

Отчет фазы 0 Технико-экономической оценки (ТЭО) – Геологическое и геотехническое исследование соляного клина в основании плотины и в водохранилище

Краткий отчет

Неофициальный перевод на русский язык. Оригинал на английском языке превалирует в случае обнаружения неточностей в русской версии.

1 ЦЕЛИ ОТЧЕТА

Данный отчет фазы 0 рассматривает потенциальное воздействие на безопасность плотины соляного клина, который имеется вдоль Йонахшского разлома, и который пересекает створ Рогунской плотины примерно в северо-восточном – юго-западном направлении, в верховой части оси плотины (см. рис. 1-1).

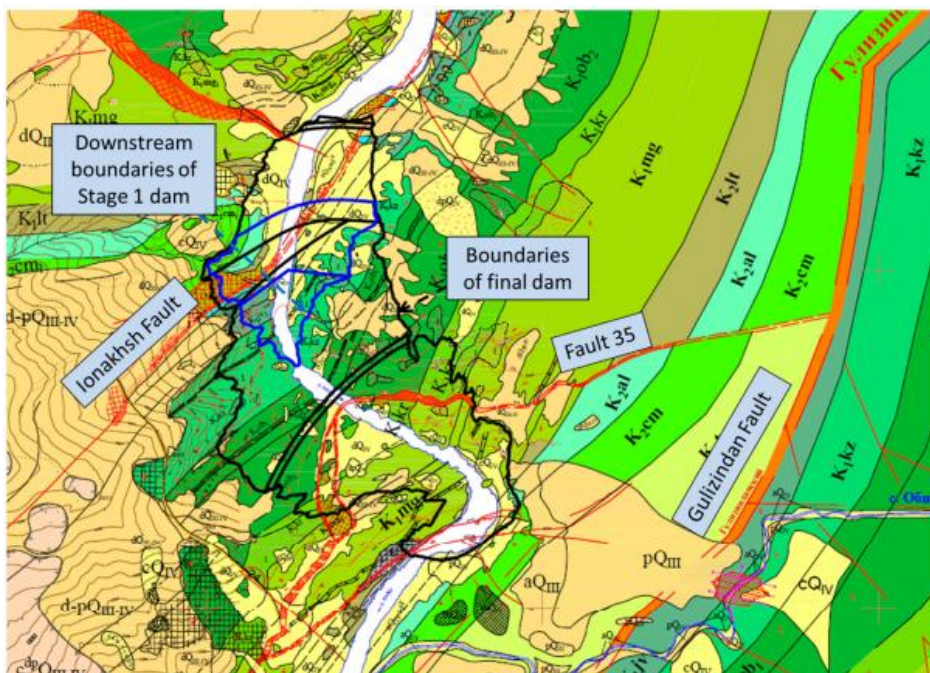


Рис. 1-1: Геологическая карта створа плотины с Йонахшским разломом и другими основными разломами; выделены границы плотины первой очереди (синим цветом) и

границы окончательной плотины (черным цветом) для варианта плотины НПУ на отметке 1290.

Геометрия соляного тела в пределах Йонахшского разлома тщательно изучалась с момента первых исследований, проведенных по предлагаемому Рогунскому проекту. Они показали, что соляное тело имеет клинообразную форму, чья верхушка на максимальной отметке имеет переменную ширину от 1.5-2 м в пределах левого берега до 12 м в пределах правого берега. Толщина соляного клина увеличивается с глубиной, в среднем на 15 м на каждые 100 м глубины.

Под влиянием орогенических сил (то есть залегание и сбросообразование земной коры), соляной клин выдавливается вдоль Йонахшского разлома с ориентировочной скоростью 2.5 см в год. В окрестностях реки Вахш он выщелачивается с такой же скоростью, приводя к состоянию равновесия. Наполнение Рогунского водохранилища приведет к увеличению пьезометрической линии, и, если это увеличение не будет смягчено, оно может повлечь за собой увеличение нормы выщелачивания и возможное образование полости.

Настоящий краткий отчет представляет потенциальные варианты выщелачивания, проанализированные Консультантами. В нем также предлагаются к осуществлению меры по смягчению, мониторингу и восстановлению для стадии эксплуатации Рогунской ГЭС. Оценка рассматривалась Правительством Республики Таджикистан, независимой Группой экспертов и технической командой Всемирного банка. Отчет фазы 0 будет завершен после рассмотрения комментариев от заинтересованных сторон, представляемых страны бассейна и гражданское общество по данному краткому отчету, и их принятия во внимание соответствующим образом.

2. ДИАПАЗОН ПРОВЕДЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Был проведен тщательный анализ гидрогеологических явлений, и были рассмотрены существующие числовые модели, которые использовались в предшествующих исследованиях. Консультантами по ТЭО были разработаны новые модели для независимой оценки результатов предшествующих исследований.

Конкретные гидрогеологические условия на Йонахшском разломе были изучены в контексте всеобщих гидрогеологических условий створа, уделяя особое внимание преобладающим условиям вокруг верхушки соляного пласта (то есть водоносный горизонт, созданный поверх соляного пласта в пространстве, заполненном остатками выщелачивания соли). Консультанты провели испытания на откачку с целью определения внутрипластового коэффициента проницаемости и эффективной пористости верхушки соляного пласта.

Была проведена оценка мер по снижению последствий, предложенных в рамках предыдущих исследований для контролирования процесса выщелачивания. Консультантами были выдвинуты новые меры по смягчению последствий с использованием современных технологий. Эффективность рекомендованных мер с целью снижения нормы выщелачивания оценивалась в анализах чувствительности, и Консультанты предложили проводить мониторинг показателей мер по смягчению, используя предсказуемое моделирование. Была также проведена оценка затрат на предлагаемые меры по смягчению последствий, которая будет включена в общие прогнозируемые затраты по предлагаемому проекту.

3 ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ СТВОРА

Общие гидрогеологические условия створа оценивались на основе полного обзора доступных исследовательских работ и полевых изысканий, проведенных Консультантами. Были определены различные водоносные горизонты и описаны их естественные условия и признаки. Различные физические характеристики, которые должны использоваться в гидрогеологическом моделировании, были выведены из результатов предыдущих испытаний. Там, где предыдущие исследования считались недостаточными, в 2012 году были проведены новые, дополнительные испытания под руководством Консультантов по ТЭО. Например, Консультантами по ТЭО было оборудовано 18 наблюдательных скважин на створе плотины, на которых проводился мониторинг. Это было сделано с целью гарантирования того, что основные вводные данные гидрогеологического моделирования отображают реальные условия створа.

4 ЯВЛЕНИЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ И ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

4.1 Определение параметров процессов выщелачивания

Выщелачивание - это процесс, при котором вода формирует раствор в контакте с растворимым материалом, выступающим в роли растворенного вещества. Каждый основной компонент этого явления анализируется, а именно характеристика растворимого материала, характеристика растворителя (воды) и различных транспортных явлений растворимого вещества, которые следует рассмотреть (адвекция/конвекция, диффузия, гравитационная конвекция). Число Пекле (безразмерная величина, относящаяся к исследованию явления транспортировки в течении жидкостей) оценивалось для разных вариантов, предусмотренных для понимания того, какой транспортный процесс является преобладающим в выщелачивании соли, и он использовался для оценки потенциальной нормы выщелачивания.

4.2 Геометрия и характеристика Йонахшского разлома

Модель, разработанная для анализа, основана на тщательной оценке всей документации, имеющейся с момента первоначального проекта 1978 года по 2012 год, когда Консультантами по ТЭО были проведены новые испытания по откачке на растворимость. Это дает точное местоположение и определение границ соляного оголовка в пределах Йонахшского разлома, подробный литологический состав окружающей скальной породы, подробные основные свойства и состав растворенных скальных остатков вокруг соляного оголовка (в основном это галит и ангидрид), гидравлическую проницаемость и растворимость исследованного материала.

Йонахшский разлом ограничивается солью, выталкиваемой из глубокого эвапоритового слоя. На вершущке он покрыт глиной и гипсом. Ширина соляной зоны увеличивается вместе с глубиной, от 1 до 8 м на вершущке до 40-60 м на глубине 200 м. Далее, на глубине 2-3 км, толщина соли увеличивается на 15 м каждые 100 м глубины. Вершущка соляного оголовка на берегах расположена на отм. от 956 м до 970 м. Выше этой отметки соли не имеется; она была выщелочена.

При сдвигающих горизонтальных тектонических силах, соль сдвигается, в результате соляной оголовки поднимается, со скоростью, как было оценено в предыдущих исследованиях, 2.5 см/год. Так как не было найдено недавних записей по скорости подъема, анализ чувствительности проводился с использованием этого ключевого параметра в модели.

Все предыдущие исследования по соляному клину предполагали, что глубина нерастворенной верхушки соляного оголовка под рекой Вахш не изменяется со временем, что означает равновесие между выщелачиванием и подъемом соляного оголовка. Это фундаментальное предположение по калибровке модели, и оно было тщательно рассмотрено Консультантами. Консультанты заключили, что данное предположение является верным. Однако проводились анализы чувствительности, по результатам которых предположение о равновесии не считается верным.

Литологические условия вокруг соляного оголовка представлены на следующем рисунке. Окружающей скальной породой является гипс, покрытый аргиллитом Гаурдакской формации на низовой части и песчаник, переслаивающийся с алевритами в верхней части. Этот рисунок показывает стандартную последовательность, подтвержденную скважинами и изысканиями.

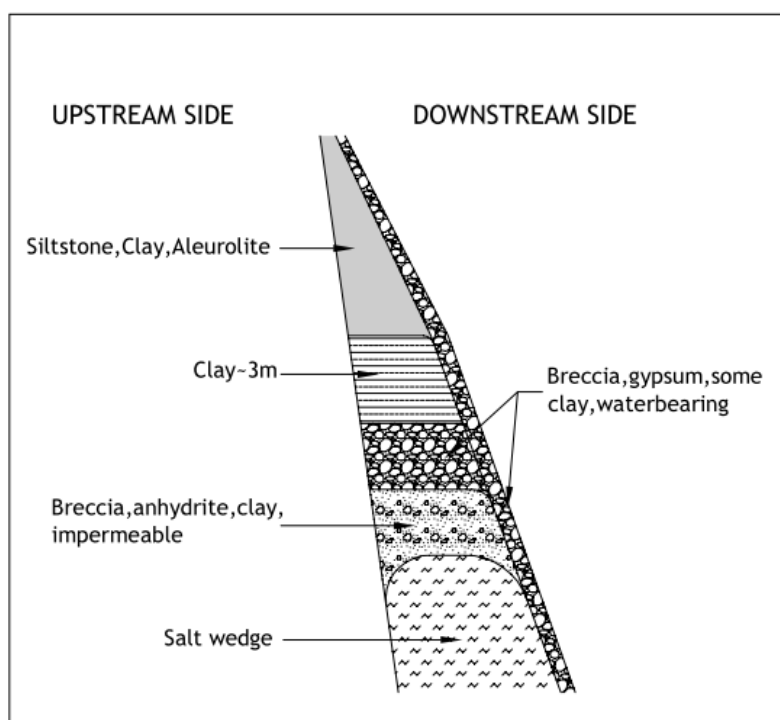


Рис. 4-1: Литологические условия над соляным оголовком

4.3 Испытания по откачке на растворимость в конце 2012 года, интерпретация результатов

С 16 ноября по 10 декабря 2012 года проводились испытания по откачке, для которых была пробурена скважина глубиной 48 м, с диаметром 10". Эта скважина была пробурена на ограниченном участке берега, где цементация разлома еще не была

проведена. Во время испытаний были измерены следующие параметры: расход, понижение уровня воды, электрическая проводимость воды, общее содержание минералов в самой скважине. Дополнительно было измерено понижение воды в соседних пьезометрах.

Это крупномасштабное испытание по откачке на растворимость позволило получить значения коэффициента водопроницаемости и гидравлической проницаемости оголовка пласта, которые являются фундаментальными вводными данными для различных моделей. Анализ результатов позволил лучше понять признаки пласта в текущих условиях. Испытание по откачке на растворимость подтвердило порядок величины скорости подъема соляного пласта, основываясь на анализе содержания соли с течением времени.

Гидравлическая проницаемость, полученная в результате этого испытания, была использована для получения числа Пекле для различных рассматриваемых условий, показывающих, что **транспортный процесс протекает медленно и что диффузия умеренно влияет на этот процесс в текущих условиях.**

Тот факт, что диффузия представляет собой промежуточный транспортный процесс подтверждается наблюдением значительного содержания соли внутри окаймленных образований в верховье, а также в низовье. В случае чистого адвективного/конвективного или доминирующего адвективного/конвективного транспорта, более высокие концентрации можно наблюдать лишь в пределах нижней части окаймляющей породы.

5 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

5.1 Оценка текущей модели ИГП

Модель, разработанная ИГП («Институт Гидропроект», Москва), была откалибрована по природным условиям перед цементацией Йонахшского разлома, который сейчас пролегает почти через весь створ плотины, кроме русла реки Вахш и части левого берега.

Калибровочный процесс основывается на равновесии между предполагаемой скоростью подъема соляного пласта в 2.5 см/год и растворения соли с такой же скоростью. Результаты модели показывают сходство на приемлемом уровне между вычисленным и наблюдаемым распределением концентрации соли внутри окружающей породы вокруг Йонахшского разлома.

Транспортные законы, использованные в модели, включая процесс гравитационной конвекции, как можно ближе соответствуют реальности. К сожалению, значение вводных данных для гидравлической проницаемости, которое является одним из наиболее критических параметров, не является консервативным. Переоценка кинематической проницаемости не выглядит консервативной, так как она замедляет транспортный процесс. Принятое значение получено из рассмотрения различных гидравлических испытаний, проведенных поблизости от оголовка пласта, но не было проведено никаких испытаний по откачке, позволяющих определить реалистичные значения для гидравлической проницаемости оголовка пласта.

Использование параметров, выведенных из испытаний по откачке 2012 года, с 50% до 75% глиняным покрытием модели ИГП, может привести к смоделированному выщелачиванию, которое может быть значительно выше, чем в модели ИГП, требуя годовой подъем соляного купола на 25 см, для достижения равновесия в текущих условиях. До сих пор не было никаких полевых доказательств такой высокой скорости подъема соляного оголовка в пределах Йонахшского разлома, таким образом, демонстрируются ограничения калибровки текущей модели.

Все варианты были проанализированы с параметрами гидравлической проницаемости цементированного оголовка, предполагая, что оголовок пласта покрыт глиной от 50 до 75% его поверхности.

Надежность всей модели очень чувствительна в зависимости от следующих показателей:

- Предполагаемый процент поверхности вершины соляного пласта с глиняным покрытием,
- Эффективная скорость подъема соляного пласта в Йонахшском разломе.

Модель ИГП должна быть улучшена и заново откалибрована.

5.2 Модели ТЭО

Консультанты по ТЭО построили собственную модель, чтобы независимо оценить модель, подготовленную ИГП, но также использовали параметрический анализ для оценки вариантов и чрезвычайных условий, которые не были рассмотрены в рамках предшествующих исследований. Это предоставляет более широкий диапазон для анализа чувствительности для общей оценки риска явления выщелачивания.

Модель Консультанта менее усложненная, чем модель ИГП, и предназначена служить инструментом для общей оценки и принятия решений на стадии оценки.

Весь процесс выщелачивания моделируется тремя отдельными под-моделями, которые используются последовательно:

- **Под-модель 1 – модель движения подземных вод:** она моделирует поток подземных вод вокруг соляного пласта для различных природных условий, различных очередей проекта, работ по снижению последствий и различных уровней эффективности мер,
- **Под-модель 2 – модель процесса выщелачивания:** она моделирует максимальную способность выщелачивания внутри части соляного пласта, подверженного растворимости. Она принимает во внимание следующее: весь химический процесс, кинетику растворения и концентрации при равновесии, а также состав эвапорита. Результатом этого становится скорость выщелачивания соли для разных вариантов. Градиент на соляном пласте получается из подмодели 1.

- **Под-модель 3 – транспортная модель:** она моделирует транспортные процессы: диффузию и адвекцию/конвекцию. Гравитационная конвекция не моделировалась. В этой модели использовались соответствующие аналитические формулы (адвекция, диффузия). Используются результаты испытаний по откачке (гидравлическая проницаемость и кинематическая проницаемость). Градиенты подземных вод являются результатами под-модели 1. Модель откалибрована на основе наблюдений о том, что выщелачивание равно подъему соляного пласта.

Анализ чувствительности показывает, что наиболее чувствительными параметрами являются гидравлическая проницаемость, градиент подземных вод, подъем пласта и покрытие глиной. Практически нет или очень ограничена неясность относительно гидравлической проницаемости, но она может быть значительной для глиняного покрытия и скорости подъема пласта.

Были рассмотрены разные сценарии для различных скоростей подъема пласта для условий 1 и 2-й очереди, с учетом периода воздействия каждой ситуации.

Проводилось исследование с целью определения максимального размера полости, которая не повредила бы кору и фильтры плотины в результате движений насыпи, вызванного образованием впадины. Скромная оценка показывает, что образование полости в результате выщелачивания соли может иметь критический исход только когда это происходит на площади 25 м. Для целей настоящего исследования использовался фактор безопасности 3, и порог полости 8 м использовался для утверждения приемлемости результатов различных вариантов.

Рассмотренные смягчающие меры:

- Цементация оголовка или цементация скальной породы вокруг всей верхушки соляного пласта,
- Осуществление гидравлической завесы, которая состоит из поддержания серии скважин в низовой части соляного пласта, чтобы уменьшить градиент воды между обеими сторонами соляного пласта.

Поэтому, были проанализированы следующие сценарии:

- Имеющиеся условия перед любой работой по снижению последствий, для калибровки модели, на основе наблюдаемого природного равновесия между выщелачиванием соли и подъемом соляного пласта;
- Вариант «никаких корректирующих мер» после строительства плотины первой очереди: *не внедряются никакие меры по снижению последствий.*

Каждые из следующих мер выполнены для трех различных отметок плотины:

- Цементация только оголовка;
- Пониженная эффективность цементации только оголовка (т.е. долгосрочная потеря эффективности цементации);

- Только гидравлическая завеса;
- Гидравлическая завеса и цементация оголовка;
- Гидравлическая завеса и пониженная эффективность цементации оголовка.

Во всех случаях, размер образованной полости всегда меньше, чем 3 м или соляной пласт проникает в тело плотины.

Последствия проникновения соляного пласта в тело плотины весьма незначительны. Насыпь плотины над Йонахшским разломом имеет приблизительно 10% пористость. Проникновение соли будет происходить очень медленно; она начнет заполнять пустотные пространства в теле плотины, и будет выщелочена наполненной водой в верхней части насыпи плотины до достижения нового равновесия. В самом худшем случае, новое равновесие будет служить возвратом в первоначальное состояние, контролируемое предлагаемыми мерами по смягчению.

Был исследован один конкретный «наихудший» вариант: учитывая сниженную эффективность гидравлической завесы, сниженную эффективность цементации и потерю глиняного покрытия соляного пласта, а также 40-летнюю задержку строительства после плотины первой очереди. В этом случае, образование полости может превысить 5 м.

Нет никакой значительной разницы в градиентах подземных вод в соляном пласте для трех вариантов плотины для 2 очереди.

6 ВЫВОДЫ ПО ОСНОВНОЙ МОДЕЛИ

Выводы на основе различных проведенных анализов следующие:

- Вариант «никаких корректирующих мер» по Йонахшскому разлому, т.е. плотина будет построена без использования мер по снижению последствий выщелачивания. Этот вариант не приемлем для сценариев с высокой скоростью подъема соляного пласта или продолжительного срока перед завершением второй очереди, так как со временем выщелачивание может привести к значительным провалам, что в свою очередь может повлиять на водоудерживающую функцию или даже на целостность плотины.
- Наиболее эффективной комбинацией мер по минимизации последствий являются цементационная и гидравлическая завеса. В данном случае, даже рассматривая наиболее пессимистические значения пустотности и гидравлической проницаемости, не наблюдается значительного выщелачивания или образования пустот. В большинстве случаев, соляной пласт будет внедрен в тело плотины.
- Соляная завеса (инъекция рассола в верхушку водоносного слоя) теоретически может дополнительно замедлить процесс выщелачивания. К сожалению, предыдущие опыты показали, что технология соляной завесы ненадежна из-за эффекта засорения, а также из-за чрезвычайно

больших объемов соли, требуемой для ее функционирования. Модель показала, что соляная завеса является излишней мерой.

- Все результаты сильно зависят от поверхности соляного пласта покрытого глиной. Глиняное покрытие очень благоприятно, так как оно сдерживает процесс выщелачивания. Несомненно, что верхушка соляного пласта покрыта глиной, потому что эвапориты демонстрируют значительное содержание глины, глиняное покрытие наблюдалось в скважинах на объекте, и такое глиняное покрытие можно наблюдать на выталкиваемых диапирах по всему миру.
- Комбинация гидравлической и цементационной завесы должна привести к приемлемой скорости выщелачивания, которая остается ниже, чем подъем соляного пласта. Цементационные работы на верхушке соляного пласта должны быть достаточными для снижения скорости выщелачивания до приемлемого уровня, даже если достигнута гидравлическая проницаемость будет меньше 10 Люжон (единица по Люжону, приблизительная гидравлическая проницаемость в 10^{-6} м/с);
- Использование только гидравлической завесы было бы достаточным, но в случае значительной потери эффективности, ситуация обернется сценарием «никаких корректирующих мер», который не совсем безопасен. Такой же вывод сделан и для варианта только цементации оголовка пласта. **Поэтому рекомендуется внедрить оба метода: цементацию оголовка пласта и внедрение гидравлической завесы.**

Учитывая возможную погрешность некоторых вводных параметров (одним из ключевых является подъем соляного пласта), результаты сценариев должны рассматриваться с коэффициентом запаса 3. Кроме одного сценария, все остальные показывают, что нет никакого риска того, что выщелачивание может произвести неприемлемые полости.

Единственным критическим сценарием является тот, при котором завершение второй очереди плотины произойдет через 40 лет, потому что качество гидравлического барьера может ухудшиться, эффективность цементации может снизиться и может разрушиться глиняный купол над пластом. Однако этот вариант может означать, что в течение этого времени не будет проводиться никакого мониторинга и/или мер по смягчению последствий.

Учитывая опыт таджикских органов в мониторинге Нурекской плотины ниже по течению на протяжении нескольких десятилетий, ожидается, что риск провала мониторинга и/или технического обслуживания будет низким, но все еще он должен учитываться в общем анализе рисков проекта.

7 РЕКОМЕНДАЦИИ

7.1 Мониторинг

Тщательный мониторинг соляного пласта должен начаться немедленно. Это значение важно для подтверждения прогнозирования скорости выщелачивания и надежности моделей. Он должен состоять из следующего:

- Измерения смещений в пределах соляного пласта и окружающей породы, а также
- Слежение за деформациями в пределах соляного тела с помощью ряда клинометров.

Чтобы производить мониторинг потенциального выщелачивания соли, предлагаются следующие системы:

- Мониторинг напора подземных вод, чтобы проверить эффективность гидравлической завесы (скважины и датчики давления);
- Мониторинг проницаемости воды для проверки надежности модели и текущего процесса выщелачивания, если такой имеется (скважины и ячейка для измерения электрической проводимости);
- Микро гравиметрия чтобы проверить скорость подъема соли на Йонахшском разломе и образование потенциальных полостей (одна кампания каждые 6 месяцев во время фазы строительства первой очереди); и
- Регулярная гидролокация откоса плотины после заполнения водохранилища, для обнаружения аномальных деформаций на верховом откосе.

7.2 Наблюдение и техническое обслуживание

Числовая модель ИГП по растворимости должна быть улучшена и откалибрована с более точными значениями гидравлической проницаемости и кинематической проницаемости оголовка пласта. Дальнейшие изыскания все еще могут улучшить наше понимание по вводным параметрам. Требуется тщательная оценка скорости подъема соли в пределах разлома, и измерения должны быть возобновлены как можно скорее. Эта модель может быть полезным прогнозирующим инструментом, и она должна постоянно пополняться данными со стройплощадки и поддерживаться в эксплуатационном состоянии в течение всего срока службы плотины.

Если возникнут крупные полости (которые могут быть обнаружены мониторингом микро гравиметрии), должно быть обеспечено своевременное вмешательство.

Если какая либо из двух мер по смягчению потеряет свою эффективность, нужно будет заново выполнить соответствующую меру по смягчению последствий. Должны быть предусмотрены соответствующие меры для вмешательства и восстановления этих двух процессов. Во время или в конце первой очереди, которая является очередью с наибольшим риском, повторная цементация и переустановка гидравлической завесы может быть выполнена с гребня плотины первой очереди.

Во второй очереди, единственным вариантом для повторной цементации и восстановления гидравлической завесы при условии содержания полного водохранилища, будет работа с берегов, над уровнем воды в водохранилище. Это может быть осуществлено, используя направленное бурение. Это поддерживает осуществление под-горизонтальной гидравлической завесы через направленное бурение.

8 ВЫВОДЫ

Из этих предположений и моделей Консультантов по ТЭО ясно, что и эффективная цементация и эффективная гидравлическая завеса необходимы для предотвращения чрезмерного выщелачивания соли. Обе меры по смягчению необходимы для охвата риска частичной потери эффективности одной из этих мер.

Даже если результаты анализа показывают тот факт, что приемлема даже только гидравлическая завеса, или только цементация, обе из этих мер должны поддерживаться в рабочем состоянии в течение всего срока службы плотины.

Для того чтобы проверить эффективность мер по снижению последствий на этапе проектирования, требуется соответствующий мониторинг, чтобы можно было своевременно реагировать и проводить ремонтные работы как можно скорее. Были предложены детальные меры по мониторингу.

С внедрением гидравлической и цементационной завес, соответствующей системы мониторинга и плана целесообразного устранения неисправностей в случае потери эффективности мер по смягчению последствий, Консультанты делают выводы о том, что эти меры являются достаточными для обеспечения безопасности предлагаемой плотины от воздействия потенциального выщелачивания соляного клина.