693 м³. С учётом средней плотности материала 1,6 т/м³ масса перерабатываемого материала составила 1 761 109 т. Объём поверхностного слоя мощностью до 1 м подлежит извлечению и временному складированию для последующего использования при планировочных работах и составляет в естественном состоянии 71,6 тыс. м³, в разрыхлённом виде – 86 тыс. м³. Объём планировочных работ после добычи и транспортирования техногенного сырья до склада золотоизвлекательной фабрики составит 100 тыс. м². Объём работ по нанесению почвенного слоя мощностью 0,2 м составит 20 тыс. м³.

Расчёт необходимого количества горнотранспортного и вспомогательного оборудования выполнен в соответствии с утверждёнными методиками и рекомендациями, с учётом круглогодичной работы в 2 смены по 8 часов. Сменная производительность бульдозера при планировочных работах определяется по формуле:

$$P_{пл} = \frac{3600 \cdot T_{см} \cdot L \cdot (1 \cdot \sin \alpha - C) \cdot K_b}{n \cdot \left(\frac{L}{v} + T_p \right)}, \quad (4.2)$$

где L – длина планируемого участка, м;

α – угол установки отвала бульдозера, град;

C – ширина перекрытия смежных проходов;

K_b – коэффициент использования бульдозера во времени;

n – число проходов бульдозера по одному месту;

T_p – время разворота, с;

v – средняя скорость движения бульдозера, м/с.

Таким образом, сменная производительность бульдозера составила:

$$P_{пл} = \frac{3600 \cdot 8 \cdot 30 \cdot (1 \cdot 0,8192 - 0,5) \cdot 0,8}{1 \cdot \left(\frac{30}{1,5} + 10 \right)} = 7354 \text{ м}^2$$

Продолжительность планировочных работ на участке рекультивации с учётом объёма выполняемых работ составит не более 15 суток при использовании одного бульдозера Т-35-01.

Для выполнения работ по выемке сырья техногенного образования и погрузки в автосамосвалы принимается один погрузчик Hyundai HL780 с ёмкостью ковша 6 м³, работающий в паре с экскаватором Hyundai R800LC. В качестве резервного оборудования принят экскаватор Hyundai HL730. Количество рабочих дней одного погрузчика при принятом режиме работы составило 322 дня.

Производительность погрузчика Hyundai HL780 определена по формуле:

$$H_B = (T_{CM} - T_{ПЗ} - T_{ПН}) \times Q_{ТЦ} / (T_{ПС} + T_{УП}), \quad (4.3)$$

где T_{CM} – продолжительность смены, мин;
 $T_{ПЗ}$ – время подготовительно-заключительных операций, мин;
 $T_{ПН}$ – время на личные надобности, мин;
 $T_{ПС}$ – время погрузки одного самосвала, мин;
 $Q_{ТЦ}$ – объём кузова автосамосвала в целике, м³;
 $T_{УП}$ – время установки автосамосвала под погрузку, мин.

Таким образом, производительность погрузчика составила:

$$H_B = (480 - 35 - 10) \times 19,76 / (4,79 + 0,3) = 1\,689 \text{ м}^3/\text{см}$$

Годовая производительность погрузчика с учётом подчистки подъездов составила 1 055 тыс. м³/год.

Для перевозок материалов от пунктов их погрузки до промплощадки Пластовской ЗИФ при освоении хвостохранилища с целью последующей переработки предусматривается использование автосамосвалов Shacman 366 и Shacman 384. Результаты расчета необходимого количества автосамосвалов для выполнения указанных работ в срок до 9 месяцев представлены в таблице 4.6.

Таким образом, для выполнения указанных объёмов работ в течение 9 месяцев предусмотрено 3 автосамосвала Shacman 366 или 4 автосамосвала Shacman 384. С учётом рассчитанного количества выемочно-погрузочного, горнотранспортного и вспомогательного оборудования, рекомендуемого при освоении хвостохранилища, ориентировочные затраты составили 23,39 млн руб. (табл.4.7).

Таблица 4.6 – Расчёт необходимого количества автосамосвалов Shacman 366 и Shacman 384 при погрузке техногенного сырья

№ пп	Наименование показателей	Ед.изм.	Показатели	
			Shacman 366	Shacman 384
1	Объем перевозок	тыс.м ³	1100,6	1100,6
		тыс.т	1761,0	1761,0
2	Суточный объем породы	т	639,0	639,0
3	Расчетный суточный объем перевозок при $K_{пер}=1,15$	т	734,9	734,9
4	Средневзвешенная дальность транспортирования	км	6,5	6,5
5	Фактическая грузоподъемность автосамосвала	т	31	25
6	Средняя скорость движения	км/час	25	25
7	Время одного рейса а/с:			
	-погрузка	мин.	4,6	3,7
	-время хода туда и обратно	мин.	31,2	31,2
	-разгрузка	мин.	1,0	1,0
	-ожидание и маневр	мин.	1,0	1,0
8	Время оборота автосамосвала	мин.	37,8	36,9
9	Продолжительность смены	мин.	480	480
10	Время на подгот. - закл. операции	мин.	30	30
11	Время на личные надобности	мин.	10	10
12	Чистое время работы автосамосвала в сутки	мин.	440	440
13	Количество рейсов автосамосвала в смену	рейс	11	11
14	Суточная производительность автосамосвала	т	341	275
15	Рабочий парк автосамосвалов: расчетный/принят	шт.	1,9	2,3
			2	3
16	Списочный парк автосамосвалов $K_{ин}=1.15$: расчетный/принят	шт.	2,3	3,45
			3	4
17	Годовой пробег всех автосамосвалов ($K_{пр}=1.1$)	тыс.км/ год	47	41

Таблица 4.7 – Ориентировочные затраты на выполнение работ по разработке техногенного золото-мышьяковистого образования с последующей рекультивацией территории

Наименование работ или затрат	Объём работ	Стоимость работ	Общая стоимость, млн. руб.
1. Добыча и транспортирование			
Подготовка, выемка и погрузка приповерхностного слоя	71,6 тыс. м ³	8,4 руб./м ³	0,6
Выемка и погрузка пород для перевозки на площадку Пластовкой ЗИФ для последующей дезактивации и попутного извлечения благородных металлов	1 100 тыс. м ³	8,2 руб./м ³	9,02
Перевозка материала хвостохранилища до Пластовской ЗИФ	1 100 тыс. м ³	12 руб./м ³	13,2
Восстановление рельефа	86,0 тыс. м ³	3,8 руб./м ³	0,32
2. Биологический этап рекультивации			
Планировка поверхности участка отвала вскрышных пород	100 тыс. м ²	1,7 руб./м ²	0,17
Нанесение почвенного слоя	20 тыс. м ³	4,2 руб./м ³	0,08
Итого			23,39

Таким образом, за счёт переработки всего объёма техногенного золотосодержащего сырья в условиях действующей обогатительной фабрики, при извлечении золота на уровне 70% возможно получение дополнительной прибыли по готовой товарной продукции в количестве 3 млрд рублей, окупаемость инвестиционных затрат на проведение работ по разработке хвостохранилища в таком случае составит менее одного месяца.

Выводы по 4 главе:

1. Показано, что разработанный способ опережающей оценки участков техногенных образований с привязкой точки отбора пробы по глубине позволяет строить структурные модели техногенных образований, по аналогии с ГГИС для рудных месторождений. Ранее такой возможности не было, ввиду усреднения и перемешивания шлама, компрессии и низкого выхода керна.

2. По результатам построения блочной модели проведено районирование техногенного объекта, установлено пространственное расположение в теле отвала продуктивных зон с содержанием золота более 0,4 г/т и некондиционных участков, переработка которых в едином цикле с рудами и отходами золота нецелесообразна. Такие участки подлежат первоочередной отработке, а извлечённые отходы – утилизации.

3. С учётом строения, состава и физико-механических свойств техногенного сырья для разработки хвостохранилища рекомендуется следующее горнотранспортное оборудование, имеющееся на предприятии, и способное обеспечить устойчивость горных конструкций и требуемую производительность с возможностью работы в городских условиях, в первую очередь, для движения по существующим автомобильным дорогам: выемочное оборудование: экскаватор Hyundai R800LC; колесный погрузчик Hyundai HL 780 или Hyundai HL 730; транспортное оборудование: автосамосвалы Shacman 366 или Shacman 384, бульдозер Т-35-01. Определены параметры горнотехнических конструкций и предложены технология и порядок производства выемочно-погрузочных и горнотранспортных работ при разработке техногенного золото-мышьяковистого образования.

4. Поскольку разрабатываемый техногенный объект представляет собой горнопромышленный ландшафт, формирование которого обусловлено многовековой деятельностью градообразующего золотодобывающего предприятия Южного Урала, показана целесообразность восстановления его природоохранной и эстетической ценности в соответствии с потребностями населения.

5. Результаты проведённых исследований показали перспективность переработки техногенного золотосодержащего сырья цианированием в условиях действующей золотоизвлекательной фабрики на Южном Урале. Без предварительного доизмельчения материала прогнозируемый уровень извлечения золота составит не менее 65%. Высокие показатели извлечения золота достигаются при цианировании сырья в растворах NaCN концентрацией 0,09% в течение 42 часов при измельчении до 75% готового класса -0,075 мм, что соотносится с реальными условиями полного цикла выщелачивания на фабрике. Таким образом, в результате переработки техногенного сырья Новотроицкого хвостохранилища будет извлечено не менее 662 кг золота, что позволит получить дополнительную прибыль в количестве 3 млрд рублей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся завершённой научно-квалификационной работой, изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, имеющие значение для развития минерально-сырьевой базы золотодобычи – разработана методика выбора и обоснованы параметры технологии открытой разработки техногенных образований из отходов переработки золотосодержащих руд, сложенных неоднородными участками, оперативный учёт которых в ходе опережающей оценки структуры разрабатываемых объектов обеспечивает безопасность работ и высокую технико-экономическую эффективность геотехнологических решений.

Основные научные и практические результаты работы состоят в следующем:

1. Разработана методика выбора параметров открытой разработки техногенных образований на основе тонкодисперсных отходов переработки золотосодержащих руд, отличающаяся тем, что в состав технологических процессов включена опережающая оценка строения и структуры техногенных образований на базе применения способа видеоэндоскопического обследования и точечного опробования техногенного сырья из стенок скважин с привязкой точки отбора пробы к системе координат. Доказано, что это обеспечивает своевременное выявление неоднородных участков, возможность эффективного управления качеством на базе актуальной информации, а также позволяет вести безопасную добычу техногенного сырья.

2. Разработана классификация технологий открытой разработки техногенных образований с учётом типа неоднородности их структуры и локализации в массиве. В соответствии с предложенной классификацией определены 10 принципиально различных типовых технологических схем открытой разработки неоднородных техногенных образований и обоснован алгоритм выбора наиболее предпочтительных геотехнологий в зависимости от результатов опережающей оценки структуры массива и свойств складированного сырья.

3. Установлены закономерности распределения вещественного состава техногенного сырья по глубине хвостохранилища, определяющие выбор и параметры технологии разработки техногенного образования с его последующей безопасной утилизацией после извлечения полезных компонентов. Выявлено, что первые 0,5-2 м являются обедненными зонами с содержанием золота ниже 0,2 г/т и подвижными формами мышьяка, что определяет целесообразность предварительного снятия и утилизации верхнего слоя хвостохранилища.

4. Установлено преобладание в отходах переработки руд глинистых фракций с содержанием до 52% класса крупности $-0,05+0,01$ мм, что обуславливает повышенное сцепление техногенного сырья – более 25 кПа. При этом содержание до 50% крупных частиц кварца определяет высокую пористость и проницаемость большей части массива. Доказано, что влажность большей части складированных отходов не превышает 30% и не достигает влажности на границе текучести, что обеспечивает повышенную механическую устойчивость стенок скважин и позволяет непосредственно в цикле разработки техногенного образования проводить опережающую оценку с возможностью детального обследования строения и структуры хвостохранилищ.

5. Для условий Новотроицкого хвостохранилища, с выявленной обводнённой зоной 78,5 м² и мощностью 3 м, при обосновании параметров технологии разработки сильнообводнённого участка, локализованного в толще, возможность безопасной экскавации и транспортирования сырья обеспечивается шириной защитного предохранительного целика, который должен составлять не менее 8 м и быть равным расстоянию от границы обводнённой скрытой зоны до границ откоса уступа.

6. Определены параметры горнотехнических конструкций и предложены технология и порядок ведения выемочно-погрузочных и горнотранспортных работ при открытой разработке Новотроицкого хвостохранилища, согласно которым предельный угол откоса уступа, обеспечивающий его устойчивость, должен составлять не более 50°.

7. Экономически обоснована эффективность открытой разработки золото-мышьяковистого хранилища отходов переработки руд с извлечением полезных компонентов и последующей безопасной утилизацией высокотоксичных металлов в специализированном хранилище, расположенном за пределами городской черты. Доказана перспективность переработки техногенного золотосодержащего сырья выщелачиванием в условиях действующей золотоизвлекательной фабрики в г. Пласт. Без предварительного доизмельчения материала прогнозируемый уровень извлечения золота составит не менее 70%.

8. В результате переработки техногенного сырья Новотроицкого хвостохранилища будет извлечено не менее 662 кг золота, что позволит получить дополнительную прибыль в размере 3 млрд рублей. Окупаемость затрат в результате переработки всего объема техногенного золотосодержащего сырья в условиях действующей обогатительной фабрики АО «Южуралзолото Группа Компаний», при извлечении золота на уровне 70%, составит менее одного месяца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Abedi-Orang B., Seifpanahi-Shabani K., Kakaie R. Mathematical modeling of fate and transport of cyanide pollutant in the gold mine tailings: with emphasis on physico-chemical process. Environmental Earth Sciences. – 2020.
2. Abegunde O.A., Okujeni C.D., Wu C. Distribution patterns of contaminants in the Mogale Gold tailing dam: a case study from South Africa // Environmental Earth Sciences. – 2016. – P.21.
3. Abzalov M., Newman C. Sampling of the mineralised tailings dumps – case study of the Mount Morgan project, central Queensland // Applied Earth Science. – 2017. – Vol. 126. – pp. 124-128.
4. Albuquerque M.T.D., Antunes I.M.H.R., Serafimovski T. Spatial Distribution and Associated Spatial Uncertainty of Potential Toxic Elements - The Lake Kalimanci Case Study (Republic of Macedonia) // Procedia Earth and Planetary Science. – 2017. – Vol.17. – pp. 960-963.
5. Armah F.A., Quansah R., Luginaah I. A systematic review of heavy metals of anthropogenic origin in environmental media and biota in the context of gold mining in Ghana. // Int. Sch. Res. Notices. – 2014.
6. Assawincharoenkij T., Hauzenberger C., Sutthirat C. Mineralogy and geochemistry of tailings from a gold mine in northeastern Thailand // Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal. – 2017. – pp. 364-387.
7. Bantshi A.M., Makuvise P. Extraction of Gold from Sands and Slimes Tailings Dump from Mazowe Mine, Zimbabwe // The Minerals, Metals & Materials Series. – 2017 – pp. 507-517.
8. Bortnikova S., Olenchenko V., Gaskova O. Characterization of a gold extraction plant environment in assessing the hazardous nature of accumulated wastes // Applied Geochemistry. – 2018. – Vol. 93. – pp. 145-157.
9. Bortnikova S.P., Yeltsov I.N., Faguet A.N. Geoelectric models of Kamchatka active volcanic regions according to the near-surface geoelectric // 6th Saint Petersburg International Conference and exhibition on geosciences: Investing in the future. – 2014.

10. Campbell D.L., Fitterman D.V. Geoelectrical methods for investigating mine dumps. 5th International Conference on Acid Rock Drainage // Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Denver, Colorado. – 2000. – pp. 1513-1523.
11. Christenson H., Pope J., Craw D. Characterisation of arsenic geochemistry in mine tailings from a mesothermal gold deposit // 11th Conference «Risk to Opportunity». – 2018. – P.6.
12. Craw D., Chappell D., Nelson M. Consolidation and incipient oxidation of alkaline arsenopyrite-bearing mine tailings // Applied Geochemistry. – 1999. – pp. 485-498.
13. DeSisto S.L., Jamieson H.E., Parsons M.B. Subsurface variations in arsenic mineralogy and geochemistry following long-term weathering of gold mine tailings // Applied Geochemistry. – 2016. – pp. 81-97.
14. Dogan H.M. Applications of remote sensing and Geographic Information Systems to assess ferrous minerals and iron oxide of Tokat province in Turkey // International Journal of Remote Sensing. 2008. – pp. 221-233.
15. Edraki M., Baumgartl T., Mulligan D. Geochemical characteristics of rehabilitated tailings and associated seepages at Kidston gold mine // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. – 2017. – P.16.
16. Elberling B., Schippers A., Sand W. Bacterial and chemical oxidation of pyritic mine tailings at low temperatures // Journal of Contaminant Hydrology. – 2000. – pp. 225-238.
17. Eldridge T., Wickland B., Goldstone A. Integrated Mine Waste Storage Concept, Krumovgrad Gold Project, Bulgaria // Proceedings Tailings and Mine Waste. – 2011.
18. Fortin D., Roy M., Rioux J.P. Occurrence of sulfate-reducing bacteria under a wide range of physico-chemical conditions in Au and Cu-Zn mine tailings // FEMS Microbiology Ecology. – 2000. – pp. 197-208.
19. Gitari M.W., Akinyemi S.A., Thobakgale, R.N. Physicochemical and mineralogical characterization of Musina mine copper and New Union gold mine

tailings: Implications for fabrication of beneficial geopolymeric construction materials // *Journal of African Earth Sciences*. – 2017. Vol. 137. – pp. 218-228.

20. Gómez-Ortiz D., Martín-Crespo T., M.E. José. Geoenvironmental characterization of the san quintín mine tailings, ciudad real (Spain) // *Dyna*. – 2010. – Vol. 77. – pp. 131-140.

21. Gómez-Ortiz D., Martín-Velázquez S., Martín-Crespo T. Application of electrical resistivity tomography to the environmental characterization of abandoned massive sulphide mine ponds (Iberian Pyrite Belt, SW Spain) // *Near Surface Geophysics*. – 2010. –Vol.8. – pp. 65-74.

22. Grover B.P.C., Johnson R.H., Billing D.G. Mineralogy and geochemistry of efflorescent minerals on mine tailings and their potential impact on water chemistry // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2015. – pp. 7338-7348.

23. Guanira K., Valente T.M., Ríos C.A. Methodological approach for mineralogical characterization of tailings from a Cu (Au,Ag) skarn type deposit using QEMSCAN (Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy) // *Journal of Geochemical Exploration*, 2019. – P.44.

24. Gunsinger M. R., Ptacek C. J., Blowes, D.W., Jambor, J. L. Evaluation of long-term sulfide oxidation processes within pyrrhotite-rich tailings // *Journal of Contaminant Hydrology*. – 2006. – pp. 149-170.

25. Gustaytis M.A., Lazareva E.V., Bogush A.A. Distribution of mercury and its species in the zone of sulphide tailing // *Earth Sci*. – 2011. pp. – 778-782.

26. Hammarstrom J.M., Seal R.R., Meier A.L. Secondary sulfate minerals associated with acid drainage in the eastern US: recycling of metals and acidity in surficial environments // *Chemical Geology*. – 2005. – pp. 407-431.

27. Hasani S., Asghari O., Ardejani F.D. Spatial modelling of hazardous elements at waste dumps using geostatistical approach: a case study Sarcheshmeh copper mine // *Environ Earth Sci*. – 2017.

28. Jamie-Leigh R.A. Geochemistry of Gold One tailings and associated contaminant transport into the Randfontein area, Witwatersrand Basin // *Dissertation for*

the degree of Master of Science in Applied Geology in the Department of Earth Science. –2017.

29. Jurjovec J., Ptacek C. J., Blowes D.W. Acid neutralization mechanisms and metal release in mine tailings: a laboratory column experiment // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2002. – pp. 1511-1523.

30. Kuras O., Banks V., Palumbo-Roe B. Geophysical Imaging of a Tailings Lagoon at an Abandoned Lead-zinc Mine in the Central Wales Orefield, UK // *Near Surface*. 14th EAGE European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. –2008.

31. Liefferink M., Liefferink S.L. Current reclamation of historical uraniferous tailings dams and sand dumps – exacerbating the mess or minimizing the mining footprint? Case studies within the Witwatersrand goldfields // *Springer International Publishing Switzerland*. – 2014. – pp. 387-400.

32. Lindsay M.B.J., Moncur M.C., Bain J.G. Geochemical and mineralogical aspects of sulfide mine tailings // *Applied Geochemistry*. – 2015. – pp. 157-177.

33. Ma B., Chen Yu., Li Xu. Remote sensing extraction of stopes and tailings ponds in an ultra-low-grade iron mining area // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. –2018. –Vol. XLII-3.

34. Ma B., Chen Yu., Zhang S. Remote Sensing Extraction Method of Tailings Ponds in Ultra-Low-Grade Iron Mining Area Based on Spectral Characteristics and Texture Entropy // *Entropy*. – 2018. – P.9.

35. Manenti S., Amicarelli A., Todeschini S. WCSPH with Limiting Viscosity for Modeling Landslide Hazard at the Slopes of Artificial Reservoir // *Water*. – 2018.

36. Maqsoud A., Neculita C.M., Bussière B. Impact of fresh tailing deposition on the evolution of groundwater hydrogeochemistry at the abandoned Manitou mine site // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2016. – pp. 9054-9072.

37. Martin-Crespo T., Gomez-Ortiz D., Martinez-Pagan P. Geoenvironmental characterization of riverbeds affected by mine tailings in the Mazarron district (Spain) // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2012. – pp.6-16.

38. Martín Crespo T., Ignacio C., Gómezortiz D. Monitoring study of the mine pond reclamation of Mina Concepción, Iberian Pyrite Belt (Spain) // *Environmental Earth Sciences*. – 2010.
39. Martínezpagán P., Fazcano A., Aracil E. Electrical resistivity tomography revealed the spatial chemical properties of mine tailings ponds in the Sierra Minera (SE Spain) // *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*. – 2009.
40. Mhlongo S.E., Amponsah-Dacosta F., Kadyamatimba, A. Development and application of a methodological tool for prioritization of rehabilitation of abandoned tailings dumps in the Giyani and Musina areas of South Africa // *Cogent Engineering*. – 2019. – Vol. 6(1).
41. Myagkaya I.N., Lazareva E.V., Gustaytis M.A. Gold and silver in a system of sulfide tailings. Part 1: Migration in water flow // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2016. – Vol. 160. – pp. 16-30.
42. Naumova O.B., Naumov V.A., Osovetskiy B.M. Nanoforms of Secondary Gold in the Tailings Wastes: Placers of Is River // *Middle-East Journal of Scientific Research*. – 2013. – pp. 316-320.
43. Nengovhela A.C., Yibas B. Characterisation of gold tailings dams of the Witwatersrand Basin with reference to their acid mine drainage potential, Johannesburg, South Africa // *Chemistry*. – 2006. – pp. 499-506.
44. Olenchenko V.V., Kucher D.O., Bortnikova S.V. Vertical and lateral spreading of highly mineralized acid drainage solutions (Ur dump, Salair): electrical resistivity tomography and hydrogeochemical data // *Russian Geology and Geophysics*. – 2016. – Vol.57. – pp. 617-628.
45. Omotola M., V.M. Ngole-Jeme V.M., Babalola O.O. Physicochemical properties, heavy metals, and metal-tolerant bacteria profiles of abandoned gold mine tailings in Krugersdorp // *Canadian Journal of Soil Science*. – 2020.
46. Paktunc D., Weisener C.G., Thibault Y. Sulfide Oxidation and Mobilization of Arsenic in the Ketz River Mine Tailings // *Proceedings of the 10th International Congress for Applied Mineralogy*. – 2012.

47. Reith F., McPhail D.C., Christy A.G. Bacillus cereus, gold and associated elements in soil and regolith samples from Tomakin Park Gold Mine in south-eastern New South Wales // Journal of Geochemical Exploration. – 2005. – Vol. 85. – pp. 81-89.
48. Robert N. Inter-comparison geochemical modelling approaches and implications for environmental risk assessments: A Witwatersrand gold tailings source term characterisation study // Applied Geochemistry. – 2018. – pp. 71-84.
49. Saryg-ool B.Y., Myagkaya I., Kirichenko I. Redistribution of elements between wastes and organic-bearing material in the dispersion train of gold-bearing sulfide tailings: Part I. Geochemistry and mineralogy // Science of The Total Environment. – 2017. – pp. 460-471.
50. Savage K.S., Tingle T.N., O'Day P.A. Arsenic speciation in pyrite and secondary weathering phases, Mother Lode Gold District, Tuolumne County, California // Applied Geochemistry. – 2000. – pp. 1219-1244.
51. Sheel A., Pant D. Recovery of gold from electronic waste using chemical assisted microbial biosorption (hybrid) technique. // Bioresource Technology. – 2018. – pp. 1189-1192.
52. Sheoran A.S., Choudhary R.P. 2010. Bioremediation of acid-rock drainage by sulfate-reducing prokaryotes: a review // Min. Eng. – 2010. – pp. 1073-1100.
53. Vermeulen N.J., E. Rust E. Variations in composition on SA gold tailings dams // Tailings and Mine Waste 2002: Proceedings of the 9th International CONFERENCE ON TAILINGS AND MINE WASTE. – 2002. – P. 45-52.
54. Wei-hong W., Xue-gang L., Zhe W. Heavy Metal and Metalloid Contamination Assessments of Soil around an Abandoned Uranium Tailings Pond and the Contaminations Spatial Distribution and Variability // Int. J. Environ. Res. Public Health. – 2018.
55. Wierchowiec J., Mikulski S.Z., Gąsiński A. Nanoforms of gold from abandoned placer deposits of Wądroże Wielkie, Lower Silesia, Poland – The evidence of authigenic gold mineralization // Ore Geology Reviews. – 2018. – pp. 211-220.

56. Xu B., Kong W., Li Q., Yang Y., Jiang T., & Liu X. A review of thiosulfate leaching of gold: Focus on thiosulfate consumption and gold recovery from pregnant solution // *Metals*. – 2017.

57. Аргимбаев К.Р. Обоснование технологии открытой разработки железосодержащих техногенных месторождений на примере хвостохранилищ ГОКов КМА: дис. ... канд. техн. наук. – СПб, 2013. – 135 с.

58. Бишев Л.З. Разработка эффективной технологии открытой отработки пиритсодержащих хвостохранилищ // Дис. ... канд. техн. наук. – Челябинск, 2000. – 174 с.

59. Борисович В.Т., Чайников В.В. Геолого-экономическая оценка техногенных месторождений. Том 15 // *Итоги науки и техники*. – М.: ВИНТИ, 1991. – С. 3-22.

60. Будилин Ю.С., Вашко Н.А., Джлбадзе В.А. Методика разведки россыпей золота и платиноидов. – М.: ЦНИГРИ НТГ «ГЕОЭКСПЕРТ», 1992. – 307 с.

61. Временное методическое руководство по эксплуатационной разведке россыпей золота и олова скважинами бескернового бурения с продувкой воздухом / рук. Канчик Б.К. – Иркутск: Иргиредмет, 1984. – 46 с.

62. Временные отраслевые методические рекомендации по оценке техногенных ресурсов предприятий цветной металлургии: утв. постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР // Центральный научно-исследовательский институт экономики и информации цветной металлургии, 1990. – 80 с.

63. Гавришев С.Е., Заляднов В.Ю., Пыталев И.А. Расширение области рационального использования техногенных георесурсов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2006. – № 9. – С. 252-258.

64. Гавришев С.Е., Корнилов С.Н., Пыталев И.А., Гапонова И.В. Повышение экономической эффективности горнодобывающих предприятий за счет вовлечения в эксплуатацию техногенных георесурсов // *Горный журнал*. – 2017. – № 12. – С. 46-51.

65. Гальперин А.М., Кутепов Ю.И., Кириченко Ю.В. Освоение техногенных массивов на горных предприятиях: монография. – М.: Горная книга, 2012. – 336 с.
66. Горлова О.Е., Шадрунова И.В., Жилина В.А. Повышение полноты извлечения золота из лежалых отходов переработки золотосодержащих руд // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2020.
67. ГОСТ 12248.2-2020. Грунты. Определение характеристик прочности методом одноосного сжатия. – М.: Стандартиформ, 2020. – 8 с.
68. ГОСТ 12536-2014 Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. – М.: Стандартиформ. – 2019. – 20 с.
69. Джаппуев Р.К., Соглаев А.В., Залевская К.Н. Извлечение золота из техногенного сырья: практика АО «ЮГК» // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2020. – № 4. – С. 340-350.
70. Жмодик С.М., Калинин Ю.А., Росляков Н.А. Наночастицы благородных металлов в зоне гипергенеза // Геология рудных месторождений. – 2012. – №2. – С.168-183.
71. Залевская К.Н. Снижение рисков освоения техногенных золоторудных образований на основе комбинирования валовой и селективной выемки неоднородного сырья // В сборнике: Комбинированная геотехнология: риски и глобальные вызовы при освоении и сохранении недр. – 2021. – С. 170-172.
72. Зубков А.А. Пыталев И.А., Козловский А.А. Технологические схемы размещения промышленных отходов в карьерах и отвалах: монография. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова. 2014. – 176 с.
73. Илимбетов А.Ф., Рыльникова М.В., Радченко Д.Н., Милкин Д.А. Новые решения проблемы комплексного освоения рудных месторождений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2006. – № 4 (16). – С. 8-13.
74. Коротков А.А., Гиниятуллин И.А. Безопасная отгрузка пиритного концентрата // Горный журнал. – 1989. – №3. – С. 15.

75. Кочкарское золоторудное месторождение. Подсчет запасов на 1 января 1975 г. / Г.П. Докукин, В.С.Рябов: Союззолото, 1976. – 249 с.

76. Кучер Д.О., Оленченко В.В. Модель распространения дренажных растворов в геологической среде по данным электроразведки // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2016. – С. 212-216.

77. Макаров А.Б., Хасанова Г.Г., Талалай А.Г. Техногенные месторождения: особенности исследований // Известия Уральского государственного горного университета. – 2019. – №3. – С. 58-62.

78. Макаров В.А. Геолого-технологические основы ревизии техногенного минерального сырья на золото. – Красноярск, 2001. – 132с.

79. Меретуков М.А., Гурин К.К. Поведение золота в хвостовых отвалах // Цветные металлы. – 2011. – С.27-31.

80. Меретуков М.А., Рудаков В.В., Злобин М.Н. Геотехнологические исследования для извлечения золота из минерального и техногенного сырья. – М: Горная книга, 2011. – 438с.

81. Методические рекомендации по изучению и оценке техногенных минеральных объектов: утв. постановлением ЭТС ГКЗ при МГ и ОН Республики Казахстан // Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых при МГ и ОН РК, 1995. – 35 с.

82. Методические рекомендации по технико-экономическому обоснованию кондиций для подсчета запасов месторождений твердых полезных ископаемых (кроме углей и горючих сланцев): утв. распоряжением МПР России от 05.06.2007 г. // Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых» (ФГУ ГКЗ) по заказу Министерства природных ресурсов Российской Федерации, 2007. – 44 с.

83. Методические указания по оценке техногенных запасов золота мелкозалегающих дражных полигонов Иркутской области: отчет о НИР / рук. В.С. Гурулев. – Иркутск: Иргиредмет, 2001. – 92 с.

84. Методическое руководство по изучению и эколого-экономической оценке техногенных месторождений // Государственная комиссия по запасам

полезных ископаемых (ГКЗ) Министерства охраны окружающей среды и природных ресурсов РФ, 1994. – 51 с.

85. Михин О.А., Саттаров Г.С. К вопросу извлечения золота из вторичного сырья Марджанбулакского золотоизвлекательного участка НГМК // Горный вестник Узбекистана. – 2007. – № 1. – С. 77-81.

86. Мормиль С.И., Сальников В.Л., Хасанова Г.Г. Техногенные месторождения Среднего Урала и оценка их воздействия на окружающую среду: Екатеринбург: НИИ-Природа, 2002. – 206 с.

87. Объяснительная записка к подсчету запасов руды As и Au по Ново-Троицкому золото-мышьяковому месторождению на 1/1 1939 г. / В. Бяков: Союзмышьяк, 1939. – 44 с.

88. Ожогина Е.Г. Котова О.Б., Якушина О.А. Горнопромышленные отходы: минералогические особенности // Вестник Института геологии Коми НЦ УРО РАН. – 2018. – №6. – С.43-49.

89. Оленин В.В., Ершов Л.Б., Беликова И.В. Техничко-экономическая оценка техногенных месторождений цветных металлов // ЦНИТИ экономики и информации цветных металлов. Сер. Экономика цветной металлургии, 1990. – №2.

90. Осовецкий Б.М. Наноскульптура поверхности золота: монография. – Пермь: ПГНИУ, 2012. – 232 с.

91. Пат. 2700139 Российская Федерация. Способ геологического исследования хвостохранилищ и устройство для его реализации / М.В.Рыльникова, Д.Н. Радченко, В.С. Федотенко, К.И. Струков, К.Н. Залевская; ФГБУН ИПКОН РАН. – № 2018141707; заявл. 27.11.2018; опубл. 12.09. 2019, Бюл. № 26. – 12 с.

92. Першин Г.Д., Пыталев И.А., Швабенланд Е.Е., Якшина В.В. Согласование производительности карьера и фабрики при формировании техногенных емкостей для размещения в них хвостов обогащения руд // Маркшейдерия и недропользование. – 2022. – С. 24-31.

93. Пономарчук Г.П., Серый Р.С., Сас П.П. Повторная разработка крупномасштабных россыпей на основе реструктуризации отвального комплекса 250-литровых драг // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – №16. – С. 196-203.

94. Радченко Д., Залевская К.Н. Увеличение производственной мощности горных предприятий за счет вовлечения в эксплуатацию техногенных образований // В сборнике: Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу. – 2019. – С. 75-78.

95. Радченко Д.Н., Балашов А.Г., Залевская К.Н., Кирков А.Е. Опыт опробования старогодних хвостохранилищ в свете перспектив их промышленной эксплуатации при комплексном освоении золоторудных месторождений южного Урала // В сборнике: Золото. Полиметаллы. XXI век. Пласт. – 2020. – С. 63-64.

96. Радченко Д.Н., Балашов А.Г., Залевская К.Н., Кирков А.Е. Результаты опробования старогодних хвостохранилищ в свете перспектив их промышленной эксплуатации при комплексном освоении золоторудных месторождений Южного Урала // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2020. – № 4. – С. 364-375.

97. Радченко Д.Н., Залевская К.Н. Оценка влияния физико-механических свойств лежалых отходов обогащения золоторудного сырья на выбор параметров геотехнологии освоения техногенных объектов // В сборнике: Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. – 2021. – С. 210-212.

98. Радченко Д.Н., Залевская К.Н. Результаты имитационного моделирования процессов экологически сбалансированного освоения месторождений с использованием программного комплекса Micromine // В сборнике: Новое в познании процессов рудообразования. – 2018. – С. 299-301.

99. Радченко Д.Н., Залевская К.Н. Создание цифровой модели техногенного месторождения с обоснованием технологии его разработки // В сборнике: Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. – 2019. – С. 215-217.

100. Радченко Д.Н., Хайдаров И.В., Залевская К.Н. Обоснование технологии добычи и переработки техногенного сырья Новотроицкого хвостохранилища // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2020. – №1. – С. 277-289.

101. Радченко Д.Н., Цупкина М.А., Залевская К.Н. Обоснование параметров экологически сбалансированного освоения месторождений АО «ЮГК» при вовлечении в отработку техногенного сырья // В сборнике: Новое в познании процессов рудообразования. – 2018. – С. 302-303.

102. Радченко Д.Н., Цупкина М.В., Джаппуев Р.К. Эколого-экономическая оценка техногенных минеральных образований для обеспечения устойчивого развития горнопромышленной индустрии // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2021. – С. 303-315.

103. Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. Методологические аспекты проектирования системы управления минерально-сырьевыми потоками в полном цикле комплексного освоения рудных месторождений // Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. Рациональное освоение недр. – 2016. – № 2-3. – С. 36-41.

104. Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. Энергоэффективные и безопасные технологии разведки и разработки техногенных образований. Принципы проектирования технологических схем // Горная промышленность. – 2018. – № 3. – С. 86-90.

105. Рыльникова М.В., Радченко Д.Н., Залевская К.Н. и др. Проблемы и перспективы вовлечения хвостов обогащения золото-мышьяковистых руд в эксплуатацию для решения экологических проблем региона // В сборнике: Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность. – 2019. – С. 1422-1427.

106. Рыльникова М.В., Радченко Д.Н., Залевская К.Н. Новые подходы к освоению техногенных месторождений // В сборнике: Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр. – 2020. – С. 19-22.

107. Рыльникова М.В., Радченко Д.Н., Милкин Д.А., Звягинцев А.Г. А.Г., Пешков А.М. Обоснование параметров и режима выщелачивания сырья

техногенных образований, сопутствующих разработке медно-колчеданных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 3. – С. 340-350.

108. Рыльникова М.В., Радченко Д.Н., Цупкина М.В., Сафонов В.А. Исследование экологического воздействия новотроицкого хвостохранилища на растительный покров и живые организмы // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2020. – № 1. – С. 108-120.

109. Рыльникова М.В., Швабенланд Е.Е., Цупкина М.В., Джаппуев Р.К. Нормативно-правовые подходы к вовлечению в эксплуатацию техногенных минеральных образований // Рациональное освоение недр. – 2021. – С. 24-29.

110. Саданов Ш.Н., Залевская К.Н., Кирков А.Е., Гавриленко В.В. Стратегия вовлечения в эксплуатацию техногенных золотосодержащих образований в свете экологически сбалансированного развития горнопромышленного региона // В сборнике: Золото. Полиметаллы. XXI век: устойчивое развитие. – 2022. – С. 52-53.

111. Саламатов В.И., Пунишко О.А., Саламатов О.В. Формирование, переработка и обезвоживание техногенного и рудного золотосодержащего сырья: монография. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2019. – 222 с.

112. Селезнев С.Г., Степанов Н.А. Отвалы Аллареченского сульфидного медно- никелевого месторождения как новый геолого-промышленный тип техногенных месторождений // Известия вузов. Горный журнал. –2011. – № 5. – С. 32-40.

113. Талалай А.Г., Макаров А.Б., Зобнин Б.Б. Техногенные месторождения Урала, методы их исследования и перспективы переработки // Изв. вузов. Горный журнал. –1997. – С. 20-36.

114. Тальгамер Б.Л., Чемезов В.В., Неретин А.В., Дементьев С.А. Прогнозирование добычи ценных компонентов при повторной разработке техногенных россыпей дражным способом // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 2. – С. 292-299.

115. Тальгамер Б.Л., Чемезов В.В., Неретин А.В., Дементьев С.А. Прогнозирование добычи ценных компонентов при повторной разработке техногенных россыпей дражным способом // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. – № 2. – С. 217-219.

116. Тарасенко И.А. Отходы Краснореченской обогатительной фабрики (Приморский край, Россия): геохимия и минералогия // Вестник Московского университета. – 2017. – Серия 4. Геология. – С. 35-41.

117. Терентьева И.В. Обоснование параметров комплексного освоения запасов законсервированного Жезказганского хвостохранилища: дис. ... канд. техн. наук. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова. 2016. – 176 с.

118. Трубецкой К.Н., Воробьев А.Е. Основы ресурсовоспроизводящих технологий складирования и хранения некондиционного сырья // Горный журнал. – 1995. – № 5. – С. 47-51.

119. Трубецкой К.Н., Захаров В.Н., Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В. Эффективные технологии использования техногенных георесурсов - основа экологической безопасности освоения недр // Горный журнал. – 2016. – № 5. – С. 34-40.

120. Трубецкой К.Н., Рогов Е.И., Уманец В.Н. Обоснование объемов и сроков освоения техногенных месторождений // Горный журнал. – 1988. – С. 9-12.

121. Федеральное агентство по недропользованию РФ (Роснедра). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.rosnedra.gov.ru/>. Дата обращения 18.03.2021.

122. Федотов К.В., Артемова А.С. Комплексная переработка лежалых хвостов Джидинского ВМК // В сборнике: Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья. – 2005. – С. 39-41.

123. Хайрятдинов Р.К. Город золотой истории – Пласт. – Челябинск: Санарка, 2012. – 400 с.

124. Халатов С.Ю., Корнеева Т.В., Балков Е.В. Применение метода трехмерной электротомографии при изучении отвалов горно-обогатительных комбинатов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2014.

125. Цибизов А.Н., Туманова Е.С. Принципы разведки техногенных месторождений: научное издание // Разведка и охрана недр. – 1995. – № 2. – С. 16-18.

126. Чайников В.В. Системная оценка техногенных месторождений / ред. М.А. Ревазов. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1999. – 75 с.

127. Шадрунова И.В., Провалов С.А., Горлова О.Е. Адаптация методов обогащения для доизвлечения золота из лежалых хвостов золотоизвлекательных фабрик. – М.: ИПКОН РАН, 2009. – 206 с.

128. Юркевич Н.В., Бортникова С.Б., Оленченко В.В. Оценка современного состояния хвостохранилища золоторудного производства: ценные и токсичные компоненты // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2017. – С. 113-117.