

Министерство образования и науки Российской Федерации  
федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования

**«Санкт-Петербургский горный университет»**

*На правах рукописи*

**КОРОБАНОВА Татьяна Николаевна**

**ГЕОДИНАМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ  
ОТВАЛОВ ФОСФОГИПСА НА ГЛИНИСТОМ ГРУНТОВОМ  
ОСНОВАНИИ**

Специальность 25.00.16 – Горнопромышленная и нефтегазопромысловая  
геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр

**Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Научный руководитель –  
доктор технических наук,  
главный научный сотрудник  
**Н.А. Кутепова**

**Санкт-Петербург – 2018**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЕДЕНИИ ОТВАЛЬНЫХ РАБОТ .....	10
1.1 Проблема размещения отходов переработки фосфатного сырья на отечественных и зарубежных предприятиях.....	10
1.2 Общие представления об опасных горно-геологических процессах, осложняющих ведение отвальных работ на горных предприятиях .....	19
1.3 Анализ изученности вопроса обеспечения устойчивости отвальных сооружений на предприятиях Российской Федерации .....	24
1.4 Выводы по главе 1 и постановка задач исследований .....	34
ГЛАВА 2 АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ УСТОЙЧИВОСТЬ ОТВАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ПРЕДПРИЯТИИ БАЛАКОВСКИЙ ФИЛИАЛ АО «АПАТИТ».....	37
2.1 Характеристика технологических параметров складирования отходов производства на предприятии Балаковский Филиал АО «Апатит» .....	37
2.2 Оценка инженерно-геологических особенностей техногенного массива отвального сооружения .....	43
2.3 Изучение изменений состояния и свойств пород естественного основания отвалов под воздействием отвалообразования .....	66
2.4 Выводы по главе 2.....	82
ГЛАВА 3 ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ, ОКАЗЫВАЮЩИХ ВЛИЯНИЕ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ОТВАЛЬНЫХ РАБОТ .....	85
3.1 Результаты натурных наблюдений за деформациями отвала .....	85
3.2 Закономерности развития деформаций уплотнения техногенных пород в ходе ведения отвальных работ.....	101
3.3 Закономерности развития оползневых процессов, оказывающих влияние на безопасность отвальных работ.....	109

3.4 Выводы по главе 3 .....	117
ГЛАВА 4 ОБОСНОВАНИЕ УСТОЙЧИВЫХ ПАРАМЕТРОВ ОТВАЛА ФОСФОГИПСА БФ АО «АПАТИТ» С УЧЕТОМ ОРГАНИЗАЦИИ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА .....	119
4.1 Расчетные исследования устойчивости откосов отвала при дальнейшем повышении его высоты.....	119
4.2 Обоснование состава мероприятий по улучшению условий устойчивости откосов отвала .....	134
4.3 Методические принципы управления устойчивостью отвала на базе организации геодинамического мониторинга при ведении отвальных работ на предприятии Балаковский Филиал АО «Апатит» .....	145
4.4 Выводы по главе 4.....	156
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	159
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	161

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Разработка месторождений полезных ископаемых и последующая переработка минерального сырья предопределяет неизбежное образование отходов, часть их которых является полезным продуктом и может быть использована для хозяйственных нужд. Так, при производстве экстрактной фосфорной кислоты (ЭФК) из апатитов и фосфоритов образуется попутный продукт – фосфогипс. При получении одной тонны ЭФК образуется 4-5 т гипса, а при ежегодном мировом объеме её производства 35-37 млн. т попутно возникает 180 млн. т фосфогипса. Востребованность фосфогипса как минерального ресурса составляет не более 5% от получаемых объемов, практически весь он направляется на длительное хранение в отвальное хозяйство.

Крупнейшие российские производители ЭФК расположены в Московской, Ленинградской, Вологодской, Саратовской областях, Краснодарском крае. Интенсификация производства с каждым годом обостряет проблему размещения фосфогипса, т.к. расширение объектов хранения продукции химической промышленности вблизи крупных городов ограничено отсутствием доступных площадей, ужесточением природоохранных требований. Рациональное решение проблемы состоит в увеличении отвалоёмкости имеющихся сооружений за счет наращивания их высоты.

Формирование высоких отвалов на глинистом грунтовом основании сопряжено с потенциальным риском нарушения устойчивости ввиду техногенных изменений геологической среды, трудно прогнозируемых на стадии проектирования. К числу объектов, остро нуждающихся в проведении специальных исследований для обоснования устойчивости, относится отвал Балаковского Филиала АО «Апатит». Потребности предприятия в ежегодном размещении 3 млн. т фосфогипса предопределяют необходимость увеличения высоты отвала в перспективе до 100 м. Однако его эксплуатация уже сегодня при высоте менее 60 м осложнена развитием оползневых процессов, представляющих опасность для работающего горнотранспортного оборудования и инженерных объектов, технологически связанных с отвалом.

**Степень изученности проблемы.** Научно-методический подход к изучению и прогнозу оползневых процессов изложен в трудах известных ученых в области инженерной геодинамики И.П. Иванова, Е.П. Емельяновой, Г.С. Золотарева. Исследованию техногенных изменений глинистых грунтов в основании сооружений посвящены работы Р.Э. Дашко, Р.С. Зиангирова, Н.А. Окниной, В.И. Осипова. Опыт обеспечения устойчивости отвалов освещен в работах Г.Л. Фисенко, С.П. Бахаевой, А.М. Гальперина, А.М. Демина, В.П. Жарикова, В.Г. Зотеева, Ю.В. Кириченко, А.В. Киянца, Ю.И. Кутепова, В.В. Мосейкина, В.Н. Попова, С.И. Протасова, П.С. Шпакова и др. Тема геомеханического обеспечения устойчивости откосных сооружений изучалась зарубежными авторами: Н. Моргенштерном, Я.Х. Хуаном, С. Сарма, Х. Клайперихом, Н. Тамашковичем, Х. Чешлоком, Ю.Н. Малюшицким и др. Изучению инженерно-геологических условий устойчивости отвалов фосфогипса посвящены работы М.А. Ивочкиной, Е.С. Кудашова, Ю.И. Кутепова, Н.А. Кутеповой, В.Е. Миронова.

Накопленный опыт обоснования устойчивости горнотехнических сооружений не охватывает вопросы изучения деформационного поведения отвалов фосфогипса при их формировании на территориях распространения глинистых грунтов. Не установлены факторы, обуславливающие нестабильное состояние отвалов, характерные виды деформационных процессов, закономерности их развития во времени, характер изменений инженерно-геологических и гидрогеологических условий на фоне увеличения геометрических параметров сооружений. Таким образом, разработка геодинамического обоснования устойчивости отвалов фосфогипса, является актуальной научной задачей, решение которой обеспечит безаварийную эксплуатацию сооружений при увеличении их высоты.

**Целью диссертационной работы** является обоснование устойчивости отвалов фосфогипса на основе выявленных закономерностей развития деформационных процессов.

**Идея работы.** Обоснование устойчивости отвалов фосфогипса на глинистом грунтовом основании должно производиться на базе результатов комплексного геодинамического мониторинга с учетом выявляемых изменений инженерно-геологических и гидрогеологических условий техногенных и естественных грунтовых массивов, видов деформационных процессов и закономерностей их развития по мере увеличения высоты сооружений.

**Основные задачи исследований:**

1. Изучение и оценка инженерно-геологических и гидрогеологических условий отвалообразования на БФ АО «Апатит» с целью выявления факторов, обуславливающих развитие деформационных процессов.

2. Выполнение лабораторных экспериментов по изучению влияния кислых технических вод на изменение прочности глинистых грунтов в основании отвала.

3. Обоснование механизма образования оползневых деформаций при формировании отвалов фосфогипса на территории распространения глинистых грунтов.

4. Разработка системы управления устойчивостью при формировании отвалов фосфогипса на базе комплексного геодинамического мониторинга.

**Научная новизна:**

1) обоснованы закономерности изменения строения и гидродинамического режима техногенного массива при формировании отвалов фосфогипса;

2) экспериментально доказано снижение прочности глинистых отложений в основании отвала под влиянием кислых технологических вод;

3) установлены причины, механизм и динамика развития деформаций оседания и оползневых смещений на отвале фосфогипса.

**Практическая значимость работы:**

1) выполнена оценка инженерно-геологических и гидрогеологических условий устойчивости отвала фосфогипса на БФ АО «Апатит»;

2) разработаны рекомендации по повышению высоты отвала с учетом организации дренажных мероприятий;

3) предложена система управления устойчивостью отвала на базе ведения геодинамического мониторинга;

4) установлены критериальные значения скоростей деформаций откосов отвала при переходе в опасную стадию оползневого процесса.

**Методы исследований.** Анализ существующих подходов к обоснованию устойчивости горнотехнических объектов. Оценка инженерно-геологических условий отвалообразования на основе полевых и лабораторных испытаний фосфогипса и естественных грунтов, отобранных из скважин. Оценка гидродинамического режима техногенного массива на основе режимных гидрогеологических наблюдений и численного моделирования геофильтрационных процессов. Лабораторное определение химического состава технических вод, водных вытяжек из грунтов, величины набухания и сдвиговой прочности хвалыньских глин. Интерпретация результатов инструментальных геодезических наблюдений за деформациями отвала. Расчеты устойчивости отвала с применением методов предельного равновесия и численного моделирования изменения напряженного деформированного состояния грунтов с ростом высоты сооружения.

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 25.00.16 – Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр:

пункт 3. Изучение сдвижения и деформаций породных массивов и земной поверхности, разработка методов и средств наблюдений, контроля и прогноза геомеханического состояния.

пункт 4. Обоснование методов оценки и расчета устойчивости бортов карьеров, откосов уступов и отвалов, подземных выработок.

пункт 13. Инженерно-геологическое обеспечение управления состоянием массивов горных пород, обоснование проектов сокращения нарушенных горными работами территорий и восстановления экологического равновесия.

### **Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Развитие деформационных процессов на отвалах фосфогипса вызвано изменениями строения и гидродинамического режима техногенного массива при увеличении его высоты, снижением прочности глинистых грунтов в основании вследствие их структурных нарушений и физико-химических преобразований под влиянием кислых технических вод.

2. Механизм оползневых деформаций на отвале фосфогипса определяется развитием фильтрационного выпора у нижней бровки откоса в зоне разгрузки техногенного водоносного горизонта, активизацией сдвиговой ползучести и выдавливанием глинистых грунтов основания из-под отвала.

3. Обеспечение устойчивости отвалов фосфогипса на глинистом грунтовом основании достигается посредством осушения техногенного массива с помощью горизонтальных скважин, поэтапной корректировки схемы размещения отходов и параметров отвала по результатам комплексного геодинамического мониторинга.

**Достоверность и обоснованность научных положений** подтверждается: многолетними инструментальными геодезическими измерениями смещений поверхности и откосов отвала, натурными наблюдениями за гидродинамическим режимом техногенного массива и эффективностью работы опытной дренажной скважины; представительным объемом полевых и лабораторных исследований физико-механических свойств техногенных и естественных грунтов; расчетным обоснованием устойчивости откосов отвала.

**Личный вклад автора** заключается в постановке задач исследований, анализе и обобщении существующих методов исследований для обоснования устойчивости откосов отвальных сооружений, участии в организации и проведении комплексного геодинамического мониторинга на отвале фосфогипса, выполнении лабораторных испытаний грунтов, обработке и интерпретации полученных результатов.

**Реализация результатов работы.** Полученные результаты использовались при разработке рекомендаций по безопасной эксплуатации отвала БФ АО «Апатит».

**Апробация работы.**

Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на 55-й Международной научно-практической конференции на базе Краковской горно-металлургической академии (Краков, Польша, 2014), на Международных научных симпозиумах «Неделя горняка» (Москва, 2015, 2017), на VIII Международной научной конференции по прикладным и фундаментальным наукам (Сент-Луис, США, 2015), на 67-м Международном форуме горняков и металлургов (Фрайберг, Германия, 2016), на XL и IV Международных научно-практических конференциях «Наука вчера, сегодня, завтра» (Новосибирск, 2016), "Научные исследования и разработки 2018 года" (Новосибирск, 2018), на заседаниях Научного центра геомеханики и проблем горного производства.

**Публикации:** основное содержание диссертационной работы отражено в 8 публикациях, из них 3 в журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, определяемых ВАК при Минобрнауки России.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (152 библиографических записей), изложенных на 175 страницах машинописного текста, содержит 21 таблицу, 85 рисунков.

**Благодарности.** Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю д.т.н. Н.А. Кутеповой; сотрудникам Санкт-Петербургского горного университета: д.т.н. профессору Ю.И. Кутепову, к.г.-м.н. Г.Б. Поспехову, д.т.н. М.А. Карасёву, к.г.-м.н. Ф.П. Стрельскому; руководителю изыскательской организации в г. Балаково А.Ф. Шумейко за оказанное содействие при выполнении исследований и помощь при подготовке диссертационной работы.

# ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЕДЕНИИ ОТВАЛЬНЫХ РАБОТ

## 1.1 Проблема размещения отходов переработки фосфатного сырья на отечественных и зарубежных предприятиях

Развитие промышленности оказывает определяющее влияние не только на экономику той или иной страны, но и на её политическое положение в мире, и общественное благосостояние в целом. Сегодня нам известно множество различных отраслей, начиная с тех, которые возникли во времена промышленных переворотов, такие как каменноугольная, нефтяная, металлургическая и другие. Однако определившими научно-технический прогресс в первой половине XX века является так называемая «авангардная тройка», в составе которой электроэнергетика, машиностроение и химическая промышленность. В этот век лидирующую позицию заняла именно химическая промышленность, ведь не зря XX век прозвали веком химизации.

Впервые химические предприятия в нашей стране появились в начале XIX века. Это были: завод по производству серной кислоты (1805 г., Московская губерния), содовый завод (1864 г., Барнаул), завод искусственных удобрений (1892 г.) и ряд других. Сейчас на территории Российской Федерации насчитывается около 7,6 тыс. предприятий тяжелой промышленности химического производства, в ходе которого почти 80% изготовленной продукции приходится на пластмассы, синтетические соли, аммиак, серную кислоту и минеральные удобрения.

Человечество почти полностью зависит от минерально-сырьевого комплекса, ведь минеральное сырье обеспечивает производство исходными материалами и энергетической основой на 70% всей номенклатуры конечной продукции людей [94].

Высокие темпы развития горной промышленности, энергетики, металлургии, металлообработки, химической, нефтехимической и других промышленности, а также областей инженерно-строительной и хозяйственно-

бытовой деятельности влекут за собой неизбежное образование и накопление промышленных отходов. И одним из массовых видов отходов являются отходы химической промышленности.

При производстве минеральных удобрений образуются различные виды отходов, среди которых отходы калийной промышленности, составляющие 36%, фосфогипса – 25%, хвосты флотации апатитового концентрата – 19%, фосфоритовых и серных руд – 19% [18]. Образование того или иного производственного отхода исчисляется в объемах, равных десяткам и даже сотням миллионов тонн. Данное обстоятельство связано с тем, что промышленный отход составляет основную массу при извлечении того или иного полезного компонента.

В последние годы большой научный и практический интерес в химической промышленности представляет твердый отход – фосфогипс, занимающий первое место по объему производства среди промышленных отходов, содержащих гипс. Фосфогипс образуется при производстве экстракционной фосфорной кислоты и сложных концентрированных удобрений. Исходным природным сырьем являются фосфатсодержащие руды: апатиты и фосфориты. Ценность его определяется содержанием в руде фосфора в пересчете на  $P_2O_5$  (пентоксид фосфора).

Апатитовые месторождения приурочены к магматическим и метаморфическим породам, указывающим на эндогенную природу образования. К апатитовой руде относят смесь минералов апатита с общей формулой  $Ca_{10}(PO_4)_6R_2$  (где R – фтор, хлор и гидроксил) с элементарной кристаллической ячейкой из 42 частиц и нефелина. Часть ионов Ca может быть замещена ионами Sr, Mg, Ba, Mn, Fe, а также редкоземельными элементами в сочетании с щелочными металлами. Апатитовые минералы отмечены как наиболее распространенные и имеющие промышленное значение. Содержание в них  $P_2O_5$  до 40%. Крупнейшими запасами апатитовых руд обладают: Россия, ЮАР, Уганда, Бразилия, Финляндия, Вьетнам. У нас в стране ярким примером по запасам пентоксида фосфора является месторождение на Кольском полуострове (Мурманская область), не имеющее аналогов в мире.

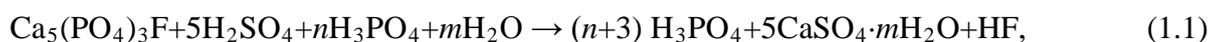
Фосфоритовые месторождения приурочены к осадочным породам, формирующимся в результате экзогенных процессов и важнейшая часть которых – группа минералов фосфата кальция. Кроме фосфата кальция, в его состав входят не фосфатные минералы. К ним относятся: доломит, кварцит, кальцит, глауконит, халцедон, лимонит, алюмосиликат, частицы глины, соединения тяжелых металлов, железа, магния, фтора, органические примеси. Содержание  $P_2O_5$  в фосфоритах от 6-8 до 33-36%, а в высококачественных органогенных фосфоритах и вовсе 38-40,5%. Здесь в качестве примера следует привести: Марокко, США, Перу, Казахстан Монголия, Китай, обладающих наибольшими запасами фосфоритов.

Главными лидерами-производителями фосфатного сырья и изготавливаемой из него продукции являются: США (43,97 млн. т), Китай (29,0 млн. т), Марокко (23,59 млн. т) – данные на 2000 г. и Россия (10,29 млн. т) – данные на 2006 г. Следует отметить, что наша страна традиционно занимает одно из ведущих мест на мировом рынке фосфатного сырья [1]. В России крупнейшими холдингами в промышленности минеральных удобрений являются «ФосАгро», «ЕвроХим» и «Акрон» [126].

Экстракционная фосфорная (ортофосфорная) кислота (ЭФК) является базовым продуктом при производстве большей части элементарного фосфора, концентрированных простых и сложных удобрений, кормовых фосфатов. В нашей стране для ее производства используется хибинский апатитовый концентрат. В промышленности существует два способа получения фосфорной кислоты: термический и экстракционный. Термический способ получения фосфорной кислоты заключается в высокотемпературном восстановлении фосфатов и возгонке в электропечах элементарного фосфора, который затем окисляют до фосфорного ангидрида, образующего при гидратации фосфорную (термическую) кислоту. Основным же методом получения ЭФК является вытеснение сильными кислотами фосфорной кислоты из сырья. В качестве вытесняющей кислоты могут быть использованы: серная, азотная, фосфорная, а также и их смеси. Свыше 70% природного фосфатного сырья по всему миру

перерабатывается с использованием серной кислоты, отсюда и название способа получения – сернокислотный (экстракционный). Термическая кислота более чистая по сравнению с экстракционной, даже при использовании сырья низкого качества, что является ее преимуществом. Однако в настоящее время наблюдается снижение производства термической кислоты, т.к. процесс ее получения представляется весьма энергоемким. В связи с этим она более дорогостоящая.

Процесс разложения апатитового концентрата серной кислотой описывается следующим уравнением (сернофосфорнокислотное растворение фторапатита):



В ходе реакции экстрагируется фосфорная кислота, и также образуются сульфат кальция и фторсодержащие газы.

В зависимости от температурно-концентрационных условий процесса кристаллогидраты сульфата кальция (твердая фаза) могут выпадать в осадок в виде дигидрата, полугидрата или ангидрита. Эти формы существования сульфата кальция при изменении режима ведения процесса могут переходить из одной в другую. Соответственно выделяют дигидратный, полугидратный и ангидритный методы производства фосфорной кислоты.

Образующийся в качестве побочного продукта дигидрат или полугидрат сульфата кальция в связи с содержанием в них примесей  $\text{P}_2\text{O}_5$  (неразложенного фосфата, недоотмытой фосфорной кислоты, сокристаллизованного  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) называют соответственно фосфогипсом или фосфополугидратом. Но при рассмотрении проблемы транспортирования, хранения и использования оба продукта обычно называют фосфогипсом [85, 127, 138].

Фосфогипс представляет собой от белого до серого цветов тонкодисперсный, близкий к мономинеральному порошок, имеющий при выходе с химзавода высокую влажность по разным данным от 25 до 45%. Его химический состав может зависеть от вида фосфатного сырья, способа производства и способа складирования [85, 140].

Удаление побочного продукта предполагает выбор наиболее надежного и экономичного способа его транспортирования и хранения с учетом конкретных

условий каждого предприятия. В настоящее время в мире практикуют два основных направления утилизации фосфогипса: сброс в водные объекты (реки, моря) и укладка на суше. Первый способ практикуют лишь некоторые государства: Марокко, Тунис, страны Южной Африки и Мексика, что составляет примерно 5% [139]. «Наземное» складирование отходов требует специальных инженерных сооружений для хранения и осуществляется в так называемые «сухие» отвалы или в гидротвалы (гипсонакопители намывного или наливного типов). Накопитель носит то или иное название в зависимости от способа транспортировки:

– «Сухой» (полусухой отбор) – с перемещением влажного отхода без нейтрализации автотранспортом. В России данный способ практикуют, например, ПО «Фосфорит» (г. Кингисепп Ленинградской области) и БФ АО «Апатит» (г. Балаково Саратовской области).

– «Мокрый» (гидротранспорт) – подача отхода в отвал гидротранспортом по пульпопроводу после нейтрализации кислот в жидкой фазе известью и репульпации. Примером служат предприятия: ОАО «Метакхим» (г. Волхов Ленинградской области), ОАО «ФосАгро-Череповец» (г. Череповец Вологодской области) и ООО «ЕвроХим-Белореченские Минудобрения» (г. Белореченск Краснодарского края).

Фосфогипс как отход многотоннажный является весьма обременительным. Так на предприятиях по производству минеральных удобрений на 1 т полезного продукта приходится от 4 до 7 т фосфогипса в зависимости от перерабатываемого сырья: апатитового или фосфоритового соответственно. В настоящее время ежегодно у нас в стране образуется более 15 млн. т фосфогипса, а по всему миру эта цифра уже достигает 100-280 млн. т в год. Всего в мире насчитывается свыше 52 стран, которые складировывают фосфогипс в отвалы, и общая цифра составляет уже 5,6-7,0 млрд. т [141]. Так, например, в отвалах Туниса (г. Габес) скопилось 52 млн. т фосфогипса, на Украине – 60 млн. т, в Испании (г. Уэльва) – 100 млн. т [146], в Бразилии [148], во Флориде (США) – более 200 млн. т [141], в нашей стране – 150 млн. т и т.д.

Складирование фосфогипса, так или иначе, приводит к нарушению экологического равновесия, что связано с изменением природного ландшафта, загрязнением почвенного покрова, ухудшением состояния атмосферного воздуха, изменением состояния и свойств горных пород, слагающих основания отвалов, гидрологического и гидрогеологического режимов и т.д.

Данную проблему можно решить двумя способами, которые необходимо использовать в комплексе. Первый заключается в использовании фосфогипса в качестве вторичного сырья вместо природного гипса [58, 83], второй – в сокращении удельной площади взаимодействия отходов при их складировании с окружающей средой, что подразумевает увеличение отвалоёмкости уже имеющихся земельных отводов.

Проблема использования фосфогипса в качестве вторичного сырья для производства ликвидных продуктов актуальна еще с 60-х гг. XX века. Результаты многочисленных исследований и практики убедительно доказали техническую возможность и целесообразность использования фосфогипса в народном хозяйстве вместо традиционных видов природного сырья (рисунки 1.1-1.2) [140]. Это связано с содержанием в фосфогипсе от 80 до 98% гипса, что позволяет отнести его к гипсовому сырью. Здесь следует отметить наиболее перспективные направления использования фосфогипса как ценного крупнотоннажного вторичного ресурса (таблица 1.1):

- 1) в сельском хозяйстве для химической мелиорации кислых и солонцовых почв и компостирования с органическими удобрениями;
- 2) в цементной промышленности в качестве минерализатора – добавки к сырьевой смеси и как регулятор скорости схватывания – вместо природного гипса;
- 3) для производства гипсовых вяжущих и изделий;
- 4) в качестве наполнителя в производстве пластмасс, стекла;
- 5) в строительстве автомобильных дорог, зданий и сооружений;
- 6) при обустройстве морских и прибрежных зон;
- 7) для производства серной кислоты и др.

Таблица 1.1 – Некоторые примеры по использованию фосфогипса как вторичного ресурса в различных странах

Страна	Сфера применения фосфогипса
США	Дорожное строительство; гипсование почв (в сельском хозяйстве); заполнение выработанных шахт
Китай	Строительство
Япония	Цементная промышленность
Германия	Цементная промышленность; производство гипсовых вяжущих
Франция	Цементная промышленность; наполнитель в бумажной и лакокрасочной промышленностях
Нидерланды	Наполнитель в бумажной и лакокрасочной промышленностях
Индия	Гипсование почв (в сельском хозяйстве)
Бразилия	Сельское хозяйство
Испания	Сельское хозяйство
Южная Африка	Строительство дорог, домов
Финляндия	Испытание дорог на морозостойкость; наполнитель в бумажной и лакокрасочной промышленностях
Украина	Сельское хозяйство; высокая насыпь (опытный случай); строительство и наращивание дамбы, ограждающей хранилище протоктов; производство гипсовых вяжущих
Казахстан	Сельское хозяйство; торговля
Россия	Сельское хозяйство; цементная промышленность; производство гипсовых вяжущих; строительство участков автодорог, железнодорожных насыпей, ограждающих дамб шламонакопителей (опытные случаи)



Рисунок 1.1 – Использование фосфогипса в строительстве жилого комплекса (Китай) [140]



Рисунок 1.2 – Влияние фосфогипса на качество урожая хлопчатника  
(Казахстан) [140]

Данные примеры по вовлечению фосфогипса положительны в большинстве своем, однако количественно это лишь 15% по всему миру. Оставшиеся же 85% направляются в отвалы. Это связано с тем, что фосфогипс загрязнен различными примесями (серная кислота, соли калия и натрия, фториды и кремнефториды, оксид кремния, редкоземельные элементы, радиоактивные вещества и др.), которые не позволяют заменить им природный гипс. В свою очередь необходимость в применении сложного и дорогостоящего оборудования по подготовке фосфогипса как вторсырья, а также существующие методы, процессы и технологии требуют больших затрат энергии и тепла по сравнению с переработкой природного гипсового сырья. Отсюда высокая себестоимость фосфогипса. Исключением являются страны, не имеющие месторождений природного гипса, например, Япония, полностью его перерабатывающая. Также фактором ограничения по использованию фосфогипса является радиоактивность. Известно, что радиоактивные элементы мигрируют в некотором количестве при переработке фосфатного сырья [146-147]. Наиболее радиоактивными являются фосфогипсы Швеции, Испании и Марокко, что также осложняет вовлечение

отхода в производство. Без дополнительной обработки фосфогипс пригоден для сооружения оснований дорожных одежд, но только в тех случаях, когда к ним не предъявляются повышенные требования по морозостойкости [83].

По прогнозам к 2040 г. количество отхода может возрасти вдвое. Вопрос доведения фосфогипса до такого состояния, чтобы была возможность использовать его целиком, и это было рентабельно, или же ассимилировать отход в природной среде без ущерба для ее естественного состояния, как никогда актуален. Таким образом, современные проблемы природопользования и образования отходов являются взаимосвязанными [144], что требует поэтапного и при этом комплексного решения.

Второй способ по снижению негативного влияния складирования отвалов фосфогипса направлен на максимальное сокращение площадей территорий, занимаемых ими. При проектировании, строительстве, эксплуатации и рекультивации отвальных сооружений должны учитываться принципы максимальной технико-экономической эффективности отвальных работ при минимальном ущербе естественной экологической обстановке. Сокращение изымаемых земельных участков достигается посредством увеличения отвалоёмкости данных сооружений. При этом обеспечение устойчивости отвалов требует геомеханического обоснования оптимальных проектных параметров сооружения. Основными параметрами устойчивости отвальных сооружений являются: высота и результирующий угол. Расчеты устойчивости необходимо выполнять с учетом строения отвального массива и физико-механических свойств техногенных пород, отсыпаемых в отвал, строения естественного основания отвального сооружения и физико-механических свойств слагающих его отложений, а также с учетом гидрогеологических условий отвала и его основания (уровнем техногенного водоносного горизонта, уровнем и напорами подземных вод в основании отвала).

## **1.2 Общие представления об опасных горно-геологических процессах, осложняющих ведение отвальных работ на горных предприятиях**

В последнее столетие ученые все чаще обращают внимание на процессы, вызванные активной деятельностью человека на Земле. В нашей стране основы учения о геологической деятельности человека, техносфере и ноосфере были заложены выдающимися академиками В.И. Вернадским и его учеником А.Е. Ферсманом в их классических трудах. Следует отметить, что понятие «техногенез» было сформулировано еще в 1922 году академиком А.Е. Ферсманом, который понимал его как процесс изменения природных комплексов под воздействием производственной (инженерной) деятельности человека. На современном этапе расширение и углубление знаний в этой области отражены в работах крупнейших ученых А.П. Виноградова и А.В. Сидоренко. По мнению А.В. Сидоренко: «Деятельность человека, преобразующего лик Земли, выступает теперь как разумно направленный геологический фактор. Человек не только механически перемещает вещество Земли, но и играет роль грандиозного геохимического, гидрогеологического, инженерно-геологического агента ...».

Разными авторами процесс, возникающий и развивающийся под влиянием деятельности человека, может называться техногенно-геологическим, антропогенным, природно-антропогенным, инженерно-геологическим и др.

Сейчас существует множество классификаций техногенно-геологических процессов и явлений. Первые же были разработаны В.А. Приклонским в 1951 г., П.Н. Панюковым в 1956 г., Н.Я. Денисовым и др. Наиболее полно описал техногенные процессы и явления в своей монографии 1978 года Ф.В. Котлов [59]. Он выделил 5 групп, 17 классов и 92 вида техногенных процессов и явлений. Наибольшее техногенное влияние на геологическую среду, по его мнению, приходится на горное дело, инженерно-строительную деятельность человека, сельское и лесное хозяйства. Данное влияние приводит к нарушению сложившегося природного равновесия, что сопровождается активизацией уже имеющихся экзогенных геологических процессов, а также может привести к возникновению новых – техногенных, зарождающихся при взаимодействии

технологических процессов с геологической обстановкой. Как следствие, негативные проявления данных процессов создают угрозу для жизнедеятельности людей, вызывают крайне неблагоприятные технологические и экологические последствия [70].

Техногенные процессы, сопровождающие разработку месторождений полезных ископаемых, принято называть горно-геологическими (П.Н. Панюков, 1956 г.). Для явлений, происходящих на отвалах, бортах карьеров, введены термины «деформации отвалов и бортов карьеров», «нарушение устойчивости откосов/бортов» и «смещение» [35-38]. А.М. Деминим было дано следующее определение деформации откоса: «...деформация открытой горной выработки или отвала – всякое изменение первоначальной технологической формы» [36]. Деформации отвальных массивов выступают как нестационарные случайные процессы, так как нарушение их устойчивости вызвано многочисленными природными и техническими факторами.

Ввиду многообразия факторов, вызывающих деформации откосов, разными исследователями были предложены классификации деформационных процессов на основании различных признаков: размеров, строения, причин образования и условий, способствующих их возникновению и развитию, механизма и динамики процесса [39-40, 103].

Согласно автору [35], по скорости протекания деформации можно разделить на непрерывные, происходящие с постоянной скоростью, и циклические – с переменной скоростью. К непрерывным относятся осадки, осыпи, суффозионное и поверхностное оплывание, к циклическим – оползни.

В своей работе [117] предложил разделять деформации отвалов на виды:

1. Осыпи из отдельных частиц и кусков породы, сползающие по откосу к основанию отвала, возникают при превышении угла естественного откоса отвала над углом внутреннего трения отвальных пород.

2. Размывы, просадки и трещины на отвалах как следствие неустойчивости их оснований.

3. Оползень как результат нарушения равновесия пород под воздействием выветривания или переувлажнения их атмосферными осадками или подземными водами, а также действия внешних сил.

4. Обвал – отрыв и перемещение массы отвальных пород вниз по склону, их опрокидывание и дробление.

Основным недостатком большинства классификаций является то, что они учитывают один фактор, влияющий на отвал. Кроме того, они не рассматривают связи деформаций со способами оценки их устойчивости.

А.М. Демин на основе анализа фактических случаев нарушений устойчивости открытых горных выработок и отвалов при открытой добыче полезных ископаемых предложил использовать в качестве классификационного признака наличие и расположение оползня относительно контура выработки поверхности или зоны разрушения в приоткосном массиве. Согласно выделенному признаку им была разработана классификация деформаций открытых горных выработок и отвалов, включающая четыре типа, шесть классов и восемнадцать видов [35].

Большинство исследователей рассматривали процессы нарушения устойчивости отвальных массивов через призму причин, приведших к ним.

Наиболее полно данный вопрос был рассмотрен А.М. Деминым [35-37]. В своих работах он разделил на три группы факторы, определяющие устойчивость отвалов:

– горно-геологические (изменение гидрогеологических условий отвала и его основания; трансформация напряженно-деформированного состояния пород отвала и основания; изменение физико-механических свойств техногенных пород, отсыпаемых в отвал, и слагающих его отложений);

– горнотехнические (общие высоты и генеральные (результатирующие) углы откосов; высоты отдельных ярусов и их количество; размеры берм между ярусами; нагрузки от горнотранспортного оборудования; технология транспортировки и др.);

– климатические (атмосферные осадки; выветривание пород в откосах и др.).

Известный ученый инженер-геолог П.М. Панюков выделил две группы причин по возникновению деформационных процессов [97-98]. К первой относятся природные агенты, такие как геологические условия, гравитация и др. Ко второй – искусственные, они же антропогенные, в числе которых способ отвалообразования, вид транспортировки отвальных грунтов и т.д.

В основном же на практике принято выделять деформации, осложняющие ведение отвальных работ, по видам: оползни, осыпи, обрушения, просадки и оплывины [123], что похоже на вышеупомянутую классификацию. При этом анализ, выполненный в ВИОГЕМ, показал, что случаи деформаций откосов распределяются по типам нарушений следующим образом: оползни – 42,7%, обрушения – 20,6%, осыпи – 14,7%, оплывины и просадки – по 10%. При этом 75% деформаций возникает в песчано-глинистых отложениях и только 25% приходится на откосы скальных и полускальных трещиноватых пород [70].

Увеличение объемов отходов производства, стремление сократить отведенные земельные площади под отвалы, приводит к решениям увеличить высоты существующих отвальных сооружений. На сегодняшний день это часто сопровождается наиболее опасным и наиболее серьезным видом деформаций – оползнем.

Примерами крупных современных оползней являются оползни, произошедшие на внешнем отвале № 1 разреза «Заречный» ОАО «СУЭК-Кузбасс» (01.04.2015 г.) и отвале на борту разреза «Черниговский» ОАО "Черниговец" (09.12.2015 г.), вовлекших в разрушительный процесс объемы пород отвального массива в 27,5 и 1,5 млн. м<sup>3</sup> соответственно. В первом случае оползень повлек экономический ущерб в размере ~ 8 млрд. руб.; во втором – зафиксирована смерть трех человек. Горнотехнические сооружения на момент аварий характеризовались высотами более 100 м [65].

Причиной возникновения оползней, главным образом, является несоответствие параметров отвалов несущей способности отвальной массы и

пород основания отвалов. В этом случае, главным образом, изучение инженерно-геологических и гидрогеологических условий отвалообразования встает на первое место.

Самыми катастрофичными и развивающимися во времени являются сдвиговые деформации типа оползней. В зависимости от наличия и мощности слабых грунтов в основании отвала и их прочности, выделяют надподошвенные, подошвенные и подподошвенные.

Надподошвенные оползни возникают в отвалах, сложенных слабыми породами, теряющими сцепление в процессе экскавации и укладки в отвал. Отсыпка в этом случае производится на прочное основание. Оползень характеризуется плавной криволинейной поверхностью скольжения, образующейся в нижней части откоса отвала, и оседанием верхней части площадки отвала. Механизм зарождения такого оползня следующий. Неуплотненная масса пород отвального сооружения является трехфазной средой (техногенная порода + вода + заземленный в пустотах воздух); при достижении отвалом некоторой высоты происходит отжим воздуха из пустот, после чего отвал – двухфазная среда (техногенная порода + вода). Дальнейшее возрастание давления за счет увеличения высоты сооружения приводит к отжиму воды из области высоких давлений в область низких, что сопровождается развитием порового давления, уменьшающего силы внутреннего трения.

Подошвенные оползни могут развиваться при размещении отвальных сооружений на слоистом основании, когда слои залегают согласно с поверхностью основания отвала и сопровождающиеся оседанием верхней бровки отвала и отсутствием видимых признаков развития оползня в основании отвала. Подошвенные оползни характеризуются ломаной поверхностью скольжения, проходящей в нижней части отвала по контакту с основанием или же по слабым контактам в породах основания.

Подподошвенные оползни происходят с захватом слабых пород основания и сопровождаются оседанием верхней площади отвала. Данный вид оползней распространен при отсыпке отвальных пород на естественное основание с низкой

несущей способностью, представленные: слабыми породами с пониженным сопротивлением сдвигу; породами глинистого состава, склонными к набуханию; слоистыми породами с резко пониженными характеристиками сопротивления сдвигу по контактам или породами, имеющими падение в сторону откоса.

Наиболее распространенным видом деформирования откосов отвала является осыпание. Процесс необратим, т.к. обусловлен физическим (колебание температуры; вибрации горнотранспортного оборудования и др.) и химическим (изменение минералогического состава пород при взаимодействии агрессивных вод и др.) выветриванием отвальных пород.

Осадки вызваны способностью отвальных пород – уплотняться. Данный деформационный процесс относится к длительно протекающим видам деформаций ввиду медленной сжимаемости глинистого основания.

В литературе уплотнение вызвано возрастанием нагрузок от вышележащих масс, однако в данной работе помимо гравитационного уплотнения осадки также вызваны физико-химическими процессами в отсыпаемых породах.

Применительно к объекту исследований процессами, развивающимся в ходе отвалообразования, являются оползни и осадки, причины возникновения, механизм нарушения устойчивости откосов отвала и закономерности развития которых, будут рассмотрены в главе 3.

Таким образом, при изучении существующих отвальных сооружений, проектировании новых, важно понимать, что отвалообразование часто сопровождается негативными деформационными процессами. Нужно руководствоваться множеством факторов, влияющих на устойчивость откосов отвалов, безопасность производства отвальных работ, а также экономическую целесообразность выполняемых операций по формированию насыпных массивов.

### **1.3 Анализ изученности вопроса обеспечения устойчивости отвальных сооружений на предприятиях Российской Федерации**

Складирование отходов производства в отвальные массивы предопределяет проявление достаточно серьезного внимания к отвальным работам. Под термином

«отвальные работы» понимают совокупность производственных операций по приему и размещению пустых пород в искусственные насыпи (отвалы) на специально отведенных территориях или в выработанном пространстве карьеров [52].

Важнейшими направлениями исследований в изучении процессов отвалообразования являются: разработка технологических схем отвальных работ; выбор применяемых для этих целей механизмов; обоснование безопасных параметров отвалов на всех этапах: от проектирования до рекультивации; исследование компонентного состава и свойств отходов; прогнозирование экологических последствий; возможность их утилизации и вторичного использования.

В начале 50-х годов в Уральском филиале ВНИМИ, а затем и головном институте, проводились исследования устойчивости бортов карьеров, уступов и отвалов на многих крупных предприятиях, осуществляющих открытую разработку МПИ. Научная школа, долгие годы возглавляемая Г.Л. Фисенко, представлена целой плеядой ведущих специалистов, среди которых наиболее известны В.Г. Сапожников, В.И. Пушкарев, Н.Н. Куваев, А.Б. Фадеев, Б.Г. Афанасьев, В.А. Мироненко, Т.К. Пустовойтова, А.М. Мочалов, Э.Л. Галустьян, И.И. Ермаков, Ю.И. Кутепов, Ю.А. Норватов, Е.В. Костин, Н.А. Кутепова. В работах института ВНИМИ выполнен анализ факторов, определяющих условия устойчивости бортов карьеров для различных типов МПИ, произведена типизация МПИ по условиям устойчивости, обоснованы расчетные схемы по оценке устойчивости бортов карьеров и отвалов, что нашло свое отражение в «Правилах обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах» – основном нормативно-методическом документе в этой области [69-70, 105].

Практически одновременно с ВНИМИ, а в некоторых случаях немного раньше или позже, при учебных и научно-исследовательских институтах СССР появляются группы исследователей (школы) или отдельные ученые, ведущие изучение условий формирования отвальных сооружений. Так, в Московском горном институте это И.И. Русский, Г.А. Нурок, В.Н. Попов, П.Н. Панюков, М.Е.

Певзнер, В.В. Ржевский, А.М. Гальперин, Н.Н. Медников, В.В. Истомин и др.; в Институте горного дела имени академика А.А. Скочинского – К.Е. Винницкий, Н.В. Мельников, А.М. Демин, О.И. Шушкина и др.; в Государственном Институте Горнохимического Сырья – М.Е. Певзнер; в Санкт-Петербургском Государственном Горном Институте (ЛГИ) – И.П. Иванов, Р.Э. Дашко, В.Н. Новожилов, Р.А. Такранов.

Кроме перечисленных школ горного профиля отвальными сооружениями занимались гидротехники (ЛГИ им. Калинина, Гидропроект, институт гидротехники им. Веденева, ВНИИГС и др.), обогатители (Механобр, ВАМИ, УКРуглеобогащения, ИОТТ и др.), строители (ЛИСИ, МИСИ, ДИИТ, МАДИ и др.) [64, 70].

Все работы, выполненные перечисленными выше школами и отдельными учеными, можно условно разделить на два направления: 1) сугубо технологические; 2) работы, посвященные геомеханическому обоснованию отвальных работ.

Работы по первому направлению посвящены обоснованию технологических схем и механизации процессов производства отвальных работ. Большой вклад в этой области внесли: Е.Ф. Шешко [134], И.И. Русский [113], Н.В. Мельников [79], В.В. Ржевский [112], П.Э. Зурков [46], В.Н. Попов [101], Н.Н. Мельников [80] и др. Они рассматривали многочисленные вопросы отвальных работ: от классификации отвалов до применяемого технологического оборудования.

И.И. Русским [113] были рассмотрены технология и практика строительства и эксплуатации отвалов, а именно: изложена технология, механизация и организация отвальных работ при колесном транспорте; дана методика выбора местоположения, этапности и очередности отсыпки отвалов, параметры отвальных забоев и тупиков, пионерных насыпей; освещены аспекты рекультивации земель, занятых под отвалы.

Н.Н. Мельников в своей работе [80] приводит общие закономерности организации и производства открытых горных работ на основе комплексной их механизации на всех периодах существования горного предприятия.

Работы, посвященные геомеханическому обоснованию отвальных работ, направлены на изучение инженерно-геологических и гидрогеологических условий, а также обеспечение оптимизации параметров горнотехнических сооружений.

В большинстве своем второе направление связано с обоснованием схем по расчету устойчивости откосов техногенных массивов. Превалирующая часть расчетов устойчивости откосов, нашедших практическое применение, относится к расчетным методам. Расчетные методы, они же инженерные основаны на разработке математической модели разрушения склона оползанием и дальнейшего движения оползающих масс с применением определенной математической зависимости. В 1920 году Г. Франсе предложил первый способ расчета устойчивости откосов, основанный на принципе Кулона. К настоящему времени разработано свыше 100 способов, различающихся между собой теоретическими предпосылками, заложенными в физическую модель деформационного поведения откосов, полнотой учета разнообразных горно-геологических факторов, точностью полученных результатов и т.д. [145, 149-150].

М.Е. Пезвнером была разработана классификация методов расчета устойчивости откосов, разделенных на классы (А, Б, В, Г и Д) [99]. Для использования в инженерной практике рекомендованы методы класса В, в которых оценка устойчивости откосов осуществляется исходя из условия предельного равновесия на основе: плоской поверхности скольжения; круглоцилиндрической поверхности скольжения (В. Феллениуса, Д. Тейлора и др.), в форме логарифмической спирали (А. Бишопа, Е. Спенсера и др.); поверхности скольжения сложной криволинейной формы (Г.Л. Фисенко, конечных элементов и др.) или ломаной формы (Н.Н. Маслова).

Использование метода, предложенного Г.Л. Фисенко, обладает существенным преимуществом по сравнению с другими методами, использующими заданную (круглоцилиндрическую) поверхность скольжения, и заключается в том, что он базируется на положении теории предельного равновесия о фиксированной величине угла наклона площадок скольжения к

направлению максимального сжимающего напряжения, что позволяет практически однозначно определить местоположение наиболее опасной поверхности в откосе без рассмотрения большого числа вариантов. Данный метод применяется обычно при расчете устойчивости отвалов практически в различных горно-геологических условиях (наличие плоскостей ослабления, возможности учета гидростатических и гидродинамических сил и т.д.).

В настоящее время для исследования напряженно-деформированного состояния пород получили распространение численные методы с применением компьютерного моделирования.

Методы математического моделирования НДС, в частности метод конечных элементов (МКЭ), обладают существенным преимуществом по сравнению с другими методами, так как дают возможность рассматривать массив горных пород как неоднородную, нелинейную, а при введении характеристик трещин, и не сплошную среду. Анализ напряженного состояния методом конечных элементов удовлетворяет условию статического равновесия и позволяет оценить изменения напряжений, вызванные варьированием других свойств, неоднородности и геометрических форм. В дополнение к анализу напряженного состояния программа обеспечивает создание сетки конечно-элементной модели, графическое построение этой сетки и изобар, вычисление коэффициента запаса и отыскание наиболее опасной поверхности скольжения.

Среди программ, основанных на численном методе моделирования, известны PLAXIS, ABAQUS и другие. Программный комплекс PLAXIS представляет собой специализированную двухмерную (трехмерную) компьютерную программу, которая используется для расчетов деформаций и устойчивости различных геотехнических объектов. При помощи программы реализуется обширный комплекс расчетов: на прочность и устойчивость породных и грунтовых массивов, в том числе обводненных; прочностные расчеты стен в грунте, георешеток, грунтовых анкеров; расчеты параметров двухфазных сред; расчет псевдодинамических задач и т.д.

ABAQUS – программный комплекс многогранного назначения для решения задач из различных областей инженерных знаний, в частности: статические задачи механики сплошной среды; усталостные задачи; задачи вязко-упругого и вязко-пластического отклика системы; динамические задачи механики сплошной среды; механика пористых сред и движения подземных вод и множество других.

Для решения задач геомеханики в программном комплексе ABAQUS встроены различные геомеханические модели среды, такие как: упруго-пластическая модель Кулона-Мора, упруго-пластическая модель Друкера-Пракера, модифицированная модель Cam-Clay, упруго-пластическая шатровая модель с упрочнением, для описания уплотняющихся сред. Также реализованы ряд вязко-упругих и вязко-пластических моделей и др.

Хорошо развитые численные методы решения систем нелинейных уравнений позволяют успешно справляться с высоко-нелинейными задачами геомеханики и геотехники.

Наряду с программами, основанными на численном методе моделирования, существует достаточное количество программных комплексов, в основе которых лежит метод предельного равновесия, к ним можно отнести следующие продукты: GALENA, SLIDE и др.

Из этой линейки продуктов в работе автор применил программный комплекс GALENA (компания BHP Engineering, Австралия), представляющий собой интегрированный комплекс для решения задач по оценке устойчивости искусственных откосов и бортов карьеров как в слабых грунтах, так и в скальных массивах. В данном программном комплексе реализуются методы Bishop, Spencer, Sarma и др. При этом могут быть приняты различные критерии разрушения: Кулона-Мора, Хоек-Брауна и ряд других.

Преимуществом программы является возможность проводить множественные исследования на созданной модели, варьируя один или несколько параметров при последующей постановке задачи. Также комплекс GALENA, помимо вычисления устойчивости, позволяет выполнить обратный расчет и вероятностный анализ. Помимо вышесказанного программой предусмотрено

использование как круглоцилиндрической, так и не круглоцилиндрической поверхности скольжения. Комплекс учитывает влияние дополнительных внешних нагрузок, сейсмических воздействий и подземных вод.

Основной целью геомеханических (инженерно-геологических) исследований условий отвалообразования является изучение состава, строения, состояния (физического и напряженного) и свойств пород отвальных сооружений и их оснований. Они обязательно предшествуют любому строительству отвальных сооружений, поэтому их достаточно много.

Среди работ, посвященных изучению инженерно-геологических условий отвалообразования, следует отметить работы М.Е. Певзнера, А.М. Гальперина, В.Г. Зотеева, И.П. Иванова, Ю.И. Кутепова, Н.А. Кутеповой, О.Ю. Крячко, В.Н. Попова, П.С. Шпакова, Ю.Л. Юнакова, И.И. Ермакова, С.П. Бахаевой и др. [5, 13-15, 31, 34, 40-42, 45, 47, 53, 60, 63-64, 66, 68-70, 86, 100-101, 135]. В них рассмотрены вопросы определения физико-механических свойств техногенных пород, оценки напряженно-деформированного состояния отвальных сооружений и их оснований, изучение деформирования откосов в натуральных условиях и на моделях из эквивалентных материалов.

С.И. Попов один из первых проводит геомеханические исследования на отвалах. В частности, им обоснованы принципы оптимизации параметров отвалов (высоты, углы наклона рациональной формы отвалов при заданной площади и геометрии откоса) по физико-механическим свойствам отвальных пород [104]. Кроме того, С.И. Попов еще в 1945 году разработал классификацию отвалов, широко используемую в настоящее время.

М.Е. Певзнер одним из первых начал развивать идею управления устойчивостью отвалов на основе знаний механизмов деформирования откосов в зависимости от инженерно-геологических условий отвалообразования. На эту тему им была защищена докторская диссертация, написано ряд статей и монографий [51, 99-100]. Под руководством М.Е. Певзнера выполнены оригинальные исследования по изучению инженерно-геологических условий

отвалообразования на объектах химической промышленности, в частности, с применением натуральных методов исследований.

В 1971 году В.В. Ржевским, П.Ф. Панюковым, А.М. Гальпериным, В.В. Истоминым [97] написана монография «Геомеханика отвальных работ на карьерах», где авторы рассматривают вопросы изучения деформаций отвалов, физико-механических свойств отвальных массивов их напряженного состояния и применяемых на отвалах технологий. В последующем А.М. Гальпериным производятся многочисленные исследования на отвалах различных производств, по результатам которых им подготовлен ряд монографий [12, 15, 18-19], последняя из которых «Техногенные массивы и охрана окружающей среды» (2006 г.), написанная в соавторстве с коллегами из Германии В. Ферстером и Х.-Ю. Шефом, обобщает опыт изучения отвалов «сухой» вскрыши и гидроотвалов в главах 1 и 2 «Насыпные массивы» и «Намывные массивы» [18-19].

С точки зрения инженерно-геологического изучения примечательны работы, выполненные представителями Уральской школы (г. Свердловск). Под руководством В.Г. Зотеева, проводились многочисленные исследования по установлению закономерностей деформирования отвальных ярусов различной высоты и интенсивности отсыпки, которые легли в основу методики расчета допустимой скорости подвигания отвального фронта. Данные разработки важны в практическом плане, т.к. выявленные взаимосвязи режима отсыпки ярусов с их деформациями, позволили обосновать возможность ведения отвальных работ с разгрузкой автосамосвалов через предохранительный вал непосредственно под откос. В.Г. Зотеевым выполнены также исследования по изучению процесса сегрегации при отсыпке отвалов и установлены закономерности формирования по высоте отвалов зон с различными показателями сопротивления сдвигу и деформационным поведением [45].

Весьма сложным вопросом при обосновании устойчивости отвальных сооружений является определение расчетных показателей прочностных свойств отвальных пород. Изучению физико-механических свойств пород «сухих» отвалов на угольных и горнорудных предприятиях посвящены работы

исследователей школы ВНИМИ: Г.Л. Фисенко, О.Ю. Крячко, В.Г. Сапожникова, Э.Л. Галустьяна, Ю.А. Норватова, А.М. Мочалова, Ю.С. Козлова, Ю.И. Кутепова, Н.А. Кутеповой, И.И. Ермакова и В.Н. Хашина [11, 40, 60, 66, 122].

Исследованием вопросов формирования отвалов на слабых водонасыщенных основаниях в рамках института ВНИМИ занимались Ю.И. Кутепов, Ю.А. Норватов, Н.А. Кутепова, Е.В. Костин. По результатам этих исследований выпущены отраслевые нормативно-методические документы, рассматривающие расчетные схемы по оценке устойчивости отвалов на слабом водонасыщенном основании, возникновение избыточного порового давления в глинистых грунтах, а также методы изучения и обоснования параметров физико-механических свойств слабых глинистых грунтов [120-121].

Заслуживают внимания работы по изучению деформационного поведения слабого основания при действии на него отвального сооружения А.М. Демина и О.И. Шушпиной [36]. В процессе выполнения моделирования на эквивалентных материалах (смесь кварцевого песка и солидола) они установили частичное выдавливание слабого слоя и уплотнение оставшихся под отвалом пород.

На территории Российской Федерации в последнее время интерес представляют отвалы химической промышленности, сложенные фосфогипсом. Такие отложения получили название техногенных, они характеризуются специфическим составом, строением, состоянием и свойствами. Изучение массивов представляет значительный научный и практический интерес в свете необходимости установления закономерностей их формирования и обеспечения промышленной и экологической безопасности отвальных работ [91].

Исследования отвалов фосфогипса проводились в Санкт-Петербургском горном университете Научным центром геомеханики и проблем горного производства совместно с Центром инженерных изысканий. Исследования были направлены на изучение физико-механических свойств фосфогипса для обоснования устойчивости «сухих» и гидравлических отвалов на территории следующих предприятий России: БФ АО «Апатит» (г. Балаково Саратовской области), ОАО «Воскресенские минеральные удобрения» (г. Воскресенск

Московской области), ОАО «Метаксим» (г. Волхов Ленинградской области) [8, 10, 48-49, 61].

Отвалы фосфогипса г. Воскресенска также подробно изучались специалистами Горного Университета г. Москвы под руководством А.М. Гальперина [9].

Научным сотрудником Научного центра геомеханики и проблем горного производства М.А. Ивочкиной применительно к отвалу фосфогипса ОАО «Воскресенские минеральные удобрения» написана диссертация [48]. Отвал данного предприятия является самым крупным горнотехническим сооружением химической промышленности, его высота достигает 100 м. В работе приводятся специальные исследования компонентного состава и свойств отходов фосфогипса, по результатам которой разработана гидрогеомеханическая модель объекта, позволившая обосновать устойчивость отвала при наращивании его высоты до отметки 120 м. За время эксплуатации отвала ОАО «Воскресенские минеральные удобрения» каких-либо существенных деформаций на его откосах, представляющих опасность для работы горнотранспортного оборудования, не наблюдалось.

В настоящее время исследования отвалов фосфогипса в аспектах обоснования их оптимальных параметров, разработки мониторинга безопасности (включающего длительные инструментальные геодезические наблюдения за деформациями откосов с привлечением современных технологий, гидрогеологические исследования) проводятся в лаборатории гидрогеологии и экологии Научного центра геомеханики и проблем горного производства под руководством Ю.И. Кутепова.

Таким образом, в проанализированных работах изучены: технология и механизация отвальных работ; деформирование отвалов в различных инженерно-геологических условиях; причины нарушений устойчивости; научно обоснованы и разработаны инженерные методы расчета устойчивости откосов отвалов с учетом геологического строения откосных массивов, гидрогеологических и горно-геологических факторов.

#### **1.4 Выводы по главе 1 и постановка задач исследований**

Отвал химкомбината БФ АО «Апатит» является одним из многочисленных объектов складирования фосфогипса – побочного продукта производства фосфорной кислоты и фосфорсодержащих минеральных удобрений. В мире насчитывается свыше 52 государств, на территориях которых расположены подобные отвалы. В Российской Федерации предприятия по производству фосфорной кислоты и минеральных удобрений расположены в Московской, Ленинградской, Вологодской, Саратовской областях, в Краснодарском крае.

В настоящее время общей тенденцией в горнодобывающей и перерабатывающей областях промышленности является увеличение высоты эксплуатируемых отвальных сооружений, что позволяет избежать заимствования новых площадей и оправдано с экологической точки зрения. Но с другой стороны – повышаются риски нарушения устойчивости отвалов, что снижает уровень промышленной безопасности отвальных работ, создает угрозу для людей и механизмов, повышает материальные затраты на ликвидацию последствий аварийных ситуаций.

Отвальные сооружения горнодобывающей и перерабатывающей промышленности на протяжении нескольких десятилетий изучались с целью совершенствования технологии их формирования, обеспечения устойчивости, увеличения отвалоёмкости, что подтверждается научными публикациями и диссертационными исследованиями специалистов научно-исследовательских, проектных и экспертных организаций. Благодаря многолетней деятельности этих специалистов разработано инженерно-геологическое, геомеханическое, маркшейдерское обеспечение безопасности отвальных сооружений, которое успешно реализовано на многих отечественных предприятиях.

Однако, опыт обеспечения устойчивости на других объектах складирования отходов производства не может быть использован непосредственно для обоснования устойчивости отвалов фосфогипса ввиду резко индивидуальных особенностей складированного материала [143]. В частности, отходы химического

производства не имеют аналогов среди отвальных образований других областей промышленности.

Изучению отвалов фосфогипса посвящены единичные работы, опубликованные в открытой печати. Наиболее полные исследования проведены на отвале ОАО «Воскресенские минеральные удобрения», в результате которых изучены и описаны физико-химические основы формирования техногенных отложений из фосфогипсов различного минералогического состава; получена инженерно-геологическая оценка условий устойчивости отвального сооружения при его современных параметрах и проектном повышении высоты. Результаты опубликованных исследований по отвалу ОАО «ВМУ» могут быть использованы для рассмотрения закономерностей формирования инженерно-геологического строения и свойств грунтов техногенного массива отвала фосфогипса БФ АО «Апатит» с учетом материалов изысканий, полученных непосредственно на данном объекте.

Современный научно-методический подход к обоснованию безопасных параметров отвалообразования строится на рассмотрении отвального сооружения как природно-технической системы (ПТС), основные элементы которой «техногенный массив + грунтовое основание» находятся в тесной взаимосвязи. Опубликованные сведения о технологических, инженерно-геологических и гидрогеологических условиях устойчивости отвалов фосфогипса не позволяют оценить поведение ПТС в условиях БФ АО «Апатит», установить причины развития деформационных процессов, осложняющих ведение отвальных работ, разработать комплекс мер по стабилизации ситуации.

В этой связи целью диссертационной работы является обоснование устойчивости отвалов фосфогипса на основе выявленных закономерностей развития деформационных процессов.

Для достижения поставленной цели требуется решение следующих задач:

1. Изучение и оценка инженерно-геологических и гидрогеологических условий отвалообразования на БФ АО «Апатит» с целью выявления факторов, обуславливающих развитие деформационных процессов.

2. Выполнение лабораторных экспериментов по изучению влияния кислых технических вод на изменение прочности глинистых грунтов в основании отвала.

3. Обоснование механизма образования оползневых деформаций при формировании отвалов фосфогипса на территории распространения глинистых грунтов.

4. Разработка системы управления устойчивостью при формировании отвалов фосфогипса на базе комплексного геодинамического мониторинга.

## **ГЛАВА 2 АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ УСТОЙЧИВОСТЬ ОТВАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ПРЕДПРИЯТИИ БАЛАКОВСКИЙ ФИЛИАЛ АО «АПАТИТ»**

### **2.1 Характеристика технологических параметров складирования отходов производства на предприятии Балаковский Филиал АО «Апатит»**

ООО «Балаковские минеральные удобрения» (ООО «БМУ»), а ныне Балаковский Филиал АО «Апатит» – один из ведущих агрохимических предприятий России, которое в настоящее время входит в состав крупнейшей компании ПАО «ФосАгро». Предприятие выпускает широкий ассортимент продукции: серную кислоту различных марок, олеум, осветленную фосфорную кислоту, кормовой монокальцийфосфат, диаммонийфосфат, сульфоаммофос, кремнефтористый натрий и поставляет ее не только в регионы России, а также за рубеж. Объем производства составляет порядка 40% от объема всей продукции химических предприятий Саратовской области. Предприятие занимает лидирующую позицию в химическом кластере промышленности региона.

История предприятия ведет свой отсчет с 1968 года, когда было принято решение о строительстве завода фосфорных удобрений в Балаково, именуемого АО «Иргиз». Завод строился с расчетом на поставку удобрений сельхозпредприятиям Среднего и Нижнего Поволжья, Северного Кавказа, Урала. А 29 декабря 1973 года была получена первая продукция предприятия – серная кислота. Это дата и считается днем образования завода.

В 1975 году был принят в эксплуатацию комплекс по производству фосфорной кислоты. В том же году освоен выпуск двойного суперфосфата. С 1985 года одновременно с двойным суперфосфатом начался выпуск аммофоса, на который впоследствии и было полностью переориентировано производство.

В советское время завод претерпел реорганизацию, это был трудный период в связи с резким падением объемов производства, обусловленным снижением реализации готовой продукции. В 1998 году химическое предприятие и вовсе обанкротилось. Спустя год ООО «БМУ» выкупило у предприятия – банкрота весь комплекс основных и вспомогательных производств, предназначенных для

выпуска минеральных удобрений, и возобновило работу завода. А уже в 2001 году «Балаковские минеральные удобрения» вошли в состав компании «ФосАгро». Нынешнее наименование БФ АО «Апатит» завод носит с 1 мая 2014 года.

Сегодня БФ АО «Апатит» входит в число крупнейших российских производителей аммофоса. В структуре предприятия производство серной кислоты мощностью 1,9 млн. тонн в год, производство экстракционной фосфорной кислоты с объемом переработки апатитового концентрата до 2 млн. тонн в год, производство фосфорных удобрений и кормовых фосфатов мощностью до 1,5 млн. тонн ежегодно.

В административном отношении БФ АО «Апатит» расположен в Балаковском районе Саратовской области Российской Федерации в 8 км к юго-востоку от г. Балаково в районе впадения р. Большой Иргиз в р. Волгу и связан с ним автомобильной и железной дорогами (рисунок 2.1). Данная территория является промышленной зоной города.

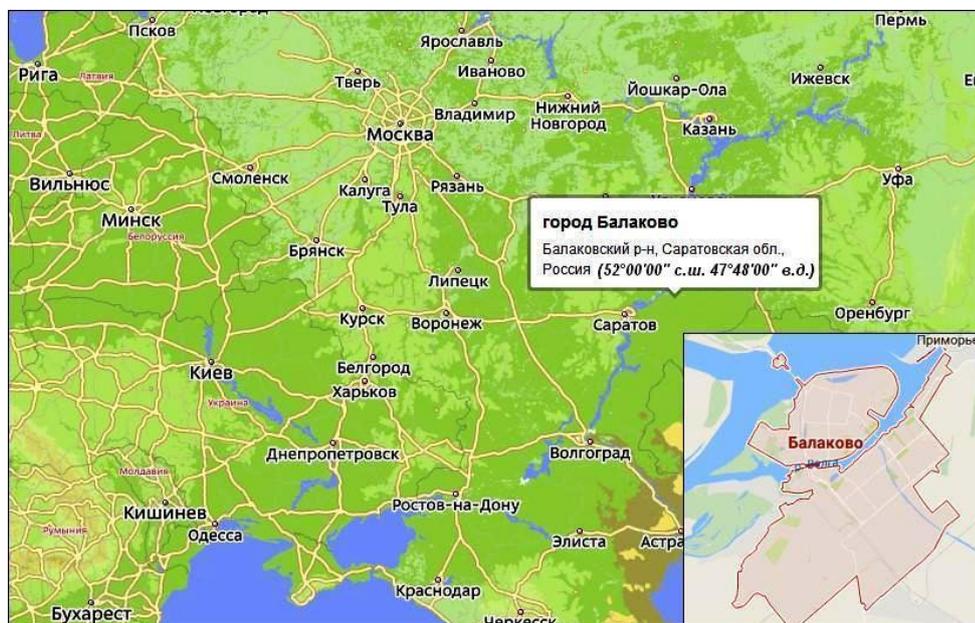


Рисунок 2.1 – Схема географического расположения объекта исследований

Промзона предприятия занимает площадь 5 625 090 кв. м. Она включает в себя 4 основных объекта (производственных) и 12 вспомогательных комплексов. К основным производствам относятся:

- 1) производство экстракционной фосфорной кислоты, объекты которого располагаются в центральной части промплощадки;
- 2) сернокислотное производство – преимущественно в восточной части промплощадки;
- 3) цех минеральных солей – в юго-восточной части промплощадки;
- 4) цех фосфорных удобрений – в восточной части промплощадки, восточнее цеха минеральных солей.

К вспомогательным объектам относятся следующие: электроцех, цех нейтрализации и очистки сточных вод и водоснабжения, парогазотурбинный цех, цех контрольно-измерительных приборов и автоматики, цех централизованного ремонта, управление производственно-технической комплектации, цех железнодорожного транспорта, автотранспортный цех, цех аналитики и контроля качества, хозяйственный цех, пожарногазоспасательный отряд, комбинат рабочего питания. Данные объекты вспомогательного комплекса рассредоточены по всей промплощадке.

Помимо вышесказанного на территории предприятия расположен земельный отвод под отвальное хозяйство, находящийся в юго-восточной части промплощадки (рисунок 2.2).

Отвальное хозяйство предприятия включает многоярусный техногенный массив, развитую сеть технологических дорог, электросетей, насосные станции, вспомогательные здания, также функционирует ряд искусственных водоемов: пруды-шламонакопители, пруды-испарители, аккумулирующие емкости вокруг отвала в виде противофильтрационных, дренажных сооружений (рисунок 2.3).

Исследуемый отвал фосфогипса, образующийся в результате переработки Кольского апатитового концентрата, введен в эксплуатацию в 1975 году. Его ежегодный выход составляет ~ 1,8 млн. т. Причем при существующей на сегодняшний день технологии производства удобрений на каждую тонну выпускаемой полезной продукции приходится 3,81 т фосфогипса. В настоящее время объем отвала фосфогипса по данным выполненных расчетов составляет

30129167 м<sup>3</sup> ± 3% [7]. Данный отход относится к IV классу опасности, т.е. малоопасный для окружающей среды [90, 152].



Рисунок 2.2 – Схема расположения отвалов фосфогипса БФ АО "Апатит" относительно инфраструктуры г. Балаково

На предприятии БФ АО «Апатит» для складирования отходов производства используются три участка: I – основной, участки II и III – новые расширения существующего отвала (рисунок 2.3).

Исследуемый существующий отвал, обозначенный как основной, имеет площадь 90 га. Высота отвала приблизилась к абсолютной отметке 87 м. Мощность отсыпанного фосфогипса местами ~ 60 м (рисунок 2.4).

Расширение 1 примыкает к юго-восточной части основного отвала и имеет площадь 16,6 га (рисунок 2.5). Расширение 2 примыкает к западной части основного отвала и имеет площадь 3,5 га.

БФ АО «Апатит» применяет «сухой» способ транспортировки отхода. Предприятие в отвалы в различные годы своего существования размещали два вида гипсовых отходов: дигидрат сульфата кальция и фосфополугидрат сульфата

кальция в связи с реконструкцией отделений ЭФК и переходом на тот или иной режим. Поскольку раздельное хранение данных отходов не предусматривалось, то их размещение в отвале осуществлялось в произвольном порядке.



Рисунок 2.3 – Ситуационный план отвального хозяйства БФ АО "Апатит"

Инженерным центром энергетики Поволжья выполнено обследование и изучение отвалов предприятия. В результате данной работы [119] осуществлено районирование отвального массива с выделением следующих зон:

I – старый отвал фосфогипса, в который в период с 1975 по 2001 годы производилась отсыпка дигидрата;

II – нижняя часть существующего расширенного отвала (сформирована по периметру старого отвала), отсыпанная в 2002-2004 гг. из дигидрата;

III – верхняя часть существующего расширенного отвала, отсыпанная из смеси дигидрата и полугидрата с 2005 г. по настоящее время.

Старый отвал фосфогипса сформирован из дигидрата по классической схеме веерного размещения от периферии к центру поярусно путем разгрузки самосвалов частично под откос, частично на верхнюю площадку и далее сталкиванием породы бульдозером. Специальная укатка пород при складировании откосов не применялась, уплотнение отсыпанных масс происходило в процессе их хранения под действием веса вышележащей породной толщи. Углы откосов по данным замеров с использованием горного компаса и рулетки показали значения от 32 до 40° при высотах от 15 до 25 м.

Нижняя часть существующего расширенного отвала, сложенная из дигидрата сульфата кальция, мощностью 15-20 м, а иногда 30 м, сформирована от периферии к центру (старому отвалу) ярусами в 2-3 м путем отсыпки по периметру дамб и последующего заполнения сформированной емкости одним слоем с попутным уплотнением колесами автотранспорта при доставке пород на отвал. Откосы дигидрата, сформированные в этот период времени, по вертикали занимали положение между отметками 25-26 м и 40 м, т.е. характеризовались высотой 14-15 м. Иногда формировались откосы значительно более высокие до отметок 50-55 м. Замеры углов наклона откосов показали величины от 25 до 40°.

Верхняя часть существующего расширенного отвала характеризуется мощностью 20-30 м. Здесь складировались две разновидности отходов (дигидрат и полугидрат) при соотношении примерно 2:1 без определенного селективного регламента. Отсыпка производилась по технологии, применяемой на нижней части расширенного отвала, т. е. слоями мощностью 3,5-4 м с укаткой колесами проходящего автотранспорта. Замеры углов наклона откосов показали величины от 25 до 40°.



Рисунок 2.4 – Существующий отвал фосфогипса



Рисунок 2.5 – Расширение 1 существующего отвала фосфогипса (юго-восток)

Фосфогипс БФ АО «Апатит» имеет следующий химический состав (таблица 2.1):

Таблица 2.1 – Химический состав фосфогипса

CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> общая	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> вод.	F <sub>общий</sub>	H <sub>2</sub> O общ.	H <sub>2</sub> O крист.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
36,5-37,5	менее 1,1	менее 0,5	0,4-0,5	менее 32,0	не более 6,2	0,1-0,2

## 2.2 Оценка инженерно-геологических особенностей техногенного массива отвального сооружения

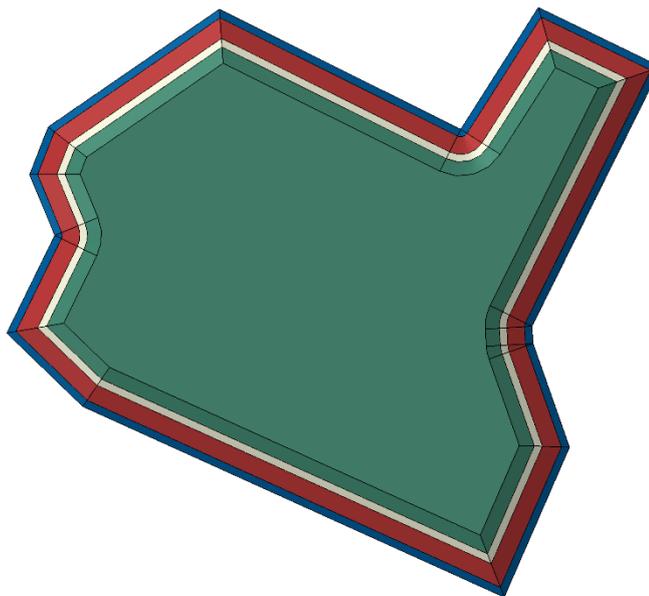
Инженерно-геологические исследования на отвале выполнялись с использованием комплекса полевых и лабораторных методов [8, 49, 107].

Полевые исследования, включавшие бурение скважин, вращательный срез, опытные наливов в скважины, были ориентированы на установление характера неоднородности техногенного массива и его естественного основания. Лабораторные испытания проводились с целью получения количественных характеристик физико-механических свойств пород, необходимых для расчетов устойчивости отвала.

По результатам исследований установлено, что техногенный массив отвала характеризуется неоднородным строением. При общей тенденции нарастания показателей механических свойств с глубиной, прослеживается зональность по физическим показателям, структурированности и консистенции фосфогипсов. По этим признакам выделено 4 инженерно-геологических элемента, которые хорошо прослеживаются по разрезу наиболее глубокой скважины глубиной 60 м, пройденной в центре отвала за пределами призмы возможного оползания откосов и вскрывающей техногенный массив отвала на полную мощность до кровли четвертичных пород. Первый от поверхности слой мощностью около 10 м представлен «псевдосплошным» фосфогипсом (ИГЭ 1а). Он структурированный, пористый, влажный, напоминающий «корку», хрупко разламывающуюся на блоки при механическом воздействии. Далее до глубины 22 м (до уровня воды) прослеживается дезинтегрированный фосфогипс, относительно сухой, плотный, комковатый (ИГЭ 1б). Ниже уровня воды до глубины 42 м фосфогипс трещиноватый, в блоках – плотный, влажный, пластичный (ИГЭ 1в). У основания отвала выделяется слой «псевдопластичного» фосфогипса мощностью 18 м, отличающегося монолитностью и повышенной прочностью (ИГЭ 1г) [55].

Визуальное представление о характере распределения выделенных слоев техногенных грунтов в плане и разрезе массива дает схема, представленная на рисунке 2.6.

а) Инженерно-геологическое строение отвала в плане



б) Инженерно-геологическое строение отвала в разрезе



в) Условные обозначения

- ИГЭ 1а – псевдопластичный фосфогипс («корка»)
- ИГЭ 1б – дезинтегрированный осушенный фосфогипс
- ИГЭ 1в – трещиноватый водонасыщенный фосфогипс
- ИГЭ 1г – «псевдопластичный» водонасыщенный фосфогипс

Рисунок 2.6 – Схема инженерно-геологического строения отвала

Для объяснения выявленной неоднородности техногенного массива выполнена серия лабораторных экспериментов, моделирующих процесс формирования состояния и свойств техногенных грунтов из гипсовых отходов и их гравитационного уплотнения в массиве. Учитывалось, что в отвал размещались два вида фосфогипсов – дигидрат и полугидрат сульфата кальция, отличающиеся между собой химико-минералогическим составом.

Основным фактором, определяющим состав фосфогипса, является технологический способ получения фосфорной кислоты, в зависимости от которого образуются два основных вида отходов – полугидрат ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ) и дигидрат ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) сульфата кальция. По гранулометрическому составу обе разновидности на выходе с завода представлены частицами размером  $0,05 < d \leq 0,01$

мм, что характеризует их как супеси пылеватые. Плотность скелета отходов варьирует от 0,83 до 1,27 т/м<sup>3</sup>, коэффициент пористости 1,3-1,9. Плотность минеральной части дигидрата составляет примерно 2,37 т/м<sup>3</sup>, полугидрата 2,52 т/м<sup>3</sup>.

Прочностные свойства фосфогипсов в виде дигидратов и полугидратов на выходе с технологической линии близки между собой:  $\varphi=4\div 15^\circ$ ,  $c=0,005\div 0,05$  МПа, составляя в среднем  $\varphi=10\div 15^\circ$ ,  $c=0,01\div 0,02$  МПа. Характерные графики сдвиговых испытаний образцов свежего фосфогипса, отобранного непосредственно при выходе с технологической линии представлены в таблице 2.2.

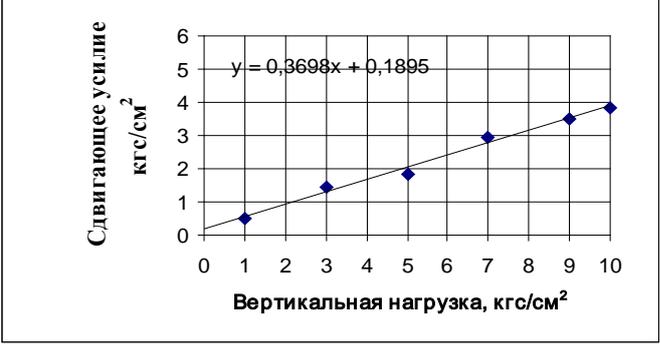
В дальнейшем параметры прочности дигидрата изменяются незначительно при сохранении начальной влажности, достигая  $\varphi=17\div 20^\circ$ ,  $c=0,014\div 0,027$  МПа за 30 сут. Полугидрат активно поглощает влагу и превращается в дигидрат, происходящие при этом химико-минеральные преобразования сопровождаются формированием цементационных структурных связей и нарастанием прочности. По истечении 30 суток прочность полугидрата превышает показатели дигидрата, главным образом, за счет повышения сцепления до величины более 0,1 МПа при угле внутреннего трения  $\varphi=17\div 25^\circ$ . Характерные графики сдвиговых испытаний образцов фосфогипса через 30 суток выдерживания в лаборатории, представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.2 – Результаты сдвиговых испытаний дигидрата и полугидрата при выходе с технологической линии

<p>1. Свежий дигидрат  <math>\varphi=15^\circ</math>  <math>c=0,088 \text{ кг/см}^2</math> (0,009 МПа)</p>	 <p>Сдвигающее усилие кгс/см<sup>2</sup></p> <p>Вертикальная нагрузка, кгс/см<sup>2</sup></p> <p><math>y = 0,2707x + 0,0877</math></p>
<p>2. Свежий дигидрат  <math>\varphi=14^\circ</math>  <math>c=0,18 \text{ кг/см}^2</math> (0,018 МПа)</p>	 <p>Сдвигающее усилие кгс/см<sup>2</sup></p> <p>Вертикальная нагрузка, кгс/см<sup>2</sup></p> <p><math>y = 0,2444x + 0,1841</math></p>
<p>3. Свежий полугидрат  <math>\varphi=8^\circ</math>  <math>c=0,51 \text{ кг/см}^2</math> (0,051 МПа)</p>	 <p>Сдвигающее усилие кгс/см<sup>2</sup></p> <p>Вертикальная нагрузка, кгс/см<sup>2</sup></p> <p><math>y = 0,1347x + 0,5077</math></p>
<p>4. Свежий полугидрат  <math>\varphi=11^\circ</math>  <math>c=0,19 \text{ кг/см}^2</math> (0,019 МПа)</p>	 <p>Сдвигающее усилие кгс/см<sup>2</sup></p> <p>Вертикальная нагрузка, кгс/см<sup>2</sup></p> <p><math>y = 0,19x + 0,1885</math></p>

Таблица 2.3 – Результаты сдвиговых испытаний дигидрата и полугидрата по истечении

30 сут

<p>1. Дигидрат через 30 сут  <math>\varphi=20^\circ</math>  <math>c=0,14 \text{ кг/см}^2</math> (0,014 МПа)</p>	 <p>Сдвигающее усилие, кгс/см<sup>2</sup></p> <p>Вертикальная нагрузка, кгс/см<sup>2</sup></p> <p><math>y = 0,3724x + 0,1441</math></p>
<p>2. Дигидрат через 30 сут  <math>\varphi=20^\circ</math>  <math>c=0,19 \text{ кг/см}^2</math> (0,019 МПа)</p>	 <p>Сдвигающее усилие, кгс/см<sup>2</sup></p> <p>Вертикальная нагрузка, кгс/см<sup>2</sup></p> <p><math>y = 0,3698x + 0,1895</math></p>
<p>3. Полугидрат через 30 сут  <math>\varphi=18^\circ</math>  <math>c=1,02 \text{ кг/см}^2</math> (0,10 МПа)</p>	 <p>Сдвигающее усилие, кгс/см<sup>2</sup></p> <p>Вертикальная нагрузка, кгс/см<sup>2</sup></p> <p><math>y = 0,3266x + 1,0216</math></p>
<p>4. Полугидрат через 30 сут  <math>\varphi=18^\circ</math>  <math>c=1,01 \text{ кг/см}^2</math> (0,10 МПа)</p>	 <p>Сдвигающее усилие, кгс/см<sup>2</sup></p> <p>Вертикальная нагрузка, кгс/см<sup>2</sup></p> <p><math>y = 0,3337x + 1,0134</math></p>

Определение свойств техногенных грунтов, сформировавшихся непосредственно в теле отвала, проводилось по монолитам, отобранным из 2-х скважин, пройденных в различных точках с поверхности отвала. По первой

скважине можно отследить изменение свойств фосфогипса, сформированного из смеси дигидрата и полугидрата, слагающих верхнюю часть отвала до глубины 21,5 м. Вторая скважина глубиной 16,5 м пройдена через тело отвала, где складировался только дигидрат сульфата кальция.

Результаты выполненных сдвиговых опытов пород из скважины 1 показывают, что техногенные грунты, сформированные из смеси фосфогипса разного состава, характеризуются значительными углами внутреннего трения ( $30-43^{\circ}$ ) и сцеплением, увеличивающимся с глубиной от 0,026 до 0,09 МПа. На трех глубинах (8, 11 и 17 м) отмечено снижение угла внутреннего трения пород до  $9, 17$  и даже  $4^{\circ}$  при достаточно высоких показателях сцепления (соответственно 0,035; 0,07 и 0,074 МПа). Характер нарастания прочности грунтов рассматриваемой толщи иллюстрируется результатами испытания пород натурным методом (рисунок 2.7).

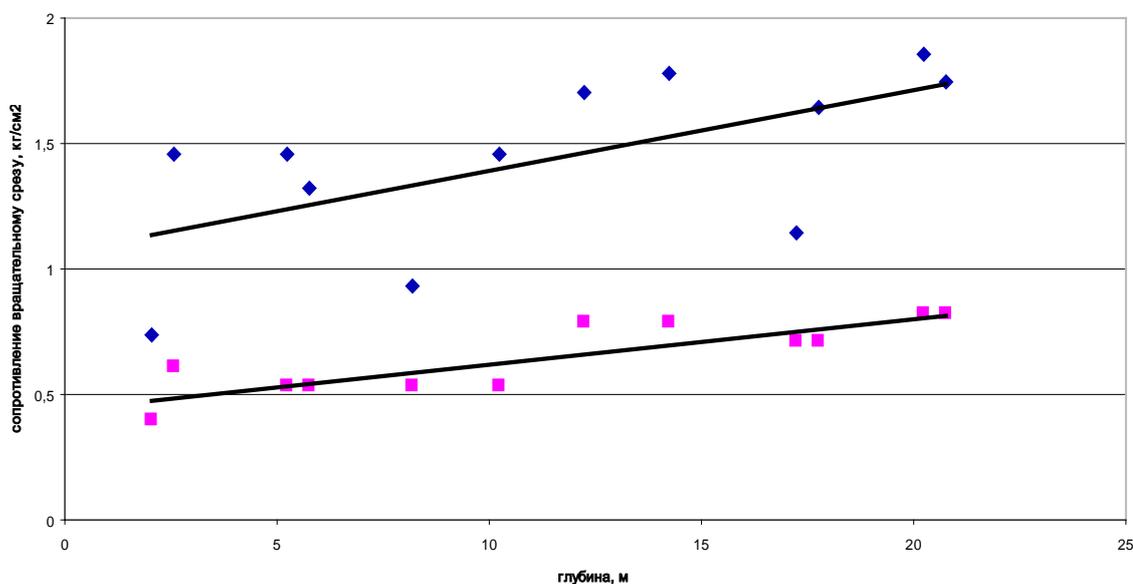


Рисунок 2.7 – Изменение максимального и минимального сопротивления вращательному срезу фосфогипса с глубиной техногенного массива

Средневзвешенное значение угла внутреннего трения пород в толще из смеси фосфогипса составляет  $37^{\circ}$  при сцеплении 0,026 МПа. Для части массива, сформированной только из дигидрата, средневзвешенные параметры прочности техногенных грунтов составляют: угол внутреннего трения  $33^{\circ}$  и сцепление –

0,034 МПа. Нарушение структуры фосфогипса (при перемешивании или испытаниях по схеме «плашка по плашке») приводит к уменьшению параметров сопротивления сдвигу фосфогипса до средних значений  $\varphi=25\div 27^\circ$ ,  $c=0,15\div 0,25$  МПа.

Анализ полученных результатов позволяет отметить, что первоначальная разница в свойствах фосфогипса различного состава, в теле отвала не прослеживается. Это объясняется тем, что на преобразование фосфогипса в техногенном массиве большой мощности определяющее влияние оказывают гравитационные нагрузки, приводящие к уплотнению грунтов и, как следствие, повышению их прочностных свойств.

С учетом полученных результатов исследования свойств фосфогипса по образцам-моделям и монолитам, отобранным из скважин, установленная неоднородность техногенного массива объясняется следующим образом. Процессы дегидратации, химико-минералогических трансформаций, цементации определяют формирование состояния и свойств фосфогипсов в верхнем слое техногенного массива, названного «коркой» (слой 1а). При исследовании отвала Воскресенского комбината, отсыпаемого из чистого полугидрата, мощность «корки» составляла 20 м [10]. Для Балаковского отвала, верхняя часть которого отсыпается из смеси дигидрата и полугидрата, мощность слоя 1а составляет 10-15 м. Объяснением различия в мощности слоя «рыхлых» пород для двух разновидностей отходов является наличие структурной прочности, величина которой составляет 0,010-0,015 МПа для дигидрата и 0,030 МПа для полугидрата сульфата кальция.

В дальнейшем, по мере отсыпки поверх «корки» новых слоев и достижения нагрузок, превышающих структурную прочность грунтов, происходит разрушение скелета, образование трещиноватости, усиливающейся по мере роста высоты отвала. Данными процессами объясняется механизм формирования слоя 1б. Разрушенные фосфогипсы постепенно уплотняются в блоках, трещины заполняются водой, образуется слой водонасыщенных трещиноватых грунтов (1в). Под действием давления трещины постепенно смыкаются, фосфогипс

уплотняется и приобретает свойства монолитного тела, сохраняющего форму, что определило его название «псевдопластичный» (слой 1г) – в отличие от других дезинтегрированных разновидностей.

Характеристика выделенных слоев представлена в таблице 2.4. Мощности грунтов выделенных ИГЭ указаны по результатам бурения скважины глубиной 60 м, пройденной в центре отвала.

Таблица 2.4 – Физико-механические свойства пород отвала БФ АО "Апатит" [8]

Фосфогипс (№ ИГЭ)	Мощность, м	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	W, %	$\varphi$ , град	c, МПа	E*, МПа
ИГЭ 1а	10	1,60	13,77	36	0,05	28
ИГЭ 1б	12	1,57	7,53	41	0,02	13
ИГЭ 1в	20	1,79	11,94	37	0,05	16
ИГЭ 1г	18	1,73	18,14	32	0,08	20

\*Значение модуля деформации получено по данным компрессионных испытаний при выдерживании каждой ступени нагрузки не менее 1 недели

В техногенном массиве отвала развит водоносный горизонт, приуроченный к ИГЭ 1в и ИГЭ 1г. Водоносный горизонт имеет мощность от единиц метров на краях откосов отвала до 40 м в центре. Обычно отвалы дисперсных пород характеризуются высокой проницаемостью, поэтому даже при повышенном инфильтрационном питании в них не формируются мощные водоносные горизонты, оказывающие существенное влияние на устойчивость откосов. В этом плане исследуемый отвал фосфогипса в г. Балаково представляет собой исключение. По данным натурных замеров по пьезометрическим скважинам тело отвала обводнено почти на 70% по мощности (в центре), уровень техногенного водоносного горизонта постоянно повышается по мере увеличения высоты отвала (в среднем на 0,5 м в год), а после прекращения отсыпки – практически не снижается (рисунок 2.8).

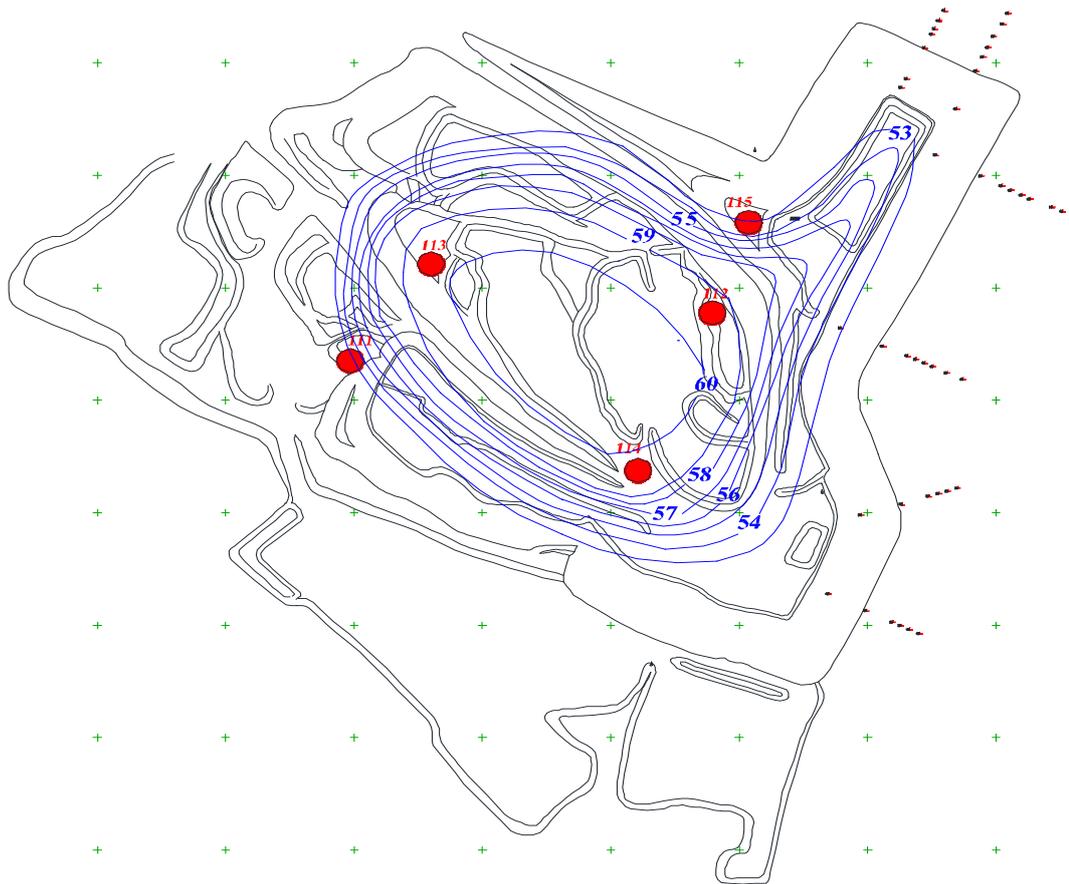
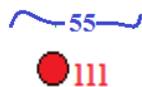


Рисунок 2.8 – Карта гидроизогипс в отвале фосфогипса на конец 2017 г.

Условные обозначения:



- гидроизогипсы техногенного водоносного горизонта
- пьезометрические скважины

Высокая обводненность тела отвала обусловлена спецификой складированного материала и затрудненными условиями дренирования техногенного массива. Фосфогипс поступает в отвал во влажном состоянии. Начальная влажность полугидрата составляет 25÷30%, а дигидрата – 35÷40% [85]. После отсыпки фосфогипс частично теряет свою влажность за счет перехода воды из свободной в кристаллизационную (при преобразовании полугидрата гипса в дигидрат), а частично – инфильтруется в тело отвала. С каждой тонной сухого дигидрата в отвал поступает 0,398 м<sup>3</sup> свободной (гравитационной) воды, с тонной сухого полугидрата – 0,241 м<sup>3</sup> [71-72, 96]. Посчитано, что при активном ведении отвалообразования ежедневно в отвал поступает более 1000 м<sup>3</sup> технической воды, которая остается в отвальном массиве и идет на пополнение техногенного водоносного горизонта.

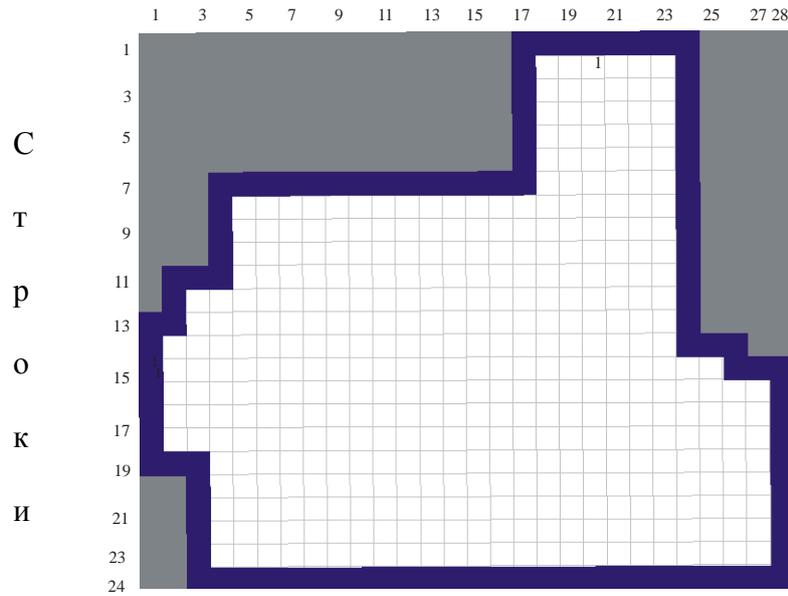
Затрудненные условия разгрузки водоносного горизонта обусловлены экранированием откосов отвала слабопроницаемой коркой фосфогипса и залеганием в основании насыпного массива слабопроницаемых хвалынских глин, являющихся региональным водоупором. Высокий уровень техногенного водоносного горизонта обусловлен также организацией противофильтрационных мероприятий. По периметру отвала фосфогипса в делювиальных суглинках возведена противофильтрационная завеса (ПФЗ) методом «стена в грунте» (рисунок 2.3).

Для оценки фильтрационных параметров массива отвала была разработана численная геофильтрационная модель [109] как нестационарная двумерная однослойная, представляющая только техногенный водоносный горизонт на непроницаемом основании. При этом было принято допущение, что фильтрация подземных вод через делювиальные суглинки и лиманно-морские шоколадные глины не оказывает практического влияния на режим подземных вод в отвале. В данной модели техногенный водоносный горизонт разделен на 672 элементарных блока, расположенных по 28-ми столбцам и 24-м строкам. Размеры блоков в плане  $50 \times 50 \text{ м}^2$ , высота блоков равна мощности отвала. Все границы модели проницаемые. Сетка модели (а) и ее ориентация относительно контура отвала (б) представлены на рисунке 2.9.

Реализация модели выполнена с помощью программного комплекса “MODFLOW”, разработанного геологической службой США (USGS) для моделирования упругой (неустановившейся) трехмерной фильтрации подземных вод (W.-H. Chiang, W. Kinzelbach. Processing Modflow. Version 5.3.0. USGS, USA, 2001).

а)

С Т О Л Б Ц Ы



б)

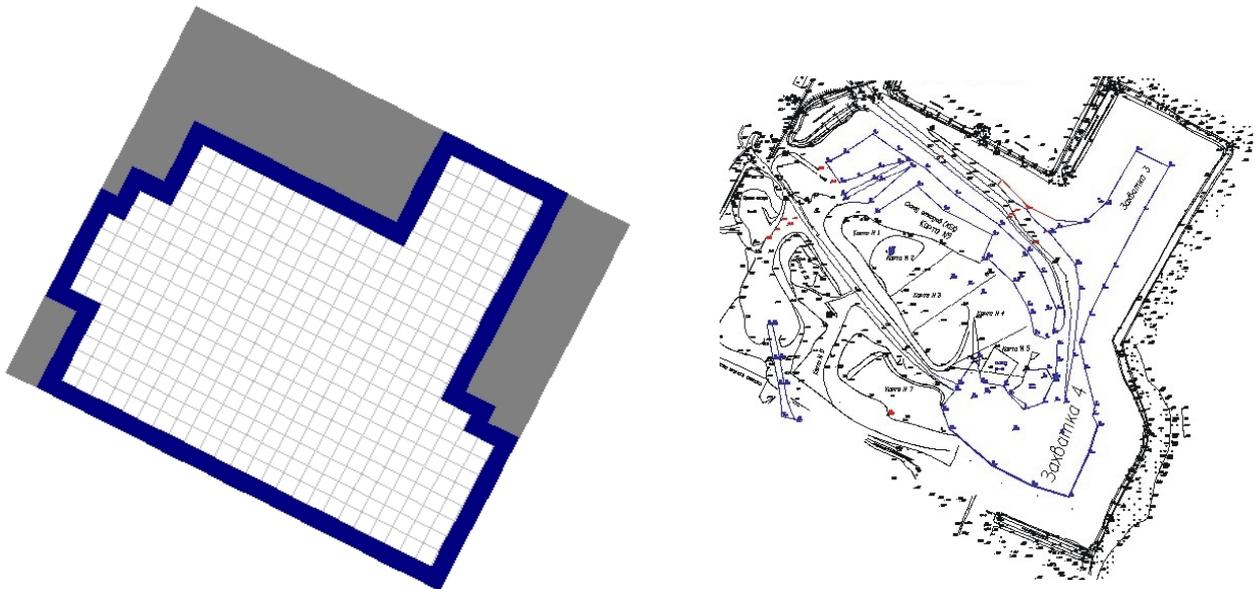


Рисунок 2.9 – Расположение блоков в численной геофильтрационной модели отвала фосфогипса: а) сетка модели с указанием номеров строк и столбцов;

б) ориентация модели относительно контура отвала

Принятые условные обозначения:



Активные блоки тела отвала



Неактивные блоки



Граничные блоки

Таким образом, по результатам численного анализа была оценена средняя водопроницаемость тела отвала, равная 0,25 м/сут, и гравитационная водоотдача (эффективная пористость) – 0,11. Учитывая, что отвал неоднороден по структуре и физико-механическим свойствам слагающих его грунтов, то и по водопроницаемости, и по водоотдаче также должна присутствовать неоднородность. Установить гидрогеологическую неоднородность отвала прямыми определениями весьма трудно. В различных конкретных точках отвала фильтрационные параметры могут существенно отличаться в любую сторону из-за множества местных факторов. Можно только предположить, основываясь на традиционной инженерно-геологической базе знаний, что поскольку техногенный массив находится в состоянии консолидации, пористость и фильтрационные параметры отвальной массы постепенно снижаются во времени и по глубине. Следовательно, в более глубоких слоях отвала, где плотность отвальной массы выше, фильтрационные параметры имеют значения ниже средних, а в слоях, близких к поверхности и у откосов – выше.

Так, на отвале ОАО «Воскресенские минеральные удобрения» по результатам опытных наливов в шурфы [10] на глубине 5 м коэффициент фильтрации фосфогипса изменяется от 0,14 до 0,9 м/сут и в среднем равен 0,46 м/сут. На глубине 15 м коэффициент фильтрации фосфогипса изменяется от 0,015 до 0,3 м/сут и в среднем равен 0,16 м/сут, а на глубине 23 м – от 0,01 до 0,1 м/сут или в среднем равен 0,05 м/сут.

Исходя из этой информации и сохраняя среднее значение водопроницаемости для всего отвала БФ АО «Апатит», равное 0,25 м/сут, в численной модели фильтрации было выделено 6 слоев с водопроницаемостью и гравитационной емкостью, линейно изменяющимися с глубиной, как показано в таблице 2.5 и на рисунке 2.10.

Таблица 2.5 – Изменение с глубиной коэффициента фильтрации и гравитационной емкости, заданное в численной геофильтрационной модели в неоднородном по проницаемости отвале фосфогипса

№ п/п	Глубина от поверхности отвала, м	$k_f$ , м/сут	Гравитационная емкость, б/р
1	22,5	0,42	0,150
2	27,5	0,35	0,150
3	32,5	0,28	0,125
4	37,5	0,21	0,100
5	42,5	0,14	0,075
6	47,5	0,07	0,050

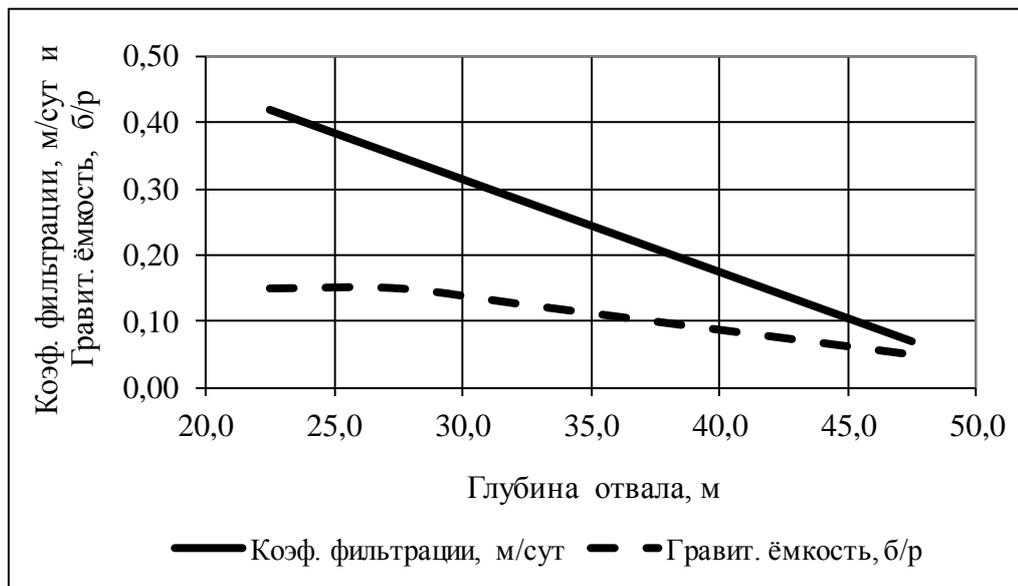


Рисунок 2.10 – Графики изменений с глубиной коэффициента фильтрации и гравитационной емкости в численной модели фильтрации воды в неоднородном отвале фосфогипса

Естественное основание отвала представлено песчано-глинистыми отложениями верхнечетвертичного возраста общей мощностью от 11 до 22 м. Непосредственно под подошвой отвала залегают делювиальные желтовато-коричневые суглинки (*dQIV*) мощностью до 3 м, под которыми распространен 3-5 метровый слой лиманно-морских шоколадных глин (хвалынских) (*lim-QIIIhv<sub>2</sub>*). Ниже распространены аллювиальные отложения – голубые суглинки (*a-QIIIhv<sub>1</sub>*) мощностью 4-6 м, подстилаемые песками. Инженерно-геологический разрез отвала представлен на рисунке 2.11.

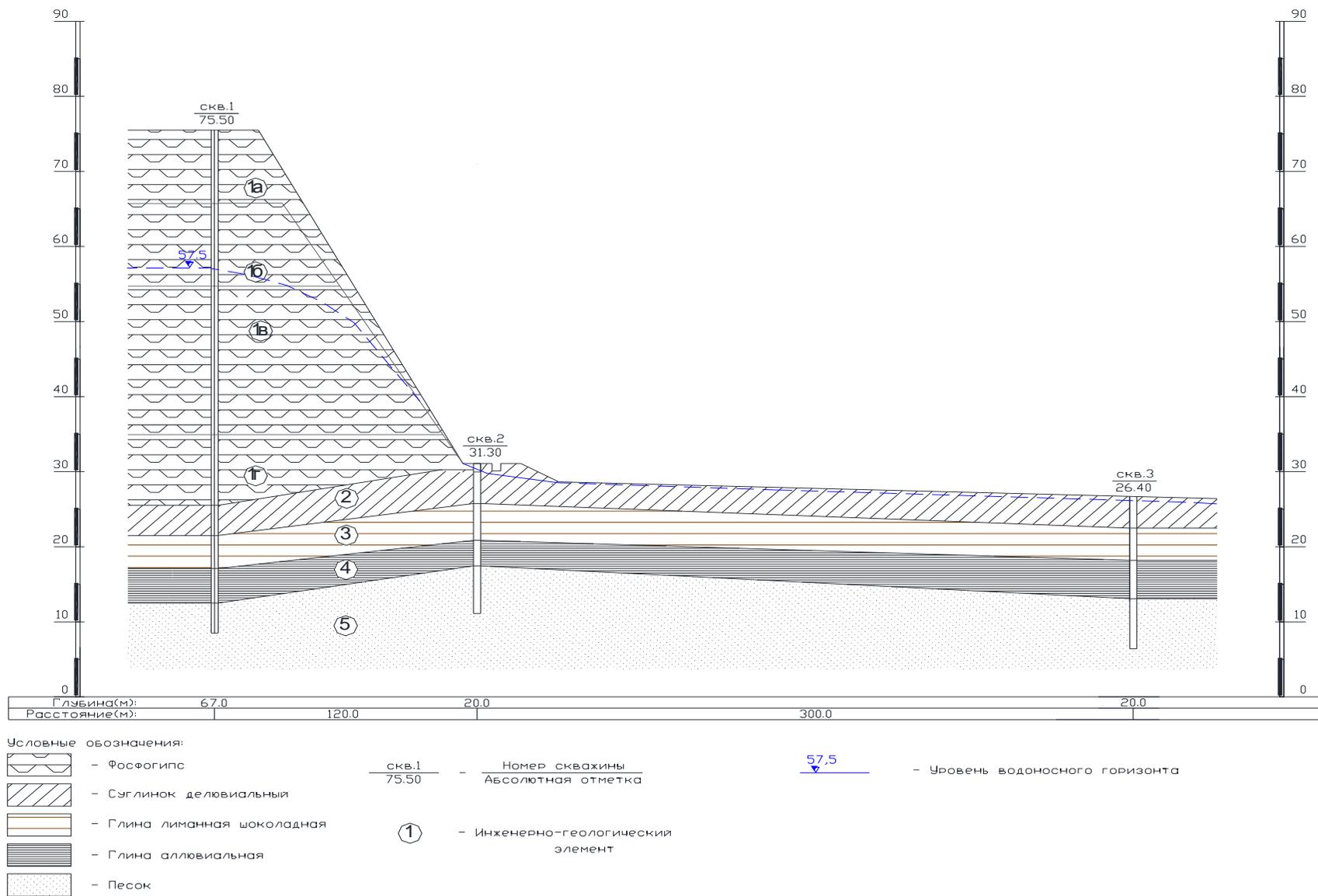


Рисунок 2.11 – Инженерно-геологический разрез отвала фосфогипса БФ АО «Апатит»

Основание характеризуется наличием двух водоносных горизонтов: грунтового (безнапорного) в делювиальных суглинках и аллювиального (напорного), приуроченного к пескам. Глубина уровня грунтовых вод за пределами отвала изменяется от 0,4 до 3,6 м при сезонных колебаниях до 0,8 м. В основании отвала горизонт должен быть гидравлически связан с техногенным горизонтом отвала и иметь значительные напоры. Оценок фильтрационных параметров грунтового водоносного горизонта нет. Питание грунтового горизонта в делювиальных суглинках под отвалом происходит за счет атмосферных осадков и ограниченной фильтрации техногенного водоносного горизонта.

Подземные воды аллювиального водоносного горизонта имеют напоры от 3 до 9 метров. Абсолютные отметки пьезометрических уровней в аллювиальных песках на участке исследований изменяются от 19,4 до 20,3 м. Коэффициент фильтрации песков изменяется от 2,2 до 7,6 м/сут для слабоглинистых мелкозернистых разностей и от 0,3 до 0,5 м/сут – для глинистых разностей с прослоями глин. Характеристики водоотдачи (гравитационной и упругой емкости) аллювиальных песков отсутствуют. Питание аллювиального водоносного горизонта осуществляется за счет перетекания из сопредельных водоносных горизонтов и за пределами исследуемой территории, в местах выхода песков на дневную поверхность.

Лиманно-морские шоколадные глины являются региональным водоупором ( $k_{\phi} < 10^{-5}$  м/сут), разделяющим приповерхностный горизонт грунтовых вод и напорный аллювиальный горизонт. Эти глины должны препятствовать также любой практически значимой гидравлической связи между техногенным водоносным горизонтом в отвале и водоносным горизонтом аллювиальных песков.

Изучение физико-механических свойств грунтов основания отвала выполнялось на различных участках как непосредственно под отвалом, так и на сопредельной территории, непригруженной отвалом [8, 107].

Прочность шоколадных и голубых глин изучалась в лабораторных условиях на одноплоскостных сдвиговых приборах, приборах трехосного сжатия и в

полевых условиях с помощью крыльчатки. При одноплоскостных и стабиллометрических опытах испытаниям подвергались образцы пород, отобранные из скважин, пройденных через тело отвала (скважины №1 и №2), а также на участках будущей прирезки отвала.

В первом случае мощности пород отвалов были различные, составляя 50 м (скважина №1) и 16,5 м (скважина №2), а природные уплотняющие нагрузки соответственно равнялись 7 и 2,3 кгс/см<sup>2</sup>. Испытания пород производились по схеме неконсолидированно-недренированного сдвига при нагрузках равных и меньших уплотняющих. Получены значения углов внутреннего трения ( $\varphi$ ) и сцепления ( $c$ ), зависящие от нормальных нагрузок уплотнения в месте залегания пород и от степени нарушенности при извлечении из естественного массива при бурении скважин (рисунок 2.12-2.17).

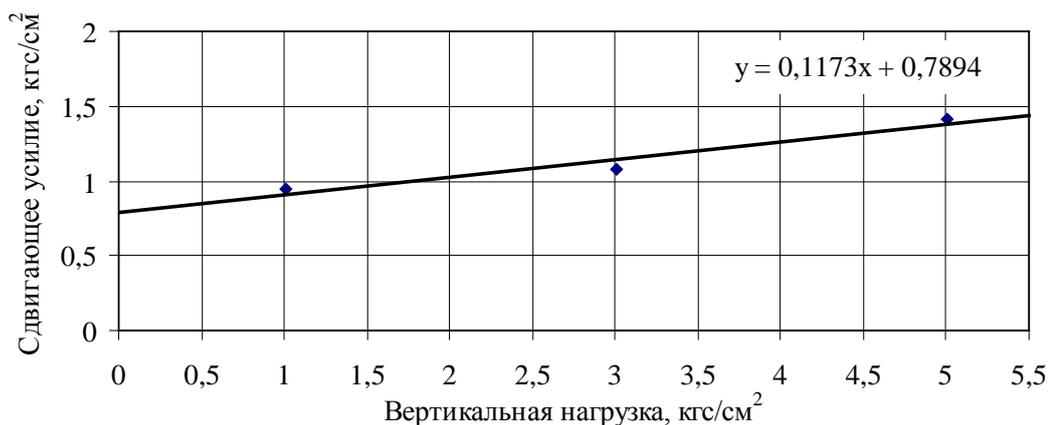


Рисунок 2.12 – График сдвиговых испытаний нарушенных образцов аллювиальной глины, находящейся под отвалом фосфогипса высотой 50 м:  $\varphi=7^\circ$ ,  $c=0,80$  кгс/см<sup>2</sup>

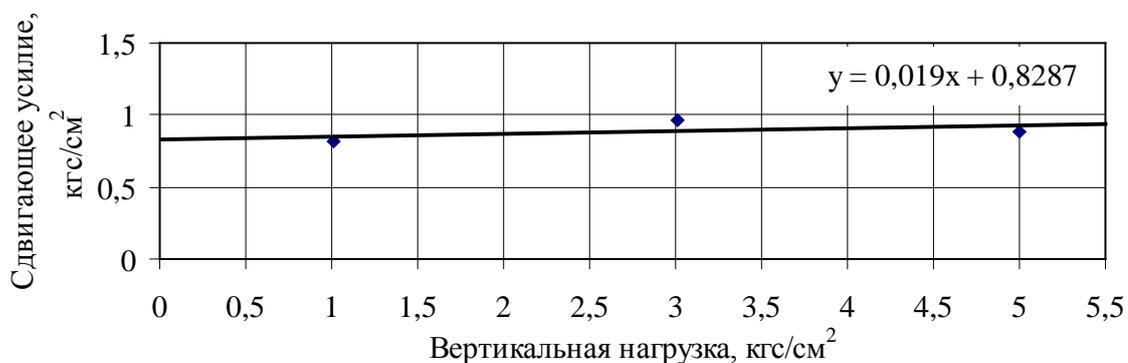


Рисунок 2.13 – График результатов сдвиговых испытаний нарушенных образцов шоколадной глины, находящейся под отвалом высотой 50 м:  $\varphi=1^\circ$ ,  $c=0,83$  кгс/см<sup>2</sup>

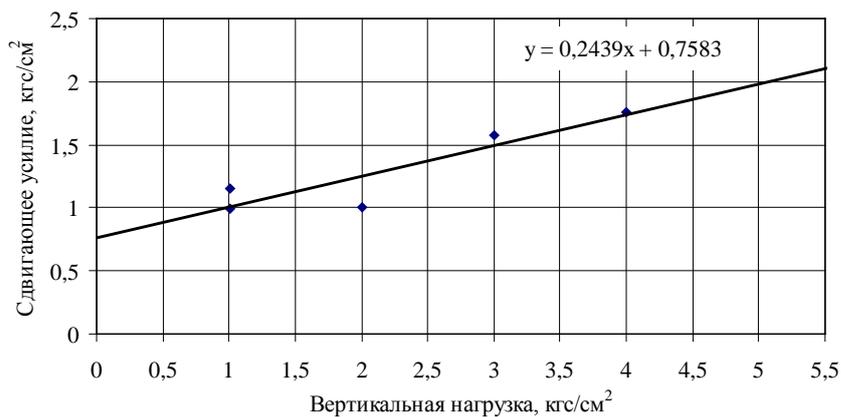


Рисунок 2.14 – График результатов сдвиговых испытаний шоколадной глины, находящейся под отвалом фосфогипса высотой 16,5 м:  $\varphi=14^\circ$ ,  $c=0,76$  кгс/см<sup>2</sup>

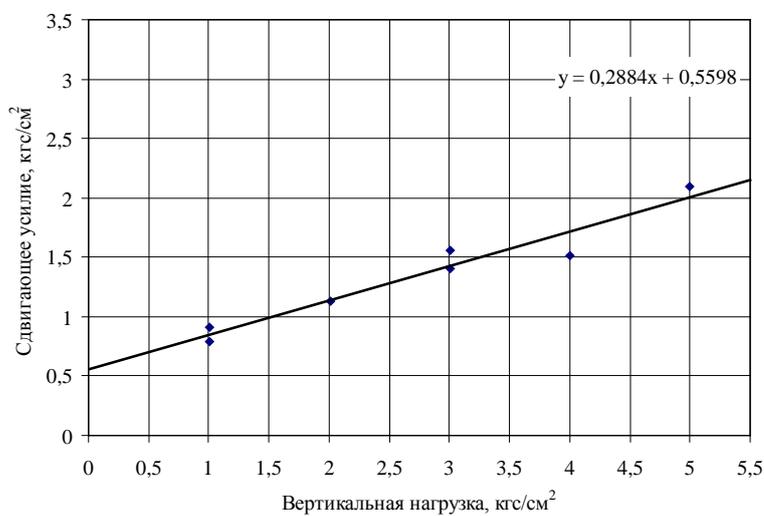


Рисунок 2.15 – График сдвиговых испытаний аллювиальной глины, находящейся под отвалом высотой 16,5 м:  $\varphi=16^\circ$ ,  $c=0,56$  кгс/см<sup>2</sup>

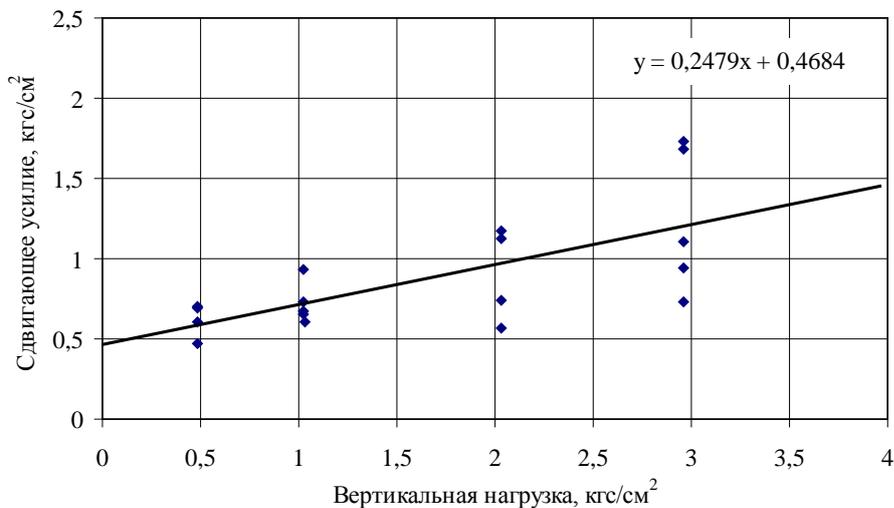


Рисунок 2.16 – Общий график результатов сдвиговых испытаний шоколадной глины, находящейся вне зоны влияния отвала:  $\varphi=14^\circ$ ,  $c=0,47$  кгс/см<sup>2</sup>

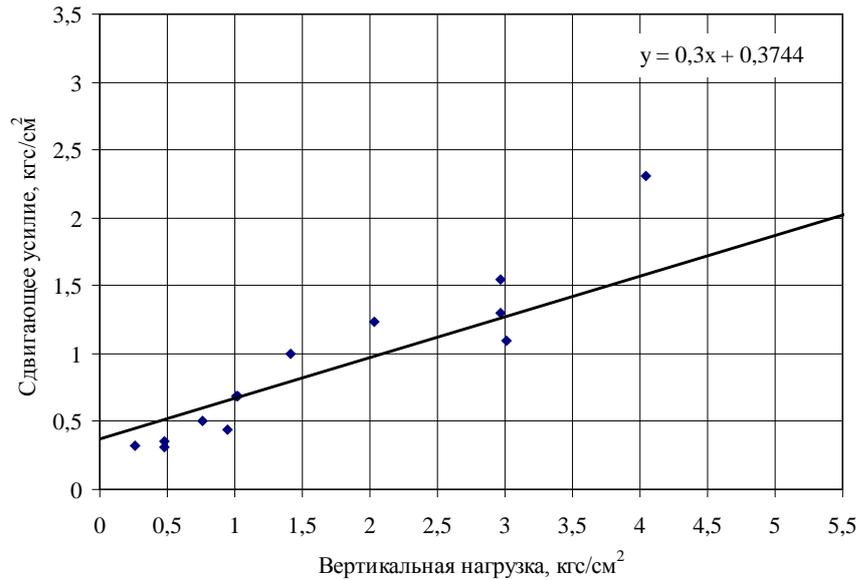


Рисунок 2.17 – График сдвиговых испытаний аллювиальной глины, находящейся вне зоны влияния отвала:  $\varphi=17^\circ$ ,  $c=0,37$  кгс/см<sup>2</sup>

Делювиальные глины вне зоны влияния отвала на участках будущего расширения характеризовались углами внутреннего трения от  $20^\circ$  до  $22^\circ$  и сцеплением  $0,066-0,070$ , в среднем  $\varphi=21^\circ$ ;  $c=0,068$  МПа. Под действием веса отвала они уплотнились, изменились и показания прочности  $\varphi=16-18^\circ$ ;  $c=0,075-0,080$  МПа, в среднем  $\varphi=17^\circ$ ;  $c=0,078$  МПа.

Шоколадная глина на участках будущего расширения отвала, т.е. в условиях отсутствия нагружения отвальными массами, характеризовалась углами внутреннего трения  $8-14^\circ$  и сцеплением  $0,04-0,05$  МПа, в среднем  $\varphi=10^\circ$ ;  $c=0,045$  МПа. По данным стабилметрических испытаний  $\varphi=11^\circ$ ;  $c=0,051$  МПа (рисунок 2.18).

## Mohr Circles

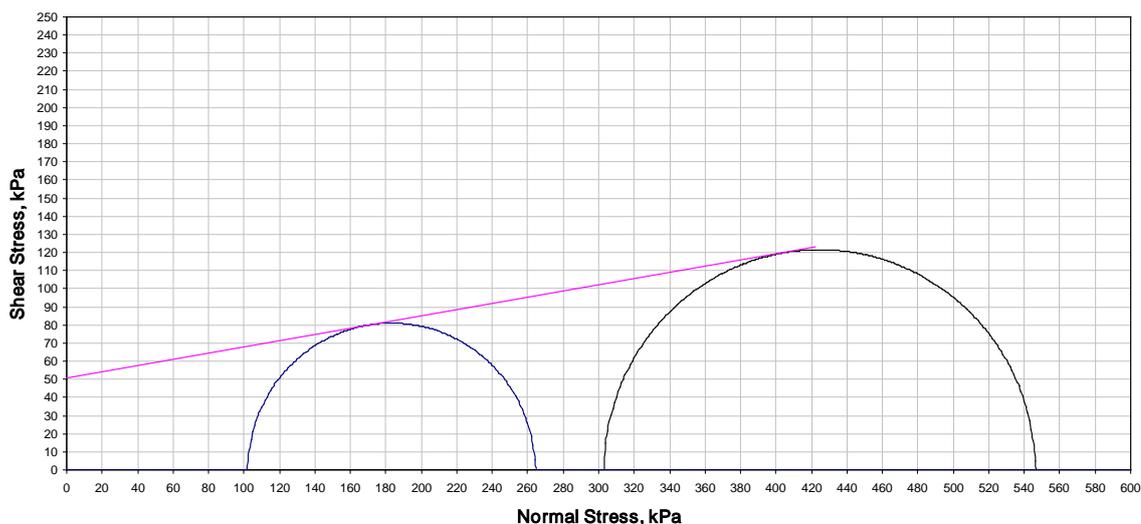


Рисунок 2.18 – График результатов стабилметрических испытаний шоколадоподобной глины находящейся вне зоны влияния отвала:  $\varphi=11^\circ$ ,  $c=0,051$  МПа

Под действием веса отвала она уплотнилась, что подтверждается изменением показателей прочности, которые по образцам горных пород из скважины №2 составили: для разных образцов  $\varphi=5\div 16^\circ$ ;  $c=0,06\div 0,12$  МПа, в среднем  $\varphi=14^\circ$ ;  $c=0,076$  МПа. При этом претерпели существенные изменения характеристики влажности глин с 25,3-33,4 до 24,8-28,6%, что говорит о развитии в данных породах процессов фильтрационной консолидации. Породы, отобранные из скважины №1, оказались нарушенного сложения, поэтому показатели прочности по ним были примерно одинаковы как для сцепления ( $c=0,083$  МПа) и значительно ниже по углу внутреннего трения ( $\varphi=1^\circ$ ). При этом влажность была несколько больше, чем в скважине №2 (29,1%). Анализируя результаты данных опытов, можно сделать вывод о том, что процессы фильтрационной консолидации наиболее интенсивно происходят на начальных этапах нагружения пород до нагрузки 0,3 МПа, когда удаляется большая часть свободной воды и породы из мягкопластичной консистенции переходят в тугопластичную и далее – в твердую.

Подобная картина наблюдается в голубых глинах и суглинках, которые на непригруженных участках характеризуются анизотропией свойств по разрезу,

связанной с изменением состава и влажности с глубиной. Так, в основании слоя голубых суглинков и глин залегают мелкозернистые пески второй надпойменной террасы. В песках развит напорный водоносный горизонт, связанный как с реками района – Волгой и ее притоком Северный Иргиз, так и техногенным водоносным горизонтом отвала фосфогипса. Это обстоятельство приводит к образованию в нижней части разреза на границе с песками слоя с повышенной влажностью и показателем консистенции, характеризующие породы как мягко- и текучепластичные. На границе с песками голубые глины переходят в суглинки, свойства которых повышаются за счет увеличения прослоев песка в них. Значения угла внутреннего трения и сцепление для этих суглинков составляют соответственно  $26^{\circ}$  и  $0,028$  МПа. Аллювиальные глины на участках под расширение отвала характеризуются углами внутреннего трения  $17^{\circ}$  и сцеплением  $0,037$  МПа. По данным стабилметрических испытаний показатели прочности составляют:  $\varphi=12^{\circ}$ ;  $c=0,028$  МПа (рисунок 2.19).

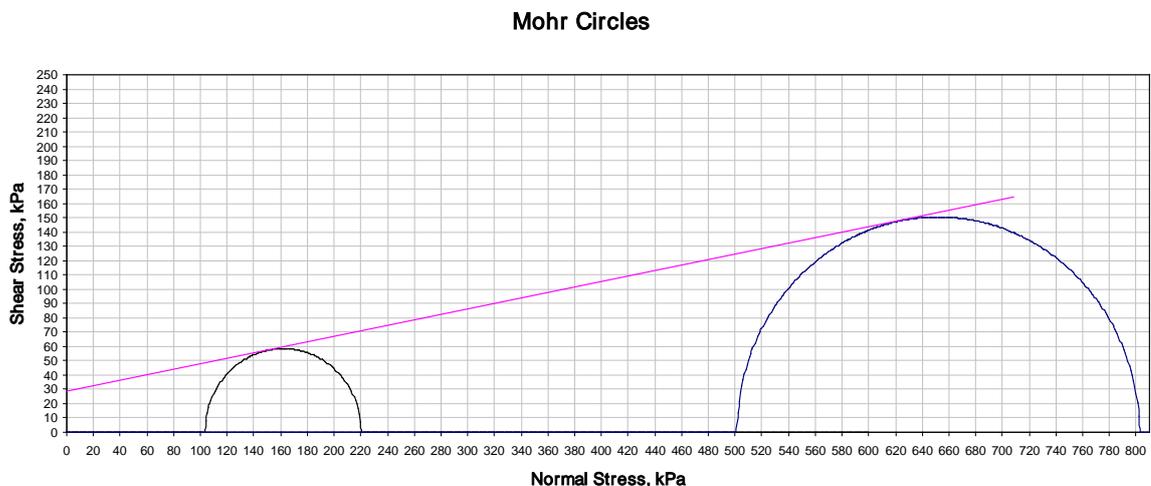


Рисунок 2.19 – График результатов стабилметрических испытаний аллювиальной глины находящейся вне зоны влияния отвала:  $\varphi=12^{\circ}$ ,  $c=0,028$  МПа

При нагружении синих глин отвальными массами наблюдается уменьшение влажности до 17,1-21,4% (скважина №2, нормальная нагрузка около 0,3 МПа) и 17,2 % (скважина №1, нормальная нагрузка 1,0 МПа), что существенно сказывается на показателе сцепления, возрастающем до 0,056 МПа (скв. №2) и 0,08 МПа (скв. №1) даже при испытании глин нарушенного сложения.

Испытания глин основания отвальных сооружений на пригруженном и непригруженном участках с применением крыльчатки позволили установить следующие закономерности:

– сопротивление вращательному срезу шоколадных глин на участках расширения (непригруженных) изменяется незначительно, варьируя от 0,104 до 0,12 МПа; под отвалом оно возрастает до 0,146 МПа; расчеты углов внутреннего трения по данным значениям и заданным параметрам сцепления позволили определить угол внутреннего трения шоколадных глин, нагруженной отвалами –  $9^{\circ}$  и на непригруженном участке –  $14^{\circ}$ ;

– голубые глины и суглинки при испытаниях крыльчаткой показывают более широкий диапазон изменения сопротивления сдвигу от 0,062 до 0,137 МПа; установлено различие в показателях как по площади, так и в разрезе (наименьшие показатели приурочены к нижней части разреза); определение углов внутреннего трения по данным крыльчатки показали значения  $14-15^{\circ}$  при сцеплении 0,025-0,035 МПа;

– сопротивление вращательному срезу голубых суглинков, нагруженных отвалами, возрастает относительно непригруженных, достигая значений 0,146 МПа почти таких же, как у шоколадных глин; увеличение прочности происходит, по всей видимости, за счет возрастания сцепления почти в два раза до 0,06-0,09 МПа.

Таким образом, по результатам исследований (таблица 2.6) установлено, что во внутренней части отвала все четвертичные грунты глинистого состава подверглись уплотнению под действием веса отвала. Это подтверждается снижением их влажности и повышением сцепления, а также возрастанием прочности по данным натурных испытаний крыльчаткой. Под откосами отвала на участке активного развития деформаций глинистые грунты характеризуются меньшими прочностными показателями, нежели во внутренней части площади отвала.

Таблица 2.6 – Прочностные характеристики естественного основания отвала [8, 107]

№ п/п	Наименование и описание ИГЭ	Одноплоскостные испытания		Вращательный срез	
		φ, град	с, МПа	φ, град	с, МПа
1	Суглинок делювиальный (под отвалом)	17	0,076	-	-
2	Суглинок делювиальный (вне зоны влияния отвала)	22	0,068	-	-
3	Глина лиманная шоколадная (под отвалом)	14	0,076	10	0,075
4	Глина лиманная шоколадная (вне зоны влияния отвала)	10	0,047	14	0,040
5	Глина аллювиальная (под отвалом)	16	0,058	15	0,060
6	Глина аллювиальная (вне зоны влияния отвала)	17	0,037	14	0,040
7	Пески	27	0,003	-	-

Расчеты устойчивости отвала, выполненные с использованием наименьших из этих характеристик, свидетельствуют об удовлетворительном состоянии откосов на оползневом участке, что не соответствует фактическому положению. Обратными расчетами по 6 сечениям отвала на оползневом участке с учетом геометрических параметров откосов на момент развития оползней установлено, что поверхность скольжения имеет неглубокое залегание в толще грунтового основания и приурочена к верхней части слоя шоколадных глин, при этом характеристики последних составляют: сцепление  $0,01 \div 0,03$  МПа, угол внутреннего трения –  $0 \div 5^{\circ}$ .

Таким образом, слой хвалыньских шоколадных глин является наиболее «слабым», что ставит целью изучить, как изменяются его свойства под воздействием отвалообразования, тем самым уточнить адекватные реальным параметры прочности глин, необходимые для оценки возможности увеличения высоты отвала.

### **2.3 Изучение изменений состояния и свойств пород естественного основания отвалов под воздействием отвалообразования**

Исследования, направленные на изучение природы прочности глинистых пород при их взаимодействии с водой и водными растворами, проводились начиная с 1952 года в Лаборатории гидрогеологических проблем им. акад. Ф.П. Саваренского под руководством выдающихся ученых В.А. Приклонского, позже И.В. Попова. Благодаря их исследованиям было установлено, что при этом в глинистых грунтах происходят глубокие химические и физико-химические преобразования, которые и сопровождаются изменением прочностных свойств глин. Теоретические положения формирования состава и свойств глинистых пород и их изменения при физико-химических процессах были разработаны благодаря исследованиям В.А. Приклонского, И.В. Попова, В.И. Осипова, Е.М. Сергеева, И.М. Горьковой, Р.С. Зиангирова, Н.С. Реутовой, И.Г. Коробановой, Н.А. Окниной, Н.П. Затенацкой [21-22, 29, 43, 54, 62, 73, 95, 102, 106, 111, 118] и др. [88-89, 92-93, 114, 131, 133, 136-137, 151].

Из инженерно-геологической практики известно, что под влиянием утечек технических вод при эксплуатации промышленных предприятий в глинистых грунтах основания сооружений активизируются физико-химические процессы, приводящие к набуханию грунтов и, как следствие, снижению их прочности и несущей способности.

Физико-химические процессы при взаимодействии глинистых пород с агрессивными растворами изучались различными специалистами. В частности, Е.А. Сорочаном были выявлены характерные закономерности набухания глинистых грунтов в растворах кислот и щелочей, экспериментально установлены факты прироста величины набухания в агрессивных средах по сравнению с аналогичными процессами в грунтах, замоченных водой. Учитывая природу рассматриваемого процесса, им был введен термин "химическое набухание" [115-116].

Подобные результаты были получены Р.С. Зиангировым. В совместной работе с Н.А. Окниной и Н.А. Лавровой [43] приводятся экспериментальные

исследования влияния сернокислых растворов на физико-механические свойства хвалыньских глинистых грунтов. Отмечается снижение прочности, вызванное высокой влажностью набухания и разрушением цементационных связей породы за счет карбонатов. При этом отмечено, что изменение прочности такого типа глинистых пород при их взаимодействии с растворами серной кислоты не зависит от ее концентрации, так как образование сернокислых солей в породе не компенсирует уменьшение ее прочности, вызванное разрушением карбонатного цемента.

Обычно явление набухания и его последствия изучают изолированно от происходящих в грунтах физико-химических изменений. В действительности взаимодействие глинистых грунтов с промышленными стоками очень сложный процесс, протекающий в несколько этапов и зависящий от множества факторов. Так Р.Э. Дашко в своей работе [32] описывает несколько механизмов трансформации глинистых грунтов в основании сооружений в связи с утечками сточных вод. В работе экспериментально доказано, что при разных соотношениях концентраций поровой воды глинистых пород и фильтрующихся растворов природа набухания существенно различна.

В этой связи изучался вопрос влияния технической (подгипсовой) воды на свойства хвалыньских глин, залегающих в основании отвала химического предприятия БФ АО «Апатит». Эти глины известны своими специфическими свойствами – способностью набухать – обусловленными, главным образом, кристаллохимическим строением и химическим составом. Говоря о строении и свойствах хвалыньских глин, важно знать в каких условиях они были сформированы.

Генезис образования хвалыньских глин уходит корнями во времена плейстоцена-голоцена, когда практически на территории всей планеты происходили глобальные изменения географических обстановок. Геологическую историю Северного Прикаспия (Среднее Поволжье), к территории которого приурочен объект исследований, связывают с развитием и формированием Каспийского моря, с изменением его водного режима. Под влиянием сложных

геологических, геоэкологических и гидрогеологических процессов уровень Каспия (Хвалынского моря) подвергался значительным колебаниям [108]. По мнению исследователей, в плейстоценовой истории достоверно выделяются следующие крупные трансгрессивные эпохи – бакинская, раннехазарская и хвалынская. Они разделены глубокими и продолжительными регрессиями, когда шло накопление континентальных, аллювиальных и пролювиальных отложений [4]. Самой динамичной и сложной по своему развитию в этот промежуток времени отмечалась великая верхнечетвертичная Хвалынская трансгрессия [75], развивавшаяся в две стадии. Вначале море затопило большую часть Прикаспийской низменности, оставив после себя толщу желто-бурых суглинков, переходящих у подножия Приволжской возвышенности в супеси, а затем в пески различной крупности. В это время уровень моря поднялся до 40-50 м, т.е. на 75-78 м выше современного. Затем море отступило и во вторую стадию затопило только долину Волги и открывавшиеся в нее балки и овраги, которые превратились в лиманы, т.е. она имела характер ингрессии. Верхнехвалынская трансгрессия оставила после себя пески и очень характерные глины – шоколадные, слагающие террасу Волги и выполняющие понижения рельефа [50]. Во всех работах ряда исследователей [2, 6, 106, 111], посвященных изучению истории данной территории, внимание акцентируется именно на шоколадных глинах, занимающих здесь значительные площади, залегающих практически с поверхности вплоть до береговой линии позднехвалынского моря и являющихся отличительной и характерной фацией хвалынских отложений [3].

Хвалынские шоколадные глины являются «молодыми», возраст их колеблется в интервале 15-65 тыс. лет (возраст позднего плейстоцена). Их могут также именовать шоколадноподобными, верхнеплейстоценовыми, красными, и спутать эти глины с другими невозможно, ведь они действительно похожи на шоколад. Данный окрас породы не случаен и объясняется наличием большого количества окислов железа, т.к. осадконакопление происходило в условиях слабощелочной среды ( $pH=8$ ) и достаточного насыщения бассейна кислородом. Отложения достаточно хорошо изучены в низовьях р. Большой Иргиз. Они

обладают тонкой горизонтальной слоистостью, обусловленной пропластками и налетом пылевато-песчаного материала. При выветривании и подсыхании они расслаиваются на листовые пластинки.

Хвалынские глины обладают полиминеральным составом, где преобладающими глинистыми минералами являются: монтмориллонит (30-52%), иллит (16-34%), каолинит (16-33%) и присутствует хлорит (5-12%) [130].

Преобладание группы монтмориллонита оказывает решающее влияние на физико-химические свойства глин, важнейшими из которых, в частности определяющими характер и взаимодействие грунта с водой, являются строение кристаллической решетки и их способность к ионному обмену. Так, монтмориллонит имеет решетку, состоящую из двух внешних слоев кремнезема и одного глинозема. Связь между пакетами монтмориллонита оказывается недостаточно прочной. Полярные молекулы воды могут проникать между пакетами, образуя водные прослойки, которые оказываются тем толще, чем слабее межпакетная связь. Поэтому для этого минерала характерно внутрикристаллическое набухание, которое может привести к полному разрыву пакетов, что сопровождается понижением прочности с одной стороны, уменьшением минерализации и изменением поровых растворов – с другой [29, 50].

По исследованиям [50], полученным в лабораторных условиях, шоколадные глины при естественной влажности 21-28% способны развить набухание до 20-28% по сравнению с их первоначальным объемом. Такая величина набухания приводит к снижению их прочности в 10-12 раз.

Изучение хвалынских шоколадных глин в настоящей работе производилось с целью определения их физико-механических свойств и выявления закономерностей изменения под воздействием технических вод отвала фосфогипса.

В работе проведена серия экспериментов, моделирующих процесс взаимодействия хвалынских глин с подгипсовой водой отвала. Для исследований использованы высачивающиеся из тела отвала сточные воды, характеризующиеся

кислой реакцией рН, величина которой составляет 4,6. Подробный химический состав вод представлен в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Результаты исследований подотвальных сточных вод за 2015 г.:

<b>Показатель</b>	<b>Содержание, мг/л</b>
рН	4,6
сухой остаток	11376
сульфаты	7742,8
хлориды	461,5
фториды (г/л)	0,1
магний	963
железо	10,5
натрий	2159
жесткость	70,3
перманганатная окисляемость	80
марганец	12,6
никель	1,21
ртуть	0,035
стронций	3,7
фосфаты (г/л)	9,6
кальций	200

Образцы шоколадной глины были отобраны из буровых скважин за пределами территории химзавода, исходя из предположения, что там грунты не подверглись воздействию от отвала фосфогипса, а также из буровых скважин, пробуренных через техногенный массив отвала.

На первом этапе были определены физико-механические показатели хвалыньских шоколадных глин в их естественном состоянии. Определение физических характеристик (естественная влажность, плотность, плотность минеральной части, пределы пластичности) выполнено по стандартным методикам в соответствии с ГОСТ 5180-84 [28]. Определение гранулометрического состава выполнялось ареометрическим методом по ГОСТ 12536-79 [24]. Результаты исследований приведены в таблицах 2.8-2.9. Прочностные характеристики (угол внутреннего трения и сцепление) определялись на одноплоскостных сдвиговых приборах конструкции ELE

(рисунок 2.20) [23]. Породы испытывались при естественном сложении и естественной влажности в диапазоне вертикальных нагрузок от 0,1 до 0,3 МПа при скорости деформирования 2 мм/мин (неконсолидированно-недренированный сдвиг – НН).



Рисунок 2.20 – Устройство одноплоскостного сдвига конструкции ELE

Отмечено, что шоколадные глины содержат очень высокий процент тонкодисперсной составляющей – частиц размера  $<0,005$  мм, в среднем 66,4%. На втором месте по процентному содержанию находится фракция частиц 0,05-0,01 мм, содержание которой в среднем составляет 14,7%. Данный гранулометрический анализ относит исследуемые шоколадные глины морского генезиса к высокодисперсным глинистым грунтам. Ввиду высокой дисперсности минерального состава глины обладают высокими значениями верхнего предела пластичности (49,1%) и числа пластичности (23,6%). Естественная влажность глин составляет в среднем 26,6%, плотность  $1,94$  г/см<sup>3</sup> [25].

По результатам сдвиговых исследований (рисунок 2.21) шоколадные глины в естественных условиях (вне зоны влияния отвала фосфогипса) характеризуются в среднем: сцеплением  $0,34$  кгс/см<sup>2</sup> и углом внутреннего трения  $18^\circ$ .

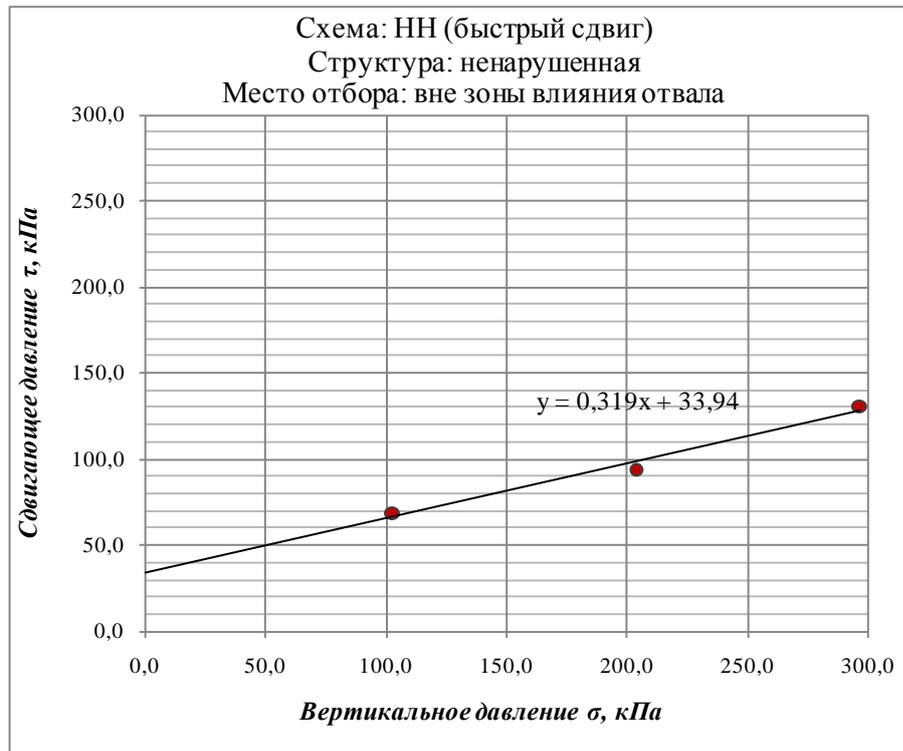


Рисунок 2.21 – Параметры сопротивления сдвигу при испытании глины ненарушенного сложения, отобранной за пределами промплощадки ( $c=0,34$  кгс/см<sup>2</sup>;  $\varphi=18^\circ$ ) (средние значения)

Таблица 2.8 – Гранулометрический состав хвалыньских шоколадных глин

Наименование грунта	Зерновой состав. Содержание частиц (%) по фракциям (мм)										
	>10	10-5	5-2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	<0,005
Глина ( <i>lim-QIIIhv<sub>2</sub></i> )	0,0	0,0	0,2	0,3	0,1	0,3	0,4	3,1	14,7	14,5	66,4

Примечание. В таблице приведены средние значения содержания частиц.

Таблица 2.9 – Сводная таблица физических свойств хвалыньских шоколадных глин

Наименование грунта	Плотность	Плотность скелета	Плотность частиц	Влажность			Число пластич ности	Показатель консистенц ии	Кoeffи циент пористо сти
				Природная влажность	На границе текучести	На границе раскатывания			
	$\rho, \text{т/м}^3$	$\rho_s, \text{т/м}^3$	$\rho_m, \text{т/м}^3$	W, %	W <sub>L</sub> , %	W <sub>p</sub> , %	I <sub>L</sub>	I <sub>p</sub>	e
Глина ( <i>lim-QIIIhv<sub>2</sub></i> )	1,94	1,53	2,60	26,6	49,1	25,5	23,6	0,08	0,70

Примечание. В таблице приведены средние значения показателей свойств.

На втором этапе были проведены специальные экспериментальные исследования, включающие изучение физико-химических явлений, таких как ионный обмен и свободное набухание, также проведение сдвиговых испытаний шоколадных глин в различных средах [56, 74, 76-78, 81-82, 98].

Изучение ионного обмена проводилось для оценки обменной способности и определения состава обменных ионов. Чем выше обменная способность глинистых пород, тем большее влияние на их физико-механические свойства оказывает состав обменных (поглощенных) ионов, тем выше их коллоидно-химическая активность и чувствительность к изменениям окружающей среды. Поэтому, прежде всего, следует определять емкость поглощения глинистой породы. Если она окажется достаточно высокой (более 5-10 мг-экв на 100 г породы), то необходимо далее определять состав обменных ионов. В обратном случае не имеет смысла, так как влияние их на свойства породы будет практически незначительным [29].

Для объяснения многих физико-химических процессов в дисперсных грунтах обращаются к теории катионного обмена, разработанной в 1918-1932 гг. К.К. Гедройцем. Суть сводится к тому, что ионы частиц (адсорбционного и диффузионного слоев) находятся в постоянном физико-химическом равновесии с ионами порового раствора. Однако при изменении состава раствора, начинается ионный обмен между ионами двойного электрического слоя частиц и внешним раствором. При этих обменных процессах определённое количество ионов из раствора входит в двойной электрический слой частиц, а эквивалентное количество других ионов уходит с поверхности частиц в раствор. То количество ионов грунта, которое способно участвовать в этом обмене и характеризуется емкостью обмена (емкостью поглощения).

Существенное воздействие на величину емкости поглощения оказывает кислотность среды (рН) вследствие перезарядки боковых сколов частиц: в кислой среде значение емкости меньше, чем в щелочной [118].

В связи с вышесказанным на первом этапе в работе была определена емкость обмена быстрым и простым методом, предложенным в 1951 г.

Р. Робертсоном и Р. Уордом. Метод основан на измерении количества адсорбированного красителя метиленового синего (голубого) глиной с использованием фотоколориметра. Данный метод не рассчитан на параллельное определение состава поглощенных ионов.

В ходе опыта были получены следующие величины емкости поглощения образцов шоколадной глины: 21,7-26,1 мг-экв/100 г породы, что характеризует степень поглотительной способности грунтов как «высокая», главным образом, за счет преобладания в составе монтмориллонита.

Определение состава поглощенных ионов производилось по водным вытяжкам, приготовленным из природных образцов шоколадной глины, отобранных за пределами промплощадки, и техногенных – отобранных из-под отвала, при предварительном их замачивании в дистиллированной воде (рисунок 2.22).



Рисунок 2.22 – Приготовление водных вытяжек для химического анализа их состава

Водные вытяжки выполнялись двумя разными способами. Первый выполнен самим автором и заключался в определении состава проб с помощью немецкого спектрофотометра фирмы Nach-Lange.

Второй выполнен Центром коллективного пользования высокотехнологичным оборудованием Санкт-Петербургского горного университета согласно методикам в соответствии с ГОСТ при использовании

методов атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектрометрии и методом ионной хроматографии. В обоих случаях пробоподготовка производилась автором при соотношении грунта к воде 1:5.

По результатам изучения водных вытяжек (таблица 2.10) установлено, что взаимодействие шоколадной глины с водами техногенного горизонта вызывает существенное изменение состава обменных катионов: происходит увеличение содержания обменного кальция, магния, натрия и калия, а также анионов: увеличение сульфатов и хлоридов. Наибольшее увеличение наблюдается среди двухвалентных катионов над одновалентными: содержание обменного магния возросло в 6,6 раз, а обменного кальция – в 2,7 раза; среди анионной группы – содержание иона  $\text{SO}_4^{2-}$  повысилось в 1,7 раз,  $\text{Cl}^-$  – в 1,5 раз. Также отмечен переход среды из слабощелочной в кислую – близкую к среде подотвальных вод.

Таблица 2.10 – Содержание ионов в водных вытяжках из проб шоколадных глин

Место отбора	рН	Содержание ионов, мг/л					
		$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{Na}^+$
вне зоны влияния отвала	7,7	47,4	128,4	39	11,9	3,7	198
из-под отвала	5,1	70,2	221,3	104	78,2	9,1	238

Согласно исследованиям [20, 118, 125, 128-129] существенное влияние состав ионов оказывает на пластичность глинистых грунтов. Присутствие значительного количества солей понижает пределы пластичности, причем особенно сильно у высокодисперсных монтмориллонитовых глин, что связано с процессом дегидратации и агрегации грунтовых частиц, сопровождаемых уменьшением диффузного слоя грунтовых мицелл и, естественно, уменьшением содержания слабосвязанной воды в грунтах. Однако в работе снижение пластичности шоколадной глины при воздействии подгипсовой воды не выявлено.

Изменение ионно-солевого комплекса приводит к изменению прочности глинистых пород [20, 118, 125, 128-129]. Тоже самое можно сказать и о параллельно протекающем физико-химическом процессе – набухании.

Следовательно, следующим шагом в работе было изучение явления набухания и проведение сдвиговых испытаний.

Свободное набухание выполнено в соответствии с методикой ГОСТ 24143-80 [26, 43, 110]. Набухание определялось при замачивании образцов дистиллированной водой, а «химическое набухание» – при замачивании подгипсовым раствором. Результаты исследований представлены на рисунках 2.23-2.24.

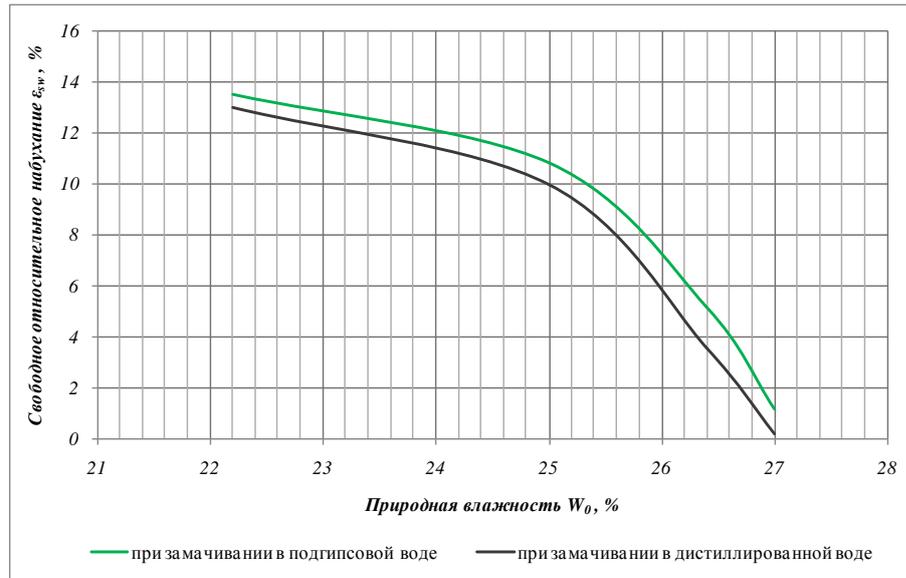


Рисунок 2.23 – График изменения величины свободного относительного набухания при замачивании в различных средах

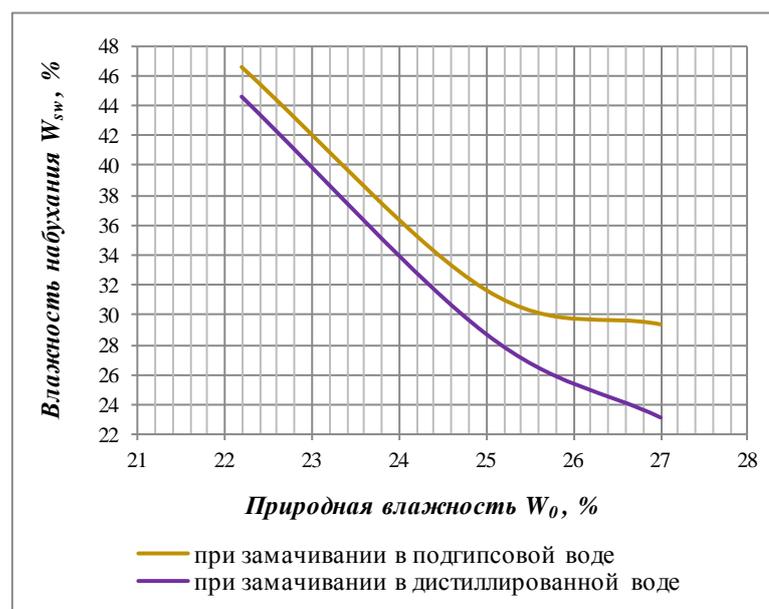


Рисунок 2.24 – График изменения величины влажности набухания при замачивании в различных средах

Из полученных результатов, очевидно, что набухание хвалынских шоколадных глин протекает активнее за счет дополнительного впитывания подгипсовых вод. Количественно «химическое» относительное набухание глин превышает величину относительного набухания при замачивании в дистиллированной воде в среднем в 1,2 раза.

При этом наиболее высокая влажность набухания (29,4-46,6%) отмечена при набухании в подгипсовой воде, что составляет в среднем до 45,2% по сравнению с их первоначальным объемом. После взаимодействия с дистиллированной водой объем образца возрастает в среднем на 29,9%.

Из рисунка 2.25 следует, что степень набухаемости существенно зависит от структуры глин. Нарушенная структура образцов характеризует (моделирует) состояние грунтов в основании отвала, в его приоткосной зоне, подверженной действию сдвигающих сил. В этой зоне грунты находятся в деструктивном состоянии, подвержены влиянию технической воды, которая фильтруется из техногенного массива отвала. Нарушение структуры грунтов повышает впитываемость технической воды и увеличивает степень набухаемости. Набухание хвалынских глин в образцах с нарушенной структурой выше в среднем в 3,3 раза.

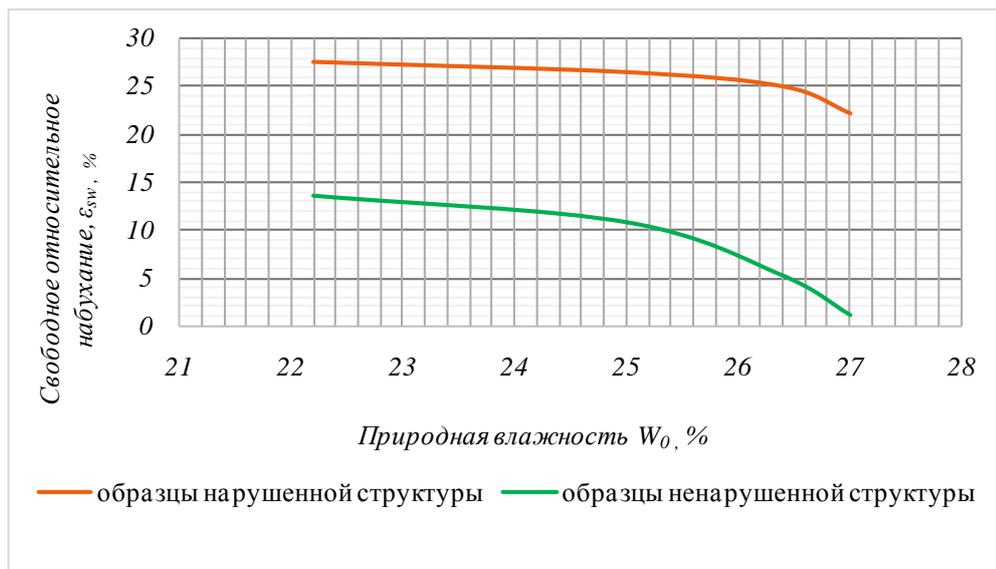


Рисунок 2.25 – График изменения величины свободного относительного набухания при замачивании образцов различной структуры

По существующей классификации набухающих грунтов согласно ГОСТ 25100-2011 [27] исследуемые образцы хвалынских глин при воздействии подгипсовой воды переходят из слабонабухающих в средненабухающие, а из средненабухающих – в сильнонабухающие.

Набухание глинистых пород в основании отвала предполагает снижение их прочности – как следствие повышения влажности [30, 32-33, 44]. Для исследования этого вопроса с целью оценки изменения условий устойчивости отвального сооружения автором были проведены сдвиговые опыты, моделирующие деформационное поведение грунтов под отвалом. Вертикальные нагрузки в опытах соответствовали напряженному состоянию грунтов основания под откосом отвала высотой 40 м в той его части, где поверхность скольжения проходит в толще основания, т.е. примерно до 300 кПа.

Породы испытывались по следующим схемам: после насыщения дистиллированной водой в диапазоне вертикальных нагрузок от 0,05 до 0,3 МПа (консолидированно-дренированный сдвиг – КД), после насыщения подгипсовой водой в диапазоне вертикальных нагрузок от 0,05 до 0,3 МПа (консолидированно-дренированный сдвиг – КД), также производился сдвиг по заранее сформированной поверхности «плашка по плашке» для определения остаточной прочности грунта. Результаты сдвиговых испытаний представлены на рисунках 2.26-2.27 и в таблице 2.11.

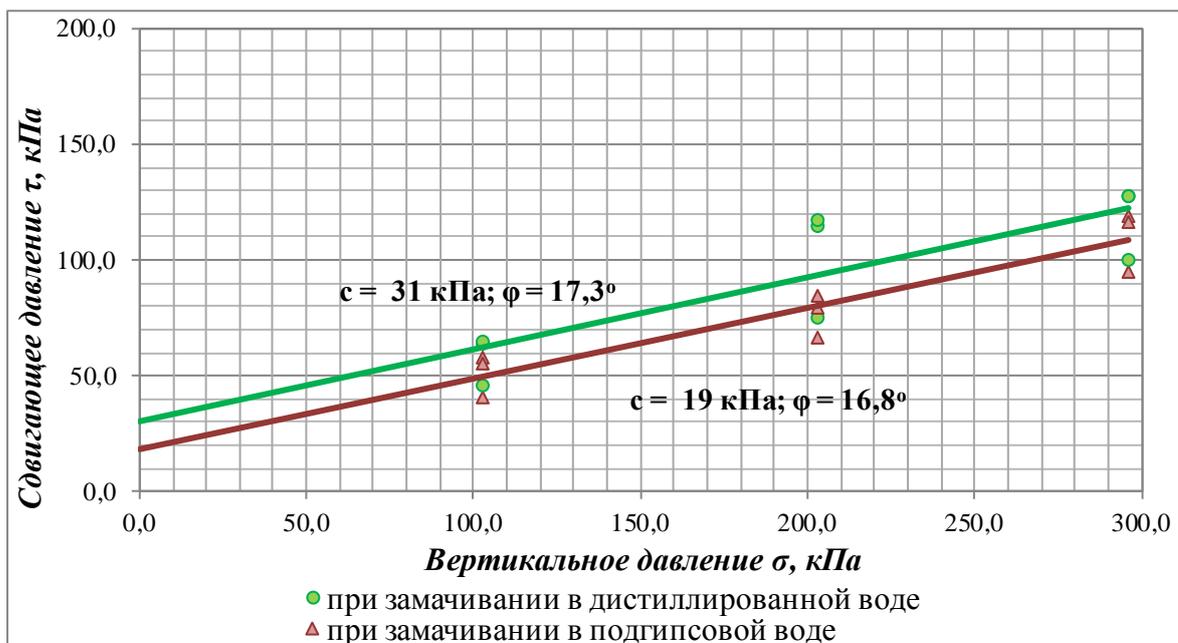


Рисунок 2.26 – Средние значения параметров сопротивления сдвигу при испытаниях образцов глин ненарушенного сложения в различных средах

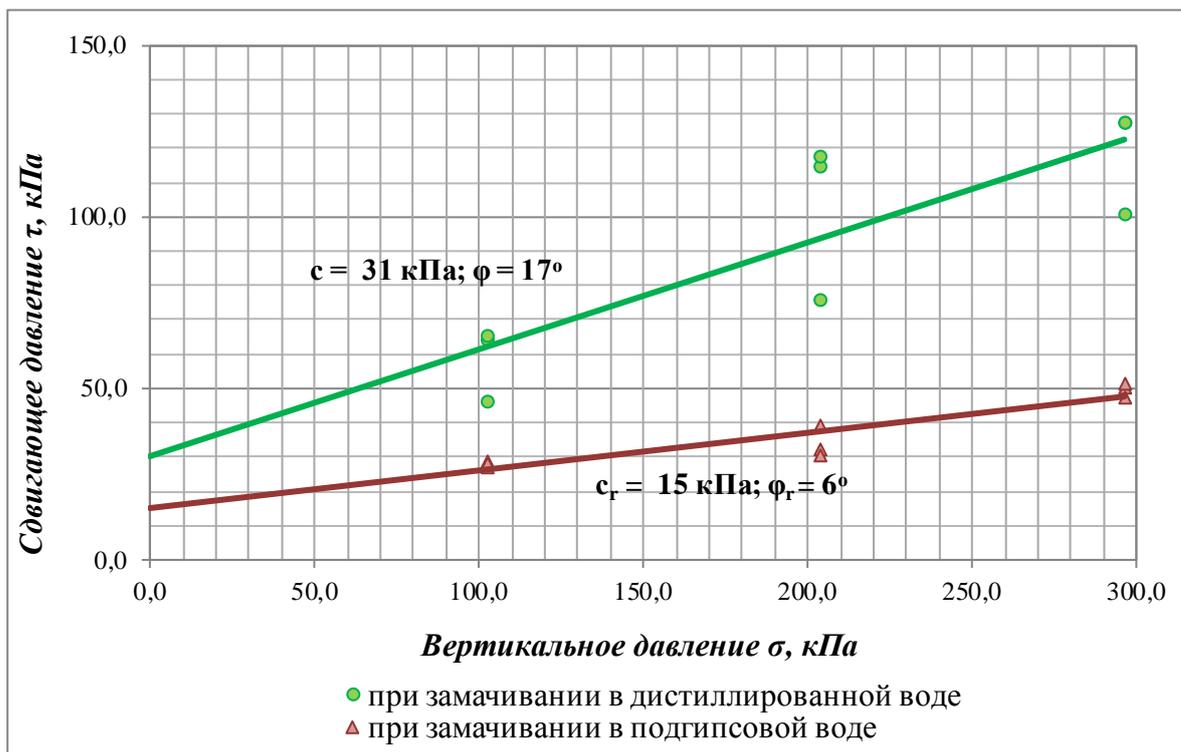


Рисунок 2.27 – Изменение параметров прочности глины в пределах возможного оползания под откосом высотой 40 м

Таблица 2.11 – Результаты сдвиговых испытаний хвалынских шоколадных глин при различных схемах испытаний и средах (в средних значениях)

Схема испытаний	Место отбора	Природная влажность, %	Структура	Среда							
				Дистиллированная вода				Подгипсовая вода			
				Показатели сдвига				Показатели сдвига			
				Основной сдвиг		"Плашка по плашке"		Основной сдвиг		"Плашка по плашке"	
				φ, град	с, кПа	φ <sub>г</sub> , град	с <sub>г</sub> , кПа	φ, град	с, кПа	φ <sub>г</sub> , град	с <sub>г</sub> , кПа
Н Н	вне зоны влияния	26,6	ненаруш	17,7	33,94						
			наруш	12,6	23,03	-	-				
	центр отвала	23,9	ненаруш	19,1	45,04	13,0	37,34				
К Д	вне зоны влияния	28,1 до	ненаруш	<b>17,3</b>	<b>30,48</b>	13,0	21,55	<b>16,8</b>	<b>18,73</b>	<b>6,2</b>	<b>14,86</b>
		31,6 после									

Непосредственно под отвалом, в центральной его части, прочность глин выше, чем вне зоны влияния отвала фосфогипса, что связано со снижением влажности до среднего значения 23,9% и повышением параметра сцепления в среднем в 1,3 раза. Полученные результаты аналогичны выводам по результатам изысканий [107] о консолидации естественного основания отвала под действием его веса.

Результаты исследований по схеме КД – сдвига доказывают, что взаимодействие глин, отобранных за пределами территории химзавода, с подгипсовыми водами отвала вызывает уменьшение величины сцепления в среднем в 1,6 раза и незначительное изменение угла внутреннего трения (рисунок 2.26). Однако глины в пределах призмы возможного оползания под откосом высотой 40 м находятся в деструктивном состоянии, следовательно, правомочно сравнивать значения испытаний образцов глин в ненарушенном состоянии в дистиллированной воде со значениями образцов нарушенного сложения в подгипсовой воде (нарушенным мы считаем сложение при повторном срезе "плашка по плашке") (рисунок 2.27). В таком случае мы учитываем оба фактора, влияющих на прочностные свойства грунтов, как механическое разрушение их структуры, так и воздействие технической воды. В результате получаем, что в зоне

сдвигов произошло снижение сцепления в среднем в 2,1 раза, угла внутреннего трения в среднем в 2,8 раза.

Следует также отметить, что полученные значения прочности глин по результатам физического моделирования коррелируют со значениями, полученными в ходе обратных расчетов по 6 сечениям на оползневом участке.

## **2.4 Выводы по главе 2**

1. Выполнена оценка условий складирования фосфогипса в отвал Балаковского Филиала АО «Апатит» на основании анализа произведенных полевых и лабораторных исследований физико-механических свойств техногенных пород отвалов – фосфогипса и отложений основания, наблюдений за гидродинамическим режимом техногенного водоносного горизонта по наблюдательным скважинам.

2. Техногенный массив отвала характеризуется неоднородным строением. При общей тенденции нарастания показателей механических свойств с глубиной, прослеживается зональность по физическим показателям, структурированности и консистенции фосфогипсов. Выделено 4 инженерно-геологических элемента (сверху вниз): 1а – «псевдоплошной» фосфогипс – структурированный, пористый, влажный, напоминающий «корку»; 1б – дезинтегрированный фосфогипс, относительно сухой, плотный, комковатый; 1в – трещиноватый, в блоках – плотный, влажный, пластичный (ниже уровня воды); 1г – «псевдопластичный» фосфогипс, отличающийся монолитностью и повышенной прочностью.

3. Для объяснения выявленной неоднородности техногенного массива выполнена серия лабораторных экспериментов, моделирующих процесс формирования состояния и свойств техногенных грунтов из гипсовых отходов и их гравитационного уплотнения в массиве. Учитывалось, что в отвал размещались два вида фосфогипсов – дигидрат и полугидрат сульфата кальция, отличающиеся между собой химико-минералогическим составом. Установлено, что на выходе с технологической линии оба отхода характеризуются близкими

прочностными свойствами, но в дальнейшем полугидрат более активно кристаллизуется с формированием жесткой цементационной структуры, которая придает ему повышенную прочность, главным образом, за счет повышенного сцепления. В массиве отвала преобладающее влияние на формирование техногенных грунтов оказывает гравитационное уплотнение, в результате чего большого отличия между отложениями, сформированными из разных фосфогипсов, не наблюдается.

4. На основании испытаний образцов фосфогипса, отобранных из буровых скважин, получены характеристики физико-механических свойств техногенных грунтов для каждого выделенного инженерно-геологического элемента (слоя).

5. В техногенном массиве отвала развит водоносный горизонт, приуроченный к ИГЭ 1в и ИГЭ 1г. Водоносный горизонт имеет мощность от единиц метров на краях откосов отвала до 40 м в центре. По данным натурных замеров по пьезометрическим скважинам тело отвала обводнено почти на 70% по мощности (в центре), уровень техногенного водоносного горизонта постоянно повышается по мере увеличения высоты отвала (в среднем на 0,5 м в год), а после прекращения отсыпки – практически не снижается.

6. Высокая обводненность обусловлена складированием фосфогипса с большим содержанием свободной воды и затрудненными условиями дренирования техногенного массива. При активном ведении отвалообразования ежедневно в отвал поступает более 1000 м<sup>3</sup> технической воды, которая остается в отвальном массиве и идет на пополнение техногенного водоносного горизонта. Затрудненные условия разгрузки водоносного горизонта обусловлены экранированием откосов отвала слабопроницаемой коркой фосфогипса, залеганием в основании насыпного массива слабопроницаемых хвалынских глин, являющихся региональным водоупором, а также организацией противофильтрационных мероприятий.

7. Влияние техногенного водоносного горизонта проявляется в ослаблении прочностных свойств естественного основания отвала, представленного слоистой толщей четвертичных песчано-глинистых грунтов различного генезиса.

Обратными расчетами с учетом параметров откосов на момент развития оползней установлено, что поверхность скольжения имеет неглубокое залегание в толще грунтового основания и приурочена к верхней части слоя шоколадных глин. В связи с этим проведена серия экспериментов, моделирующих процесс взаимодействия глин естественной и нарушенной структуры с подгипсовой водой отвала.

8. На основании результатов экспериментов установлено, что вследствие механического разрушения структуры грунтов в зоне сдвигов и воздействия технической воды происходит снижение прочности шоколадных глин: сцепления в среднем в 2,1 раза, угла внутреннего трения в среднем в 2,8 раза. Данное обстоятельство является причиной снижения устойчивости откосов отвала, что со временем приводит к развитию оползневых деформаций.

9. Отвальные сооружения представляют собой динамические природно-технические системы, в процессе функционирования которых происходит изменение компонентов инженерно-геологических условий: структуры отвального массива, уровня техногенного водоносного горизонта, состава, состояния и свойств техногенных и естественных грунтов, что предопределяет закономерное развитие деформационных процессов, оказывающих влияние на безопасность отвальных работ.

## **ГЛАВА 3 ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ, ОКАЗЫВАЮЩИХ ВЛИЯНИЕ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ОТВАЛЬНЫХ РАБОТ**

### **3.1 Результаты натуральных наблюдений за деформациями отвала**

Необходимость в организации инструментального деформационного мониторинга на отвале была обусловлена появлением в 2009 году признаков развития деструктивных процессов – фильтрационных выходов воды на прилегающей территории между нижней бровкой отвала и противофильтрационной завесой, а также деформаций водоотводящих лотков [57]. Вместе с тем в этот период рассматривался вопрос о повышении высоты отвала до 50 м, а в последующем – до 70 и 100 м.

Геодезическая станция на отвале БФ АО «Апатит» была оборудована в 2010-2012 гг. и первоначально включала 8 профильных линий, состоящих из 60 забивных реперов (рисунок 3.1). Наблюдательная станция заложена в местах наиболее вероятных деформаций. В дальнейшем две профильные линии были уничтожены в связи с расширением отвала и увеличением высоты в районе профильных линий УII и УIII, оставшиеся линии по мере необходимости пополнялись новыми реперами.

На момент последней съемки (03.10.2017) геодезическая станция состоит из шести профильных линий (№№ I-VI) в количестве 66 реперов.

В рамках ведения геодезического мониторинга [109] построение планово-высотного обоснования осуществлялось методом проложения теодолитных ходов от пунктов геодезических сетей сгущения, построение высотного обоснования осуществлялось методом тригонометрического нивелирования. Для производства измерений применялся электронный тахеометр SOKKIA SET 110R. Измерения горизонтальных углов выполнялись методом приемов 1 полным приемом, линейные измерения выполнялись дважды в прямом и обратном направлении, зенитные расстояния измерялись дважды в прямом и обратном направлениях. Построенная сеть планово-высотного обоснования состоит из 19 пунктов.

Планово-высотная привязка деформационных реперов выполнялась с пунктов съемочного обоснования методом прямой линейно-угловой засечки.

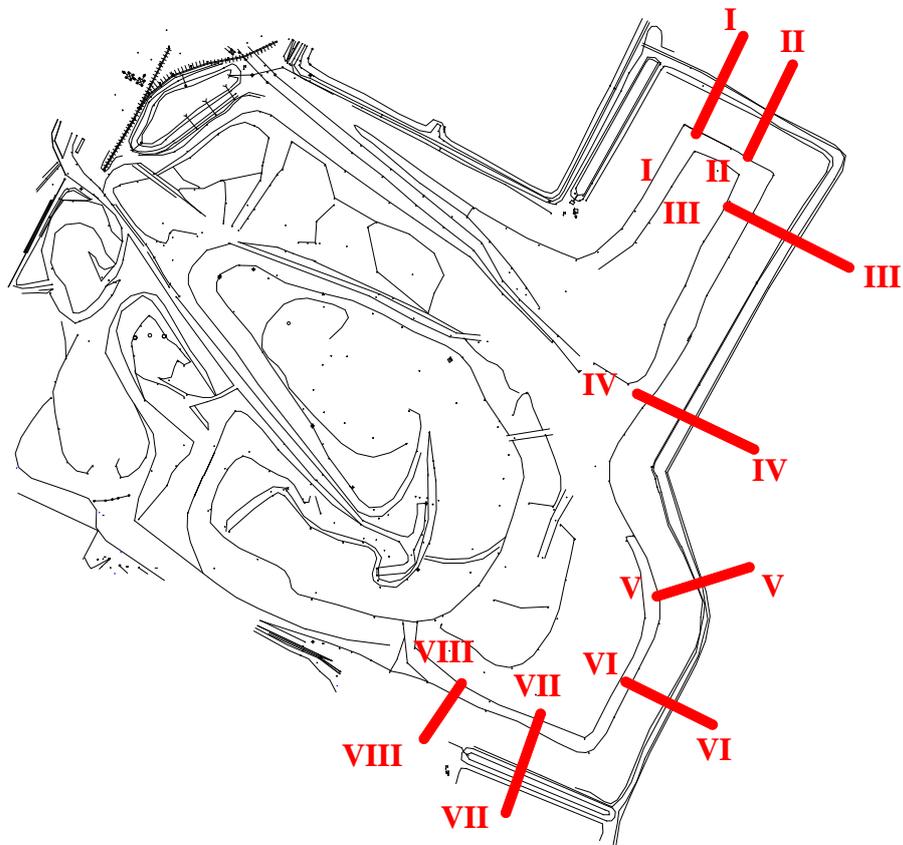


Рисунок 3.1 – Схема расположения профильных линий

В связи с расширением границ, встала задача определить параметры деформаций отвала и возможности увеличения его высоты. Для расчетов данных параметров потребовалась определить его геометрические параметры (высоту и угол падения откосов). Отвал фосфогипса занимает большую площадь, а сложная геометрическая форма осложняет процесс съемки. Поэтому в 2011 году было принято решение произвести лазерно-сканирующую съемку, которая позволила определить углы откосов практически в любом месте по периметру отвала. Съемка производилась лазерным сканером LMS-Z420i.

В результате съемки были получены 11 трехмерных точечных моделей, после ориентирования которых получена модель отвала. На рисунках 3.2-3.3 представлена точечная модель отвала, в которой каждый скан имеет свою цветовую окраску.

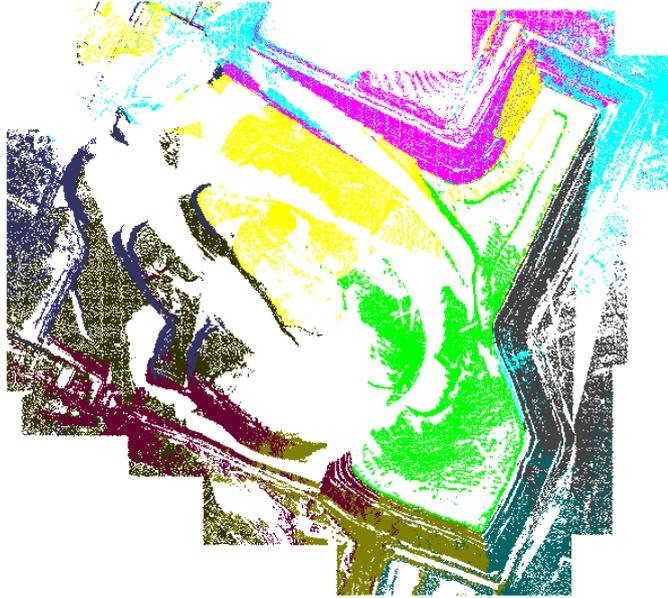


Рисунок 3.2 – Точечная модель отвала. Вид сверху

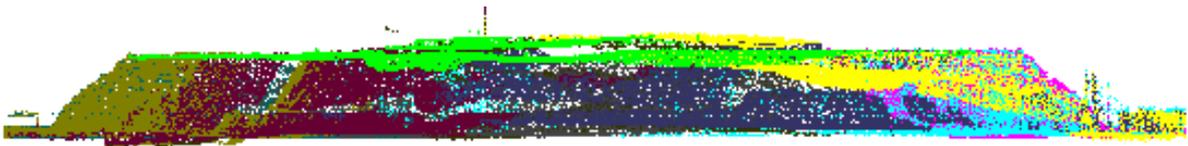


Рисунок 3.3 – Точечная модель отвала. Вид сбоку

По данной модели в программном продукте AutoCAD были построены и нанесены на съемку от 2009 года верхняя и нижняя бровки откосов отвала. По результатам лазерно-сканирующей съемки их положение изменилось. Отмечается, что за год произошло повсеместное оседание поверхности отвала. Затем в программном продукте GModeler были построены 16 сечений (S\_1-S\_16) по откосам и в основных местах их перегиба, для определения углов падения откосов (рисунок 3.4). В результате были получены углы заложения откосов отвала, которые колеблются в пределах от 21 до 29°. На опасном оползневом участке (сечения S\_7-S\_11) с наиболее активным развитием смещений углы откосов составляют 27-28° (рисунок 3.5).

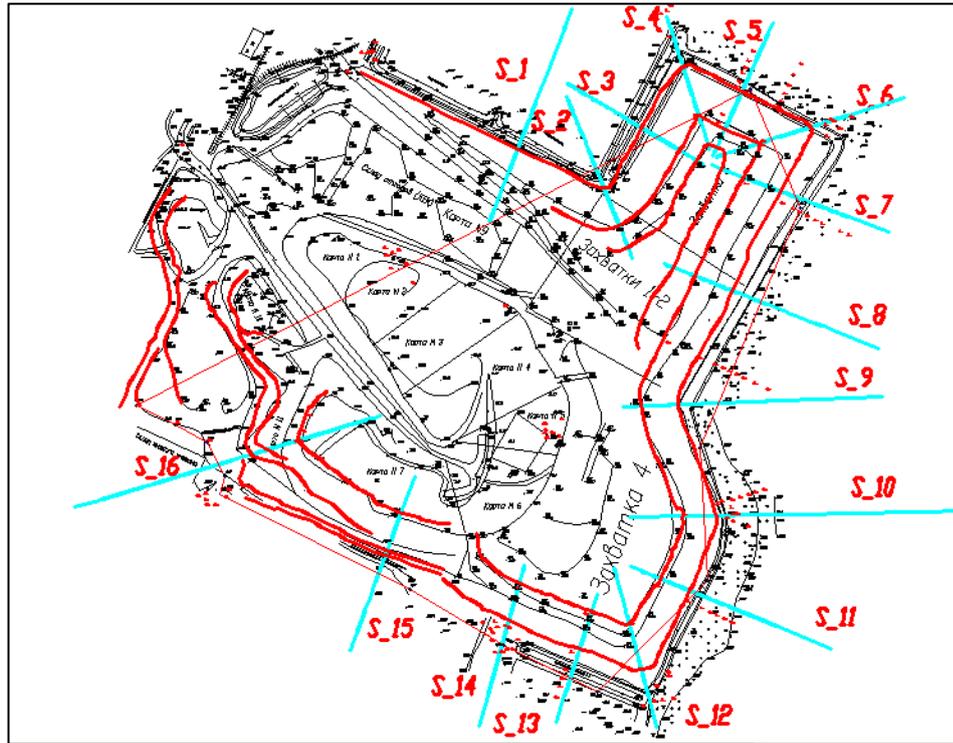


Рисунок 3.4 – Схема расположения сечений

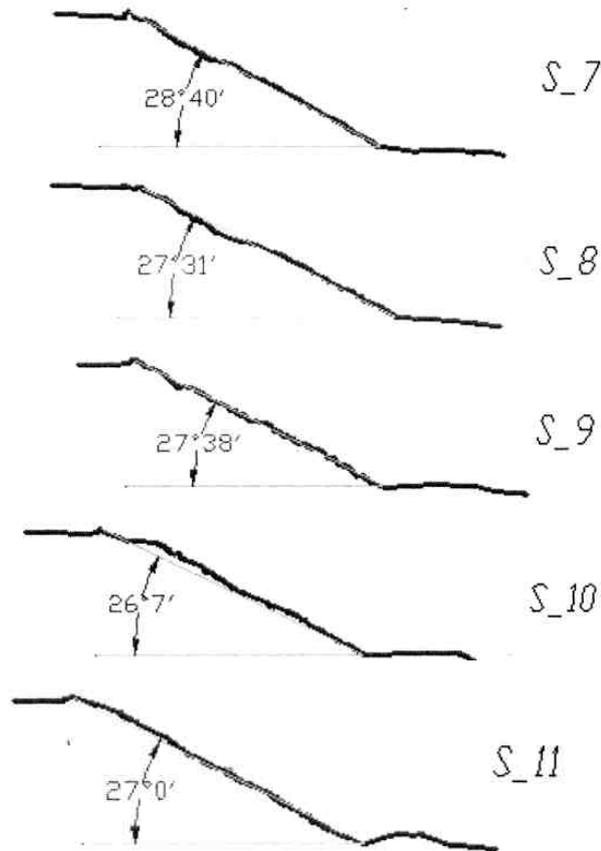


Рисунок 3.5 – Параметры откосов отвала по сечениям S\_7-S\_11

В настоящей работе для установления закономерностей развития деформационных процессов на отвале фосфогипса выполнен анализ результатов геодезического мониторинга за 5 лет наблюдений с 2012 по 2017 гг. Для анализа использованы материалы научно-исследовательских отчетов Санкт-Петербургского горного университета [7, 109], в которых результаты геодезических измерений представлены в виде ведомостей координат геодезических пунктов и их перемещений (вертикальных и горизонтальных) за определенный период времени (обычно, полгода). По указанным материалам построены графики изменения скоростей вертикальных и горизонтальных смещений реперов по каждой профильной линии, на которых отчетливо прослеживаются тенденции в динамике развития деформационных процессов на откосах отвала (рисунки 3.6-3.17). Положение реперов на откосе отвала показано на рисунках 3.18-3.19.

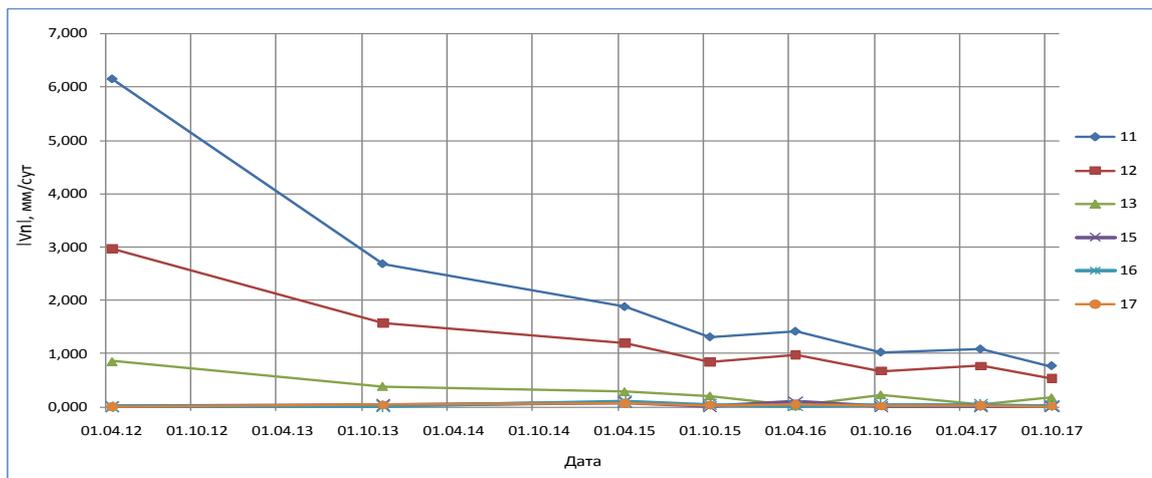


Рисунок 3.6 – Изменение скорости вертикальных смещений реперов во времени по профилю I-I

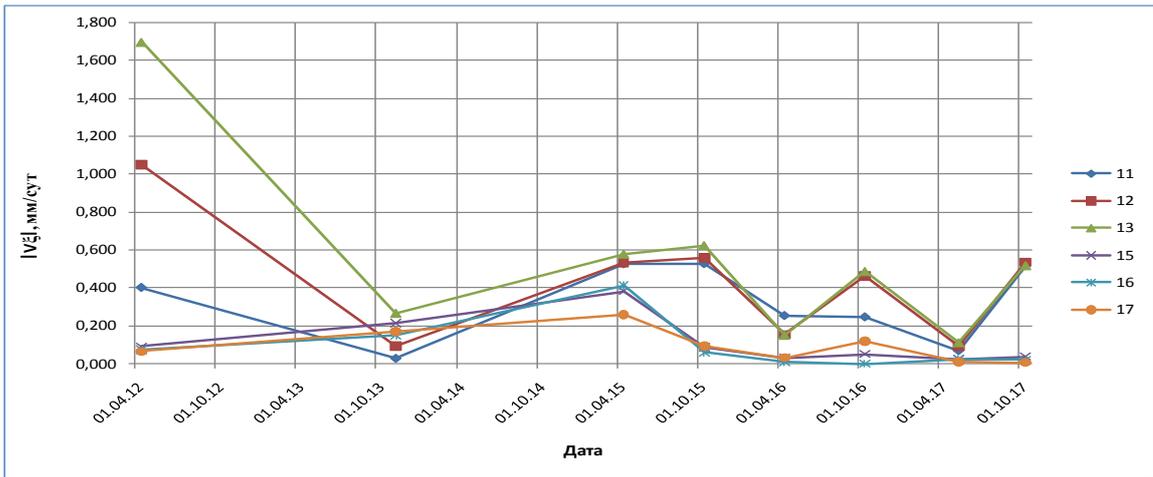


Рисунок 3.7 – Изменение скорости горизонтальных смещений реперов во времени по профилю I-I

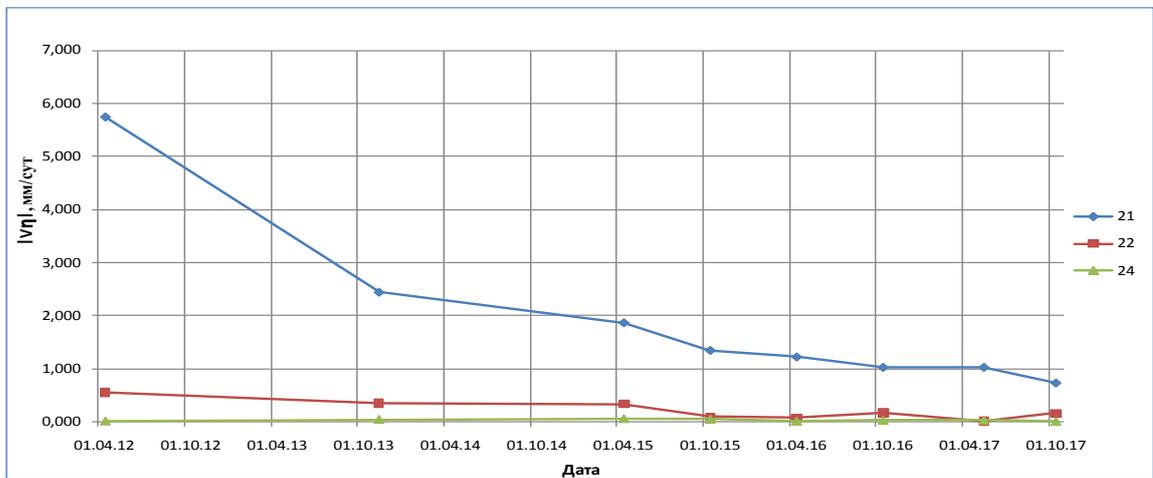


Рисунок 3.8 – Изменение скорости вертикальных смещений реперов во времени по профилю II-II

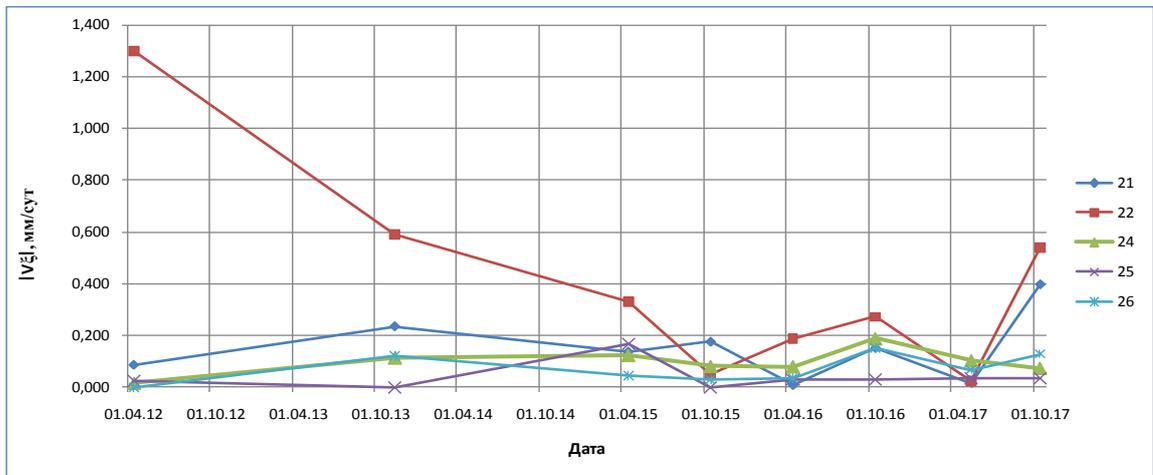


Рисунок 3.9 – Изменение скорости горизонтальных смещений реперов во времени по профилю II-II

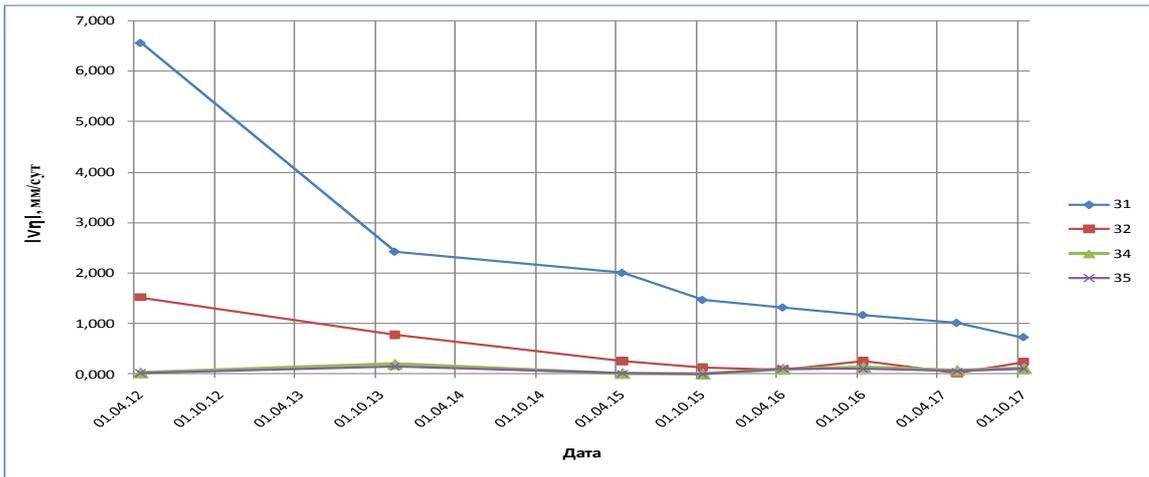


Рисунок 3.10 – Изменение скорости вертикальных смещений реперов во времени по профилю III-III

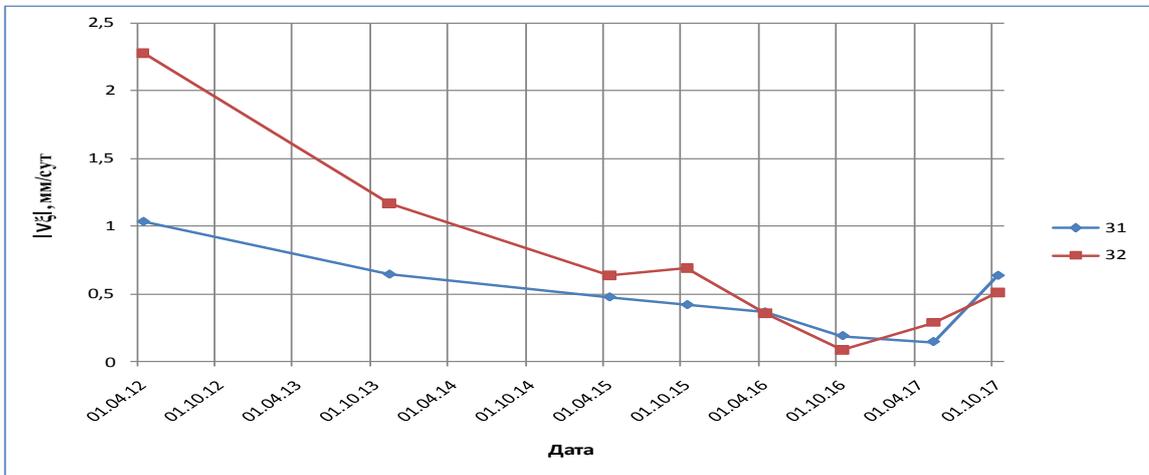


Рисунок 3.11 – Изменение скорости горизонтальных смещений реперов во времени по профилю III-III

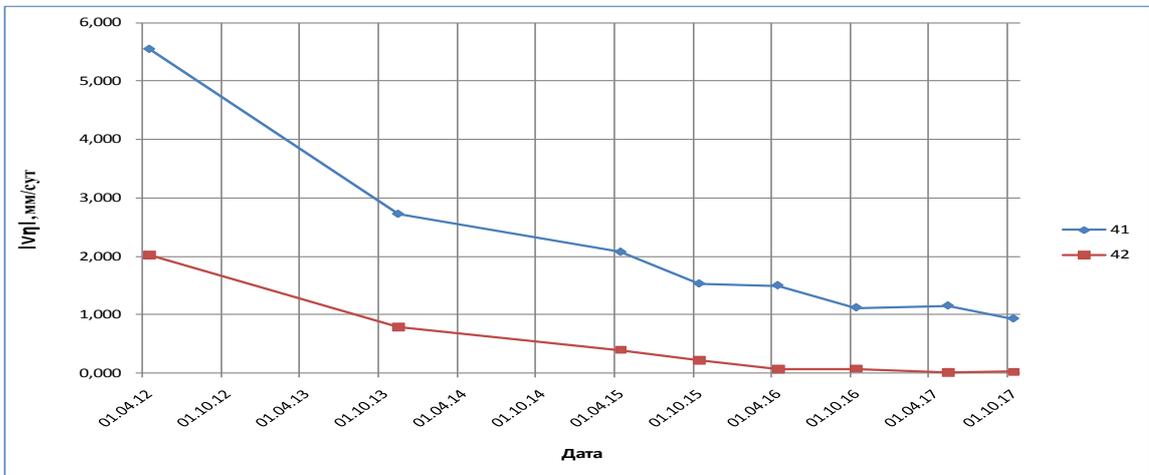


Рисунок 3.12 – Изменение скорости вертикальных смещений реперов во времени по профилю IV-IV

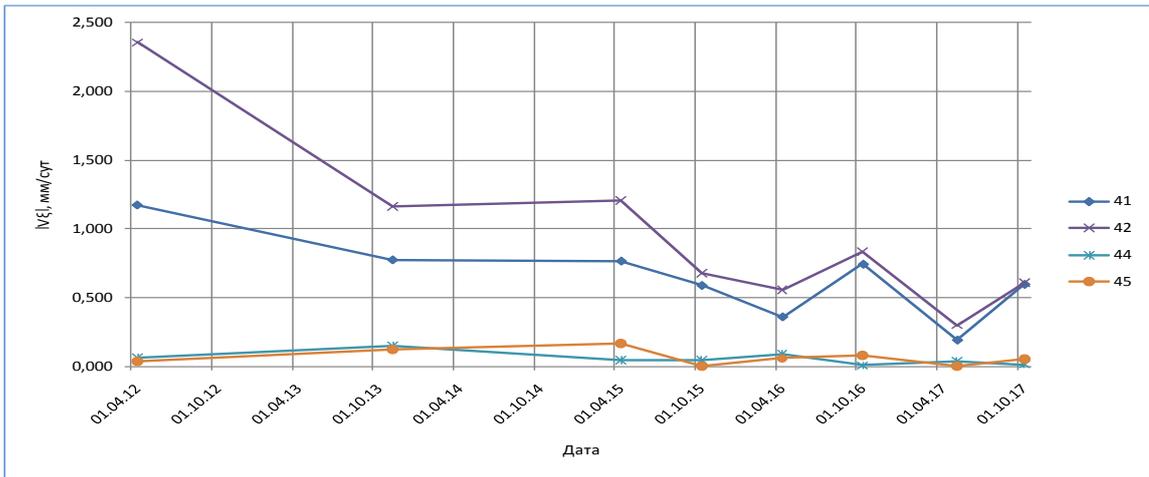


Рисунок 3.13 – Изменение скорости горизонтальных смещений реперов во времени по профилю IV-IV

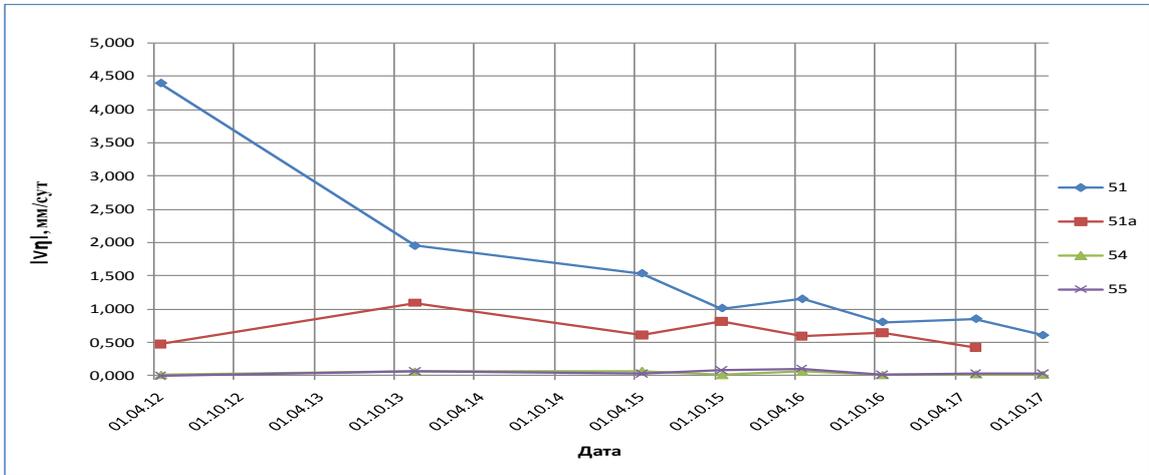


Рисунок 3.14 – Изменение скорости вертикальных смещений реперов во времени по профилю V-V

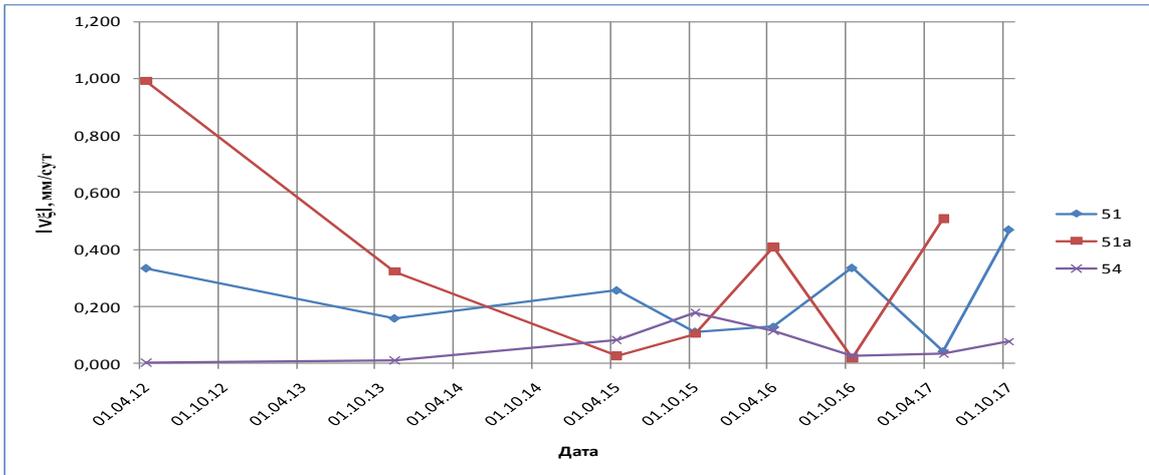


Рисунок 3.16 – Изменение скорости горизонтальных смещений реперов во времени по профилю V-V

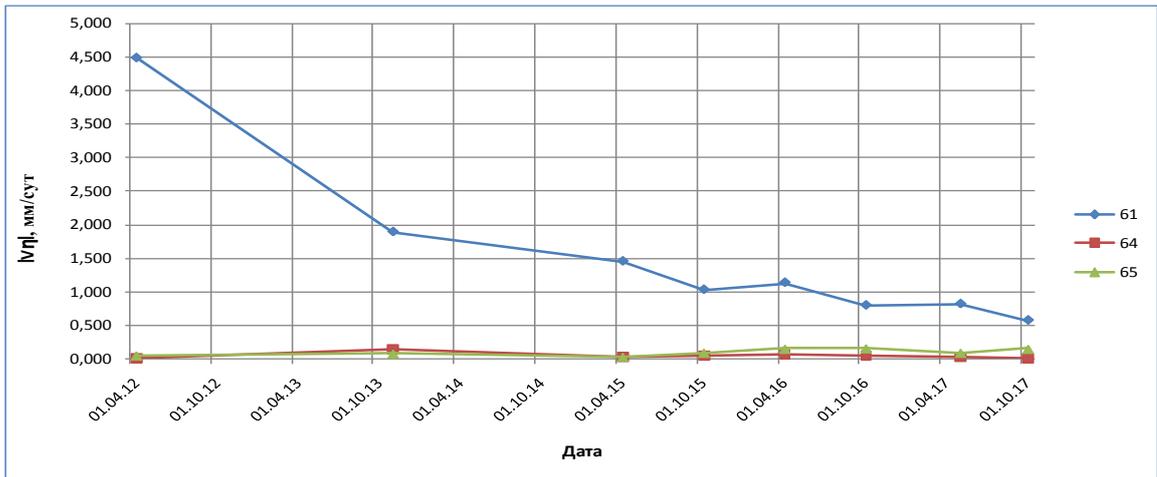


Рисунок 3.15 – Изменение скорости вертикальных смещений реперов во времени по профилю VI-VI

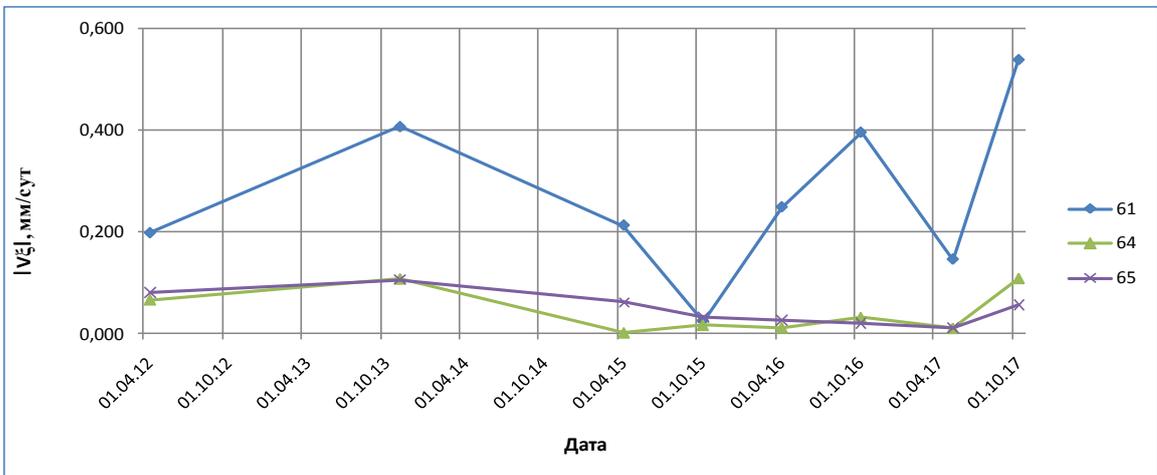


Рисунок 3.17 – Изменение скорости горизонтальных смещений реперов во времени по профилю VI-VI

Анализ результатов геодезического мониторинга показывает, что деформации поверхности и отколов отвала фосфогипса обусловлены одновременным развитием вертикальных и горизонтальных смещений [142], причем первые – имеют наиболее выраженный характер, что хорошо прослеживается при представлении материалов инструментальных наблюдений в виде графиков распределения результирующих векторов смещений по поверхности отколов и на прилегающей территории (рисунки 3.18-3.19).

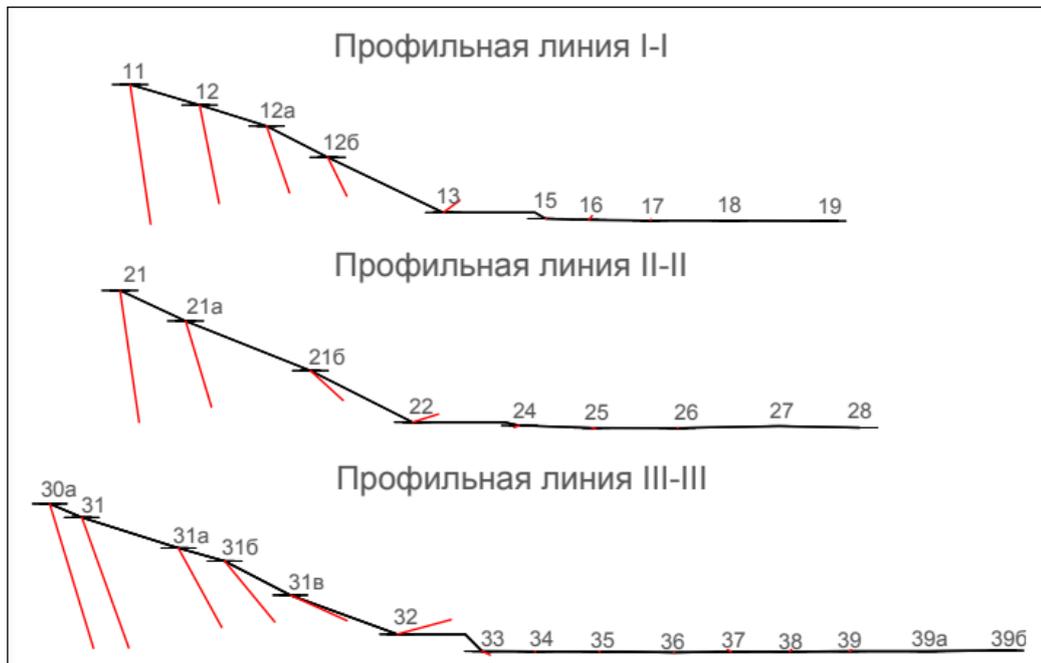


Рисунок 3.18 – Распределение деформаций за период 28.09.2016 – 03.10.2017 в виде векторов результирующих смещений  $|R|_{3-1}$  по профильным линиям I-I, II-II, III-III

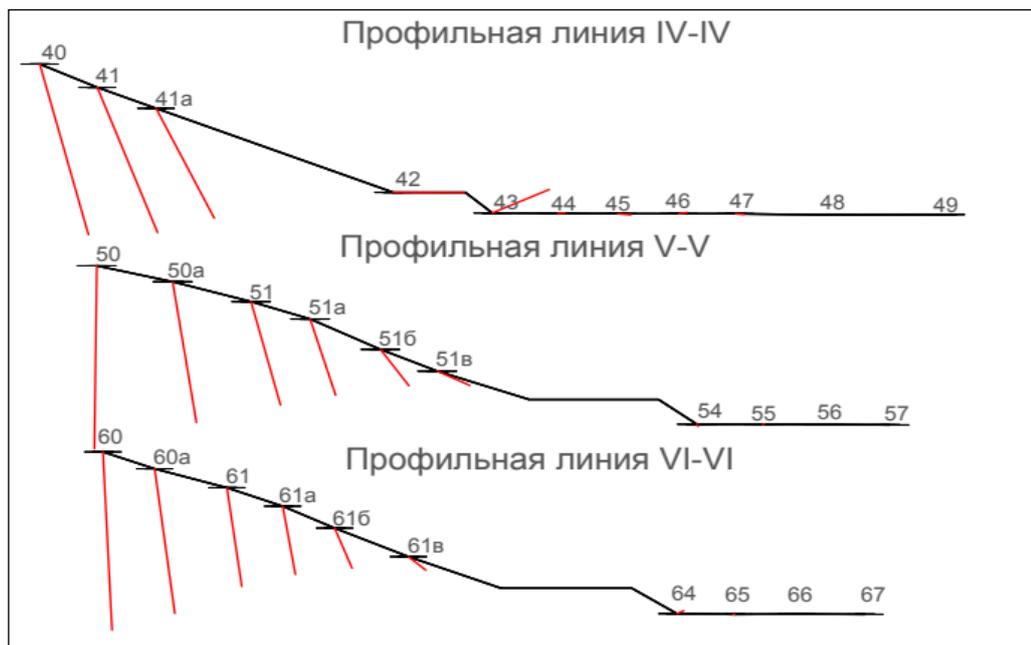


Рисунок 3.19 – Распределение деформаций за период 28.09.2016 – 03.10.2017 в виде векторов результирующих смещений  $|R|_{3-1}$  по профильным линиям IV-IV, V-V, VI-VI

Вертикальные смещения верхних бровок откосов могут быть обусловлены как процессами уплотнения насыпных фосфогипсов, так и развитием оползневых смещений. Для выявления характера развития геодинамических процессов (оседаний и оползневых смещений) результаты геодезических измерений

систематизированы по равным временным отрезкам с выделением нескольких составляющих фиксируемых деформаций (таблицы 3.1-3.6):

$(\Delta Z_{\downarrow}, \Delta Z_{\uparrow})$  – осадка и поднятие репера соответственно;

$\Delta Z^{\text{cons}}_{\downarrow}$  – осадка, обусловленная консолидацией пород;

$\Delta S_{\leftarrow}$  – горизонтальное смещение репера;

$(\Delta Z_{\downarrow})/t, (\Delta Z_{\uparrow})/t$  – скорость вертикальных смещений верхнего и нижнего реперов соответственно;

$(\Delta S_{\leftarrow})/t$  – скорость горизонтальных смещений.

Для анализа использованы материалы наблюдений за 7 лет с 2010 по 2017 годы:

1 полугодие: 01.11.2010 г. – 17.05.2011 г. (197 дн.);

2 полугодие: 17.05.2011 г. – 21.10.2011 г. (157 дн.);

3 полугодие: 21.10.2011 г. – 26.04.2012 г. (188 дн.);

4 полугодие: 26.04.2012 г. – 01.11.2012 г. (189 дн.);

5 полугодие: 01.11.2012 г. – 25.04.2013 г. (175 дн.);

6 полугодие: 25.04.2013 г. – 06.11.2013 г. (195 дн.);

7 полугодие: 06.11.2013 г. – 03.04.2014 г. (148 дн.);

8 полугодие: 03.04.2014 г. – 27.11.2014 г. (238 дн.);

9 полугодие: 27.11.2014 г. – 28.04.2015 г. (152 дн.);

10 полугодие: 28.04.2015 г. – 23.10.2015 г. (178 дн.);

11 полугодие: 23.10.2015 г. – 26.04.2016 г. (186 дн.);

12 полугодие: 26.04.2016 г. – 28.09.2016 г. (155 дн.);

13 полугодие: 28.09.2016 г. – 23.05.2017 г. (237 дн.);

14 полугодие: 23.05.2017 г. – 03.10.2017 г. (133 дн.).

Таблица 3.1 – Анализ результатов геодезических наблюдений по профилю I-I

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие
	дне	дне	дне	дне	дне	дне	дне	дне	дне	дне	дне	дне	дне	дне
	197 дн.	157 дн.	188 дн.	189 дн.	175 дн.	195 дн.	148 дн.	238 дн.	152 дн.	178 дн.	186 дн.	155 дн.	237 дн.	133 дн.
<b>Анализ величин вертикальных смещений</b>														
Осадка верхней бровки Rp 11 $\Delta Z \downarrow$ , [м]	2,012	1,038	1,077	0,801	0,560	0,522	0,321	0,405	0,285	0,232	0,262	0,159	0,255	0,102
	затухающий характер													
Поднятие нижней бровки Rp 13 $\Delta Z \uparrow$ , [м]	0,214	0,176	0,141	0,156	0,086	0,075	0,040	0,038	0,043	0,037	-0,003	0,035	0,008	0,023
	затухающий характер, с нарастанием в последнее полугодие													
примечание: "-" оседание														
Часть осадки по Rp 11, обусловленная консолидацией пород $\Delta Z^{cons} \downarrow$ , [м]	1,798	0,862	0,936	0,645	0,474	0,447	0,281	0,367	0,242	0,195	0,265	0,124	0,247	0,079
	общая тенденция к затуханию													
$\Delta Z^{cons} \downarrow / \Delta Z$ , %	89	83	87	81	84	86	88	91	85	84	100	78	97	77
	относительно стабильно													
$(\Delta Z - \Delta Z^{cons} \downarrow) / \Delta Z$ , %	11	17	13	19	15	14	12	9	15	16	0	22	3	23
<b>Анализ величин горизонтальных смещений</b>														
Горизонтальное смещение Rp 11 $\Delta S \leftarrow$ , [м]	0,010	0,042	0,094	0,074	0,125	0,005	-0,048	0,008	-0,080	-0,093	0,047	0,038	-0,016	0,068
	нарастающий характер					знакопеременный характер с общей тенденцией к постепенному затуханию деформационных процессов								
примечание: "-" к отвалу														
Горизонтальное смещение Rp 13 $\Delta S \leftarrow$ , [м]	0,474	0,304	0,308	0,242	0,200	0,052	0,040	-0,059	-0,088	-0,111	0,028	0,076	-0,026	0,069
	знакопеременный характер с общей тенденцией к затуханию деформационных процессов, с нарастанием в 12 и 14 полугодиях													
<b>Анализ скоростей развития деформаций (по модулю)</b>														
Скорость вертикальных смещений Rp 11, $(\Delta Z \downarrow) / t$ , [мм/сут]	10,200	6,610	5,720	4,230	3,180	2,680	2,169	1,702	1,702	1,873	1,410	1,024	1,078	0,763
	затухающий характер													
Скорость вертикальных смещений Rp 13, $(\Delta Z \uparrow) / t$ , [мм/сут]	1,080	1,120	0,750	0,820	0,480	0,385	0,270	0,160	0,160	0,285	0,018	0,228	0,036	0,170
	затухающий характер													
Скорость горизонтальных смещений Rp 11, $(\Delta S \leftarrow) / t$ , [мм/сут]	0,050	0,260	0,500	0,390	0,710	0,027	0,326	0,032	0,032	0,524	0,250	0,247	0,068	0,514
	переменный характер													
Скорость горизонтальных смещений Rp 13, $(\Delta S \leftarrow) / t$ , [мм/сут]	2,410	1,930	1,630	1,280	1,130	0,266	0,380	0,249	0,249	0,579	0,150	0,490	0,111	0,518
	затухающий характер							переменный характер						

Таблица 3.2 – Анализ результатов геодезических наблюдений по профилю II-II

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие
	197 дн.	157 дн.	188 дн.	189 дн.	175 дн.	195 дн.	148 дн.	238 дн.	152 дн.	178 дн.	186 дн.	155 дн.	237 дн.	133 дн.
<b>Анализ величин вертикальных смещений</b>														
Осадка верхней бровки Rp21 $\Delta Z \downarrow$ , [м]	1,904	1,066	0,960	0,755	0,517	0,475	0,299	0,386	0,283	0,238	0,226	0,159	0,242	0,096
	затухающий характер													
Поднятие нижней бровки Rp22 $\Delta Z \uparrow$ , [м]	0,129	0,118	0,104	0,092	0,057	0,067	0,032	0,018	0,051	-0,016	0,012	0,025	0,000	0,021
примечание: "-" оседание	затухающий характер, с нарастанием в 9 полугодий													
Часть осадки по Rp21, обусловленная консолидацией пород $\Delta Z^{cons} \downarrow$ , [м]	1,775	0,948	0,856	0,663	0,460	0,408	0,267	0,368	0,232	0,254	0,214	0,134	0,242	0,075
	затухающий характер													
$\Delta Z^{cons} \downarrow / \Delta Z$ , %	93	89	89	88	89	86	89	95	82	100	95	84	100	78
	относительно стабильно													
$(\Delta Z - \Delta Z^{cons} \downarrow) / \Delta Z$ , %	7	11	11	12	11	14	11	5	18	0	5	16	0	22
<b>Анализ величин горизонтальных смещений</b>														
Горизонтальное смещение Rp21 $\Delta S \leftarrow$ , [м]	0,000	0,035	0,021	0,038	0,030	0,046	0,006	-0,047	-0,021	-0,031	-0,002	0,024	-0,004	0,053
	знакопеременный характер с общей тенденцией к постепенному затуханию деформационных процессов													
примечание: "-" к отвалу														
Горизонтальное смещение Rp22 $\Delta S \leftarrow$ , [м]	0,477	0,235	0,158	0,196	0,111	0,115	-0,010	-0,104	-0,050	-0,009	0,035	0,043	-0,006	0,072
	затухающий характер, с нарастанием в 12 и 14 полугодиях													
<b>Анализ скоростей развития деформаций (по модулю)</b>														
Скорость вертикальных смещений Rp21, $(\Delta Z \downarrow) / t$ , [мм/сут]	9,660	6,780	5,100	3,990	2,940	2,440	2,020	1,622	1,622	1,860	1,215	1,026	1,020	0,724
	затухающий характер													
Скорость вертикальных смещений Rp22, $(\Delta Z \uparrow) / t$ , [мм/сут]	0,650	0,750	0,550	0,490	0,320	0,340	0,216	0,076	0,076	0,333	0,065	0,160	0,001	0,156
	переменный характер													
Скорость горизонтальных смещений Rp21, $(\Delta S \leftarrow) / t$ , [мм/сут]	0,000	0,220	0,110	0,200	0,170	0,240	0,037	0,199	0,199	0,138	0,009	0,153	0,017	0,398
	переменный характер													
Скорость горизонтальных смещений Rp22, $(\Delta S \leftarrow) / t$ , [мм/сут]	2,420	1,500	0,840	1,040	0,630	0,590	0,065	0,438	0,438	0,332	0,187	0,274	0,026	0,541
	затухающий характер							переменный характер						

Таблица 3.3 – Анализ результатов геодезических наблюдений по профилю III-III

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие
	197 дн.	157 дн.	188 дн.	189 дн.	175 дн.	195 дн.	148 дн.	238 дн.	152 дн.	178 дн.	186 дн.	155 дн.	237 дн.	133 дн.
<b>Анализ величин вертикальных смещений</b>														
Осадка верхней бровки Рр31 $\Delta Z \downarrow$ , [м]	2,183	1,221	1,069	0,867	0,614	0,472	0,255	0,346	0,304	0,260	0,244	0,181	0,238	0,096
	затухающий характер													
Поднятие нижней бровки Рр32 $\Delta Z \uparrow$ , [м]	0,411	0,324	0,310	0,225	0,109	0,150	0,147	0,126	0,040	0,024	0,017	0,039	0,005	0,032
	затухающий характер, с активизацией в 12 и 14 полугодия													
Часть осадки по Рр31, обусловленная консолидацией пород $\Delta Z^{cons} \downarrow$ , [м]	1,771	0,897	0,759	0,612	0,505	0,322	0,108	0,220	0,264	0,236	0,227	0,142	0,233	0,064
	затухающий характер													
$\Delta Z^{cons} \downarrow / \Delta Z$ , %	81	74	71	70,5	82	68	42	64	87	91	93	78	98	67
	переменный характер													
$(\Delta Z - \Delta Z^{cons} \downarrow) / \Delta Z$ , %	19	27	29	29	18	32	58	36	13	9	7	22	2	33
	переменный характер													
<b>Анализ величин горизонтальных смещений</b>														
Горизонтальное смещение Рр31 $\Delta S \leftarrow$ , [м]	0,200	0,147	0,368	0,238	0,139	0,126	-0,060	-0,084	-0,073	-0,075	0,068	0,030	0,035	0,085
	знакопеременный характер с тенденцией к нарастанию в последнее полугодие													
примечание: "-" к отвалу														
Горизонтальное смещение Рр32 $\Delta S \leftarrow$ , [м]	0,537	0,397	0,360	0,434	0,263	0,228	0,003	-0,135	-0,097	-0,124	0,066	0,014	0,069	0,068
	знакопеременный характер с тенденцией к нарастанию в последний год													
<b>Анализ скоростей развития деформаций (по модулю)</b>														
Скорость вертикальных смещений Рр31, $(\Delta Z \downarrow)/t$ , [мм/сут]	11,080	7,780	5,680	4,580	3,480	2,420	1,723	1,454	1,454	2,000	1,312	1,167	1,005	0,720
	затухающий характер													
Скорость вертикальных смещений Рр32, $(\Delta Z \uparrow)/t$ , [мм/сут]	2,080	2,060	1,650	1,190	0,620	0,770	0,993	0,529	0,529	0,263	0,090	0,140	0,020	0,243
	затухающий характер										переменный характер с тенденцией к нарастанию в последнее полугодие			
Скорость горизонтальных смещений Рр31, $(\Delta S \leftarrow)/t$ , [мм/сут]	1,010	0,940	1,950	1,260	0,790	0,446	0,404	0,354	0,354	0,434	0,366	0,192	0,146	0,637
	переменный характер с тенденцией к нарастанию в последнее полугодие													
Скорость горизонтальных смещений Рр32, $(\Delta S \leftarrow)/t$ , [мм/сут]	2,720	2,520	1,910	2,290	1,490	1,170	0,023	0,566	0,566	0,592	0,356	0,132	0,290	0,512
	переменный характер с тенденцией к нарастанию в последний год													

Таблица 3.4 – Анализ результатов геодезических наблюдений по профилю IY-IY

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие
	197 дн.	157 дн.	188 дн.	189 дн.	175 дн.	195 дн.	148 дн.	238 дн.	152 дн.	178 дн.	186 дн.	155 дн.	237 дн.	133 дн.
<b>Анализ величин вертикальных смещений</b>														
Осадка верхней бровки Рр41 $\Delta Z \downarrow$ , [м]	1,584	1,073	1,055	0,811	0,491	0,531	0,425	0,417	0,315	0,272	0,279	0,174	0,273	0,123
	затухающий характер													
Поднятие нижней бровки Рр42 $\Delta Z \uparrow$ , [м]	0,634	0,386	0,284	0,263	0,265	0,153	-0,011	0,077	0,061	0,039	0,013	0,012	-0,004	0,003
	преимущественно затухающий характер													
примечание: "-" оседание														
Часть осадки по Рр41, обусловленная консолидацией пород $\Delta Z^{cons} \downarrow$ , [м]	0,950	0,687	0,771	0,548	0,226	0,378	0,436	0,340	0,254	0,233	0,266	0,162	0,277	0,120
	общая тенденция к затуханию													
$\Delta Z^{cons} \downarrow / \Delta Z$ , %	60	64	73	68	46	71	100	82	81	86	95	93	100	98
	переменный характер													
$(\Delta Z - \Delta Z^{cons} \downarrow) / \Delta Z$ , %	40	36	27	32	54	29	0	18	19	14	5	7	0	2
<b>Анализ величин горизонтальных смещений</b>														
Горизонтальное смещение Рр41 $\Delta S \leftarrow$ , [м]	0,317	0,324	-0,040	0,202	0,183	0,151	-0,020	-0,156	-0,116	-0,105	0,067	0,116	0,045	0,079
	знакопеременный характер с активизацией на последнее полугодие													
примечание: "-" к отвалу														
Горизонтальное смещение Рр42 $\Delta S \leftarrow$ , [м]	0,722	0,534	0,210	0,369	0,301	0,226	0,046	-0,201	-0,184	-0,121	0,103	0,130	0,071	0,081
	знакопеременный характер с активизацией в последнее полугодие													
<b>Анализ скоростей развития деформаций (по модулю)</b>														
Скорость вертикальных смещений Рр41, $(\Delta Z \downarrow)/t$ , [мм/сут]	8,040	6,830	5,610	4,290	2,790	2,720	2,872	1,752	1,752	2,072	1,498	1,125	1,150	0,928
	затухающий характер													
Скорость вертикальных смещений Рр42, $(\Delta Z \uparrow)/t$ , [мм/сут]	3,210	2,440	1,510	1,390	1,500	0,785	0,074	0,324	0,324	0,399	0,071	0,076	0,016	0,021
	в основном затухающий характер													
Скорость горизонтальных смещений Рр41, $(\Delta S \leftarrow)/t$ , [мм/сут]	1,610	2,060	0,000	1,060	1,040	0,875	0,135	0,657	0,657	0,769	0,359	0,747	0,189	0,596
	переменный характер с активизацией в последнее полугодие													
Скорость горизонтальных смещений Рр42, $(\Delta S \leftarrow)/t$ , [мм/сут]	3,660	3,400	1,110	1,950	1,710	1,161	0,313	0,845	0,845	1,210	0,554	0,837	0,299	0,606
	переменный характер с общей тенденцией к затуханию							переменный характер с активизацией в последнее полугодие						

Таблица 3.5 – Анализ результатов геодезических наблюдений по профилю У-У

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие
	197 дн.	157 дн.	188 дн.	189 дн.	175 дн.	195 дн.	148 дн.	238 дн.	152 дн.	178 дн.	186 дн.	155 дн.	237 дн.	133 дн.
<b>Анализ величин вертикальных смещений</b>														
Осадка верхней бровки Rp51 $\Delta Z \downarrow$ , [м]	1,233	0,877	0,860	0,635	0,427	0,380	0,242	0,325	0,233	0,180	0,214	0,125	0,202	0,080
	затухающий характер													
Поднятие нижней бровки Rp52/54 $\Delta Z \uparrow$ , [м]	0,185	0,133	0,012	0,065	0,057	-	-0,005	-0,003	-0,011	0,001	0,011	0,001	-0,005	-0,001
	преимущественно затухающий характер													
примечание: "-" оседание														
Часть осадки по Rp51, обусловленная консолидацией пород $\Delta Z^{cons} \downarrow$ , [м]	1,048	0,744	0,848	0,570	0,370	-	0,247	0,328	0,244	0,179	0,203	0,124	0,207	0,081
	общая тенденция к затуханию													
$\Delta Z^{cons} \downarrow / \Delta Z$ , %	85	85	99	90	87	-	100	100	100	99	95	99	100	100
	относительно стабильно													
$(\Delta Z - \Delta Z^{cons} \downarrow) / \Delta Z$ , %	15	15	1	10	13	-	0	0	0	1	5	1	0	0
<b>Анализ величин горизонтальных смещений</b>														
Горизонтальное смещение Rp51 $\Delta S \leftarrow$ , [м]	-0,160	0,022	-0,004	-0,058	0,068	0,031	0,138	-0,099	-0,039	-0,020	0,024	0,052	0,010	0,062
	знакопеременный характер, с нарастанием в последнее полугодие													
примечание: "-" к отвалу														
Горизонтальное смещение Rp52/54 $\Delta S \leftarrow$ , [м]	-0,397	0,188	0,083	-0,150	0,080	-	0,015	-0,001	-0,013	0,032	0,021	0,004	-0,008	0,010
	знакопеременный характер с общей тенденцией к затуханию													
<b>Анализ скоростей развития деформаций (по модулю)</b>														
Скорость вертикальных смещений Rp51, $(\Delta Z \downarrow)/t$ , [мм/сут]	6,250	5,590	4,570	3,360	2,430	1,950	1,635	1,366	1,366	1,534	1,150	0,807	0,851	0,603
	затухающий характер													
Скорость вертикальных смещений Rp52/54, $(\Delta Z \uparrow)/t$ , [мм/сут]	0,940	0,850	0,060	0,340	0,320	-	0,034	0,013	0,013	0,031	0,059	0,006	0,027	0,011
	затухающий характер													
Скорость горизонтальных смещений Rp51, $(\Delta S \leftarrow)/t$ , [мм/сут]	0,810	0,140	0,020	0,300	0,390	0,160	0,931	0,415	0,415	0,257	0,129	0,338	0,043	0,470
	в основном затухающий характер, с нарастанием в последнее полугодие													
Скорость горизонтальных смещений Rp52/54, $(\Delta S \leftarrow)/t$ , [мм/сут]	2,010	1,190	0,440	0,790	0,450	-	0,103	0,005	0,005	0,042	0,114	0,027	0,034	0,077
	в основном затухающий характер													

Таблица 3.6 – Анализ результатов геодезических наблюдений по профилю У1-У1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие	полугодие
	197 дн.	157 дн.	188 дн.	189 дн.	175 дн.	195 дн.	148 дн.	238 дн.	152 дн.	178 дн.	186 дн.	155 дн.	237 дн.	133 дн.
<b>Анализ величин вертикальных смещений</b>														
Осадка верхней бровки Рр61 $\Delta Z \downarrow$ , [м]	1,243	0,899	0,889	0,575	0,463	0,369	0,250	0,317	0,221	0,183	0,211	0,124	0,193	0,076
	затухающий характер													
Поднятие нижней бровки Рр62/64 $\Delta Z \uparrow$ , [м]	0,173	0,088	-0,027	0,107	0,015	-	-0,009	-0,002	0,005	-0,008	0,013	-0,008	0,007	0,001
примечание: "-" оседание	затухающий характер													
Часть осадки по Рр61, обусловленная консолидацией пород $\Delta Z^{cons} \downarrow$ , [м]	1,070	0,811	-	0,468	0,448	-	0,259	0,319	0,216	0,191	0,198	0,132	0,186	0,075
	общая тенденция к затуханию													
$\Delta Z^{cons} \downarrow / \Delta Z$ , %	86	90	-	81	97	-	100	100	98	100	94	100	96	99
	относительно стабильно													
$(\Delta Z - \Delta Z^{cons} \downarrow) / \Delta Z$ , %	14	10	-	19	3	-	0	0	2	0	6	0	4	1
<b>Анализ величин горизонтальных смещений</b>														
Горизонтальное смещение Рр61 $\Delta S \leftarrow$ , [м]	0,173	-0,006	0,085	-0,081	-0,005	0,079	0,032	-0,088	-0,032	-0,004	0,046	0,062	-0,035	0,072
	знакопеременный характер с общей тенденцией к постепенному затуханию деформационных процессов													
примечание: "-" к отвалу														
Горизонтальное смещение Рр62/64 $\Delta S \leftarrow$ , [м]	0,436	0,198	0,069	0,149	-0,096	-	0,022	0,002	0,000	-0,003	-0,002	0,005	0,003	0,014
	в основном затухающий характер													
<b>Анализ скоростей развития деформаций (по модулю)</b>														
Скорость вертикальных смещений Рр61, $(\Delta Z \downarrow)/t$ , [мм/сут]	6,300	5,720	4,730	3,040	2,630	1,890	1,689	1,332	1,332	1,453	1,134	0,800	0,815	0,571
	затухающий характер													
Скорость вертикальных смещений Рр62/64, $(\Delta Z \uparrow)/t$ , [мм/сут]	0,880	0,560	0,140	0,570	0,080	-	0,061	0,008	0,008	0,031	0,068	0,050	0,028	0,010
	затухающий характер													
Скорость горизонтальных смещений Рр61, $(\Delta S \leftarrow)/t$ , [мм/сут]	0,880	0,040	0,450	0,430	0,030	0,410	0,216	0,369	0,369	0,213	0,249	0,399	0,146	0,539
	переменный характер с нарастанием в последнее полугодие													
Скорость горизонтальных смещений Рр62/64, $(\Delta S \leftarrow)/t$ , [мм/сут]	2,210	1,260	0,370	0,790	0,540	-	0,151	0,009	0,009	0,002	0,012	0,032	0,011	0,109
	в основном затухающий характер с нарастанием в последнее полугодие													

### 3.2 Закономерности развития деформаций уплотнения техногенных пород в ходе ведения отвальных работ

Осадки насыпных массивов – явление очевидное и прогнозируемое, но на отвалах фосфогипса они носят чрезмерный характер. Еще до организации мониторинга было замечено, что после отсыпки первого яруса высотой 15 м его поверхность за 2,5 года осела на 60 см (скорость оседания 24 см/год). При высоте

отвального яруса 40 м (до образования оползней) вертикальные смещения в приоткосной зоне интенсифицировались до 160 см/год (4,4 мм/сут). В период активного развития оползневых процессов максимальная величина скорости вертикальных смещений верхней бровки откоса достигла 11,1 мм/сут (таблица 3.3). В последующие годы они снизились до величин порядка 1,0-1,5 мм/сут. На данный момент (конец 2017 г.) и вовсе составляют менее 1,0 мм/сут. Снижение связано не только со стабилизацией оползней, но и с прекращением наращивания высоты отвала. В целом за весь период инструментальных наблюдений (2010-2017 гг.) величины осадок поверхности отвала в приоткосной зоне составили от 6,6 до 8,9 м.

Для прогнозирования величины осадок поверхности отвала в процессе повышения его высоты выполнялось изучение сжимаемости фосфогипса в лаборатории и определение деформационных характеристик в массиве посредством прессиометрических испытаний [8, 107]. Установлено, что фосфогипс является весьма пористым материалом, с начальным коэффициентом пористости, достигающим значений  $e=1,7$ . Высокая пористость предопределяет повышенную сжимаемость фосфогипса при воздействии на него внешних нагрузок. Определение деформационных характеристик фосфогипса – коэффициента сжимаемости ( $a$ ) и модуля деформации ( $E_0$ ) в натуральных (прессиометрические) и лабораторных (компрессионные) условиях показали результаты, существенно различающиеся между собой.

Испытания фосфогипса в лаборатории на образцах-моделях, приготовленных из отходов производства различного состава (дигидрата и полугидрата сульфата кальция) и выдержанных в течение более 30 суток – времени, достаточного для формирования в них жестких структурных связей (самоцементации) и завершения перекристаллизации полугидрата в дигидрат показали следующие результаты. На компрессионной ветви нагружения в интервале нагрузок от 0 до 0,15 МПа кривые полугидрата и дигидрата близки между собой. Они различаются по начальному коэффициенту пористости, так как естественная влажность дигидрата больше, чем полугидрата. На компрессионных

кривых отмечаются участки с незначительным изменением пористости, что свидетельствуют о наличии структурной прочности в данных породах, при достижении которой сформировавшийся структурный скелет породы разрушается, и кривая резко идет вниз. Компрессионными опытами установлено значения структурной прочности для дигидрата и полугидрата, соответственно равны:  $P_{стр}=0,15$  МПа и  $P_{стр}=0,30$  МПа (рисунок 3.20) [96]. Полугидрат имеет значение  $P_{стр}$  в два раза больше, это связано с образованием кристаллизационных структур за счет взаимного срастания кристаллов, в результате чего повышается прочность сцепления частиц и кристаллов между собой.

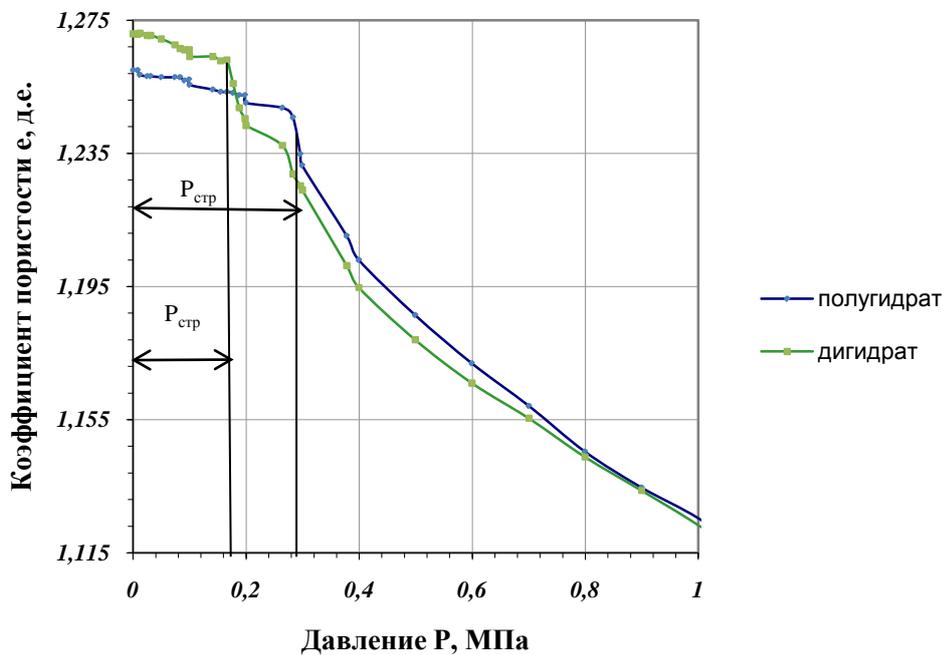


Рисунок 3.20 – Прямая ветвь компрессионной кривой фосфогипса (дигидрата сульфата кальция) и фосфополугидрата (полугидрата сульфата кальция), выдержанных до испытаний в течение более 30 суток [96]

Значения деформационных параметров, полученных для серии образцов фосфогипса различного состава, составляли: коэффициент сжимаемости  $a=0,09-0,14$  МПа<sup>-1</sup> и модуль деформации  $E_0=25,6-32,5$  МПа. При этом различия в деформационном поведении и количественных характеристиках сжимаемости для фосфогипса различного состава не выявлено.

Изучение деформационных свойств фосфогипса проводилось также на образцах, отобранных непосредственно из тела отвала при бурении скважин с различной глубиной. Все образцы характеризовались нарушенным сложением, т.к. отобрать монолит фосфогипса ненарушенного сложения из массива невозможно ввиду его хрупкости и разрушения при механическом воздействии бурового снаряда. Результаты испытаний показали, что фосфогипс нарушенного сложения начинает уплотняться практически сразу после приложения незначительной нагрузки, структурной прочностью не обладает. Незначительный нелинейный характер поведения фосфогипса при уплотнении наблюдается при величинах давления от 0 до 0,4 МПа. В дальнейшем кривая выполаживается и принимает линейный характер (рисунок 3.21).

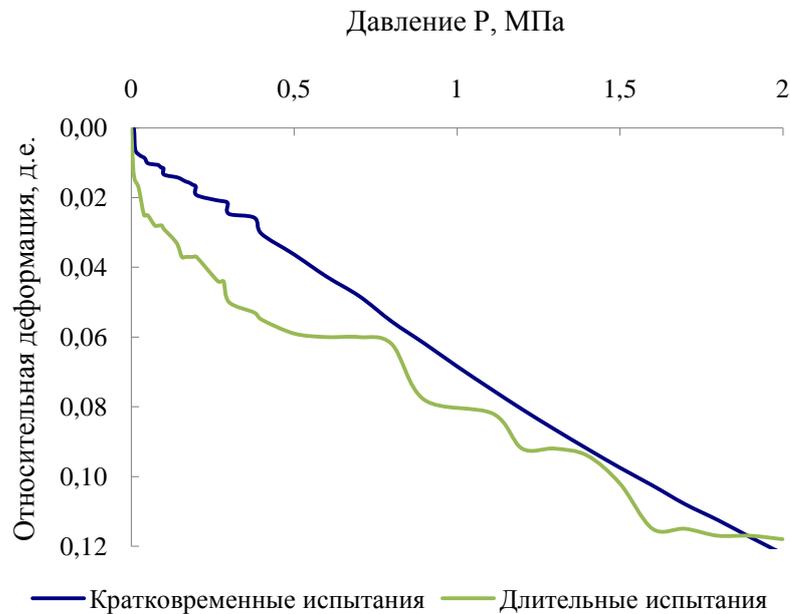


Рисунок 3.21 – Результаты компрессионных испытаний фосфогипса

Модуль деформации, полученный по компрессионной кривой, составляет примерно 16,5 МПа во всем диапазоне уплотняющих давлений (P) от 0,4 до 2,0 МПа. Данное значение отличается от приведенных выше результатов испытаний образцов, приготовленных из отходов, но не значительно. В целом в лаборатории получают значения модуля деформации одного порядка от 15 до 35 МПа.

Расчеты деформаций уплотнения отвала с использованием полученных величин модуля деформации дают заниженные осадки поверхности отвала в

сравнении с наблюдаемыми по факту. Это свидетельствует о том, что уплотнение фосфогипса в массиве во многом обусловлено развитием реологических процессов. Именно таким материалом является фосфогипс, который при длительно действующей нагрузке испытывает дополнительные деформации уплотнения. Об этом свидетельствует отличие между компрессионными кривыми, представленными на рисунке 3.21.

Длительные испытания фосфогипса с выдерживанием каждой ступени нагрузки не менее недели показали, что сжимаемость фосфогипса изменяется нелинейно с ростом напряжений. Особенно она велика в диапазоне вертикальных напряжений от 0,1 до 0,4 МПа, для которого характерно изменение модуля деформации от 2 МПа до 7 МПа, а с ростом сжимающих напряжений до 2 МПа модуль деформации приближается к параметру, полученному при стандартных испытаниях.

Результаты исследования деформационного поведения фосфогипса дают основание полагать, что большие осадки имеют повсеместное распространение на поверхности и откосах отвала, сопровождая его формирование на всех этапах наращивания, и не прекращаются еще длительное время после завершения эксплуатации сооружения. Оценка величин деформаций уплотнения отвала фосфогипса была получена посредством моделирования изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) насыпных грунтов по мере увеличения их мощности от момента начала отсыпки отвала до интересующего этапа наращивания. При этом нелинейный характер зависимости «напряжения-деформации» может быть учтен посредством дифференцированного задания деформационных характеристик насыпного фосфогипса в зависимости от действующего вертикального давления. Исходя из отмеченных предпосылок, применительно к инженерно-геологическим условиям исследуемого объекта был выполнен численный эксперимент, моделирующий изменение НДС отвала в процессе его возведения от 0 до 100 м [96].

Геомеханическая задача решена в плоской деформационной постановке с использованием метода конечных элементов с использованием средств

программного комплекса ABAQUS (моделирование выполнил д.т.н. М.А. Карасев). Фосфогипс рассматривается как пористая среда, уплотняемость которой реализуется за счет разрушения структурных связей и уменьшения объема порового пространства. Для описания поведения фосфогипса при напряжениях ниже структурной прочности принята модель линейно-деформируемой среды; с момента начала деформаций – упругопластическая шатровая модель с объемным упрочнением, пески – как упругая идеально-пластическая среда.

В качестве деформационных параметров модели были использованы результаты длительных испытаний фосфогипса, аппроксимированные гладкой зависимостью (рисунок 3.22).

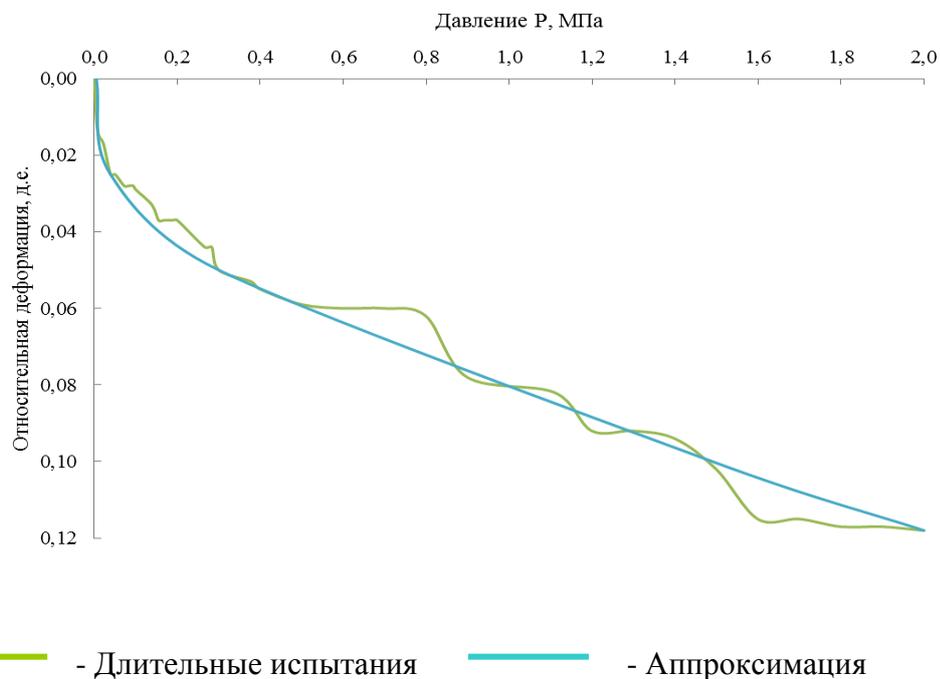


Рисунок 3.22 – Аппроксимирующая кривая результатов компрессионных испытаний фосфогипса

Обоснование расчетных деформационных параметров грунтов основания было выполнено на основании компрессионных исследований. Зависимости, полученные по результатам этих опытов, показывают, что в диапазоне напряжений от 0 до 1,0 МПа уплотнение обеих разновидностей глинистых грунтов (ИГЭ 2 и ИГЭ 3) носит линейный характер, что дает основание

охарактеризовать их постоянным модулем деформации, приняв  $E_0=15$  МПа для делювиальных суглинков и  $E_0=11$  МПа для шоколадных глин.

Результаты численного эксперимента показали, что величина деформаций оседания поверхности отвала вследствие гравитационного уплотнения фосфогипса может достигать очень больших значений (чрезмерных). При высоте отвала 50 м расчетная величина вертикальных смещений, исчисляемых от начала отвалообразования, составила 9,2 м, при высоте 70 м – 21,7 м, при 85 м – 27,2 м и при 100 м – 32,4 м (рисунок 3.23-3.26). Нарастивание отвала сопровождается повышением степени уплотнения техногенного массива: при высоте отвала 50 м под действием сил тяжести тело отвала по данным расчетов уменьшается в объеме на 18,4 %, а при высоте 100 м его объем изменится уже на 33,3 % (рисунок 3.27). Уплотнение фосфогипса неизбежно сопровождается увеличением его плотности. Так, при малых уплотняющих напряжениях в массиве отвала при отсыпке фосфогипса на его поверхности плотность материала характеризуется обычно невысокими значениями, составляющими  $1,4\div 1,5$  т/м<sup>3</sup>. Дальнейшее возрастание нормальных нагрузок в массиве при наращивании сооружения до 40-50 метров приводит к уплотнению фосфогипса и увеличению его плотности до 1,7 т/м<sup>3</sup>. При достижении высоты отвала 100 метров плотность фосфогипса может увеличиться до  $2,0\div 2,2$  т/м<sup>3</sup>.

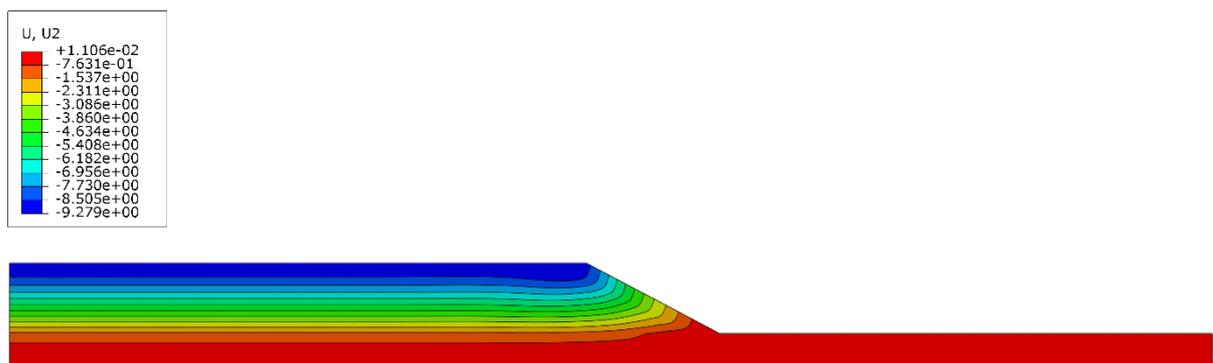


Рисунок 3.23 – Вертикальные абсолютные деформации (м) отвала фосфогипса при высоте отвала 50 м

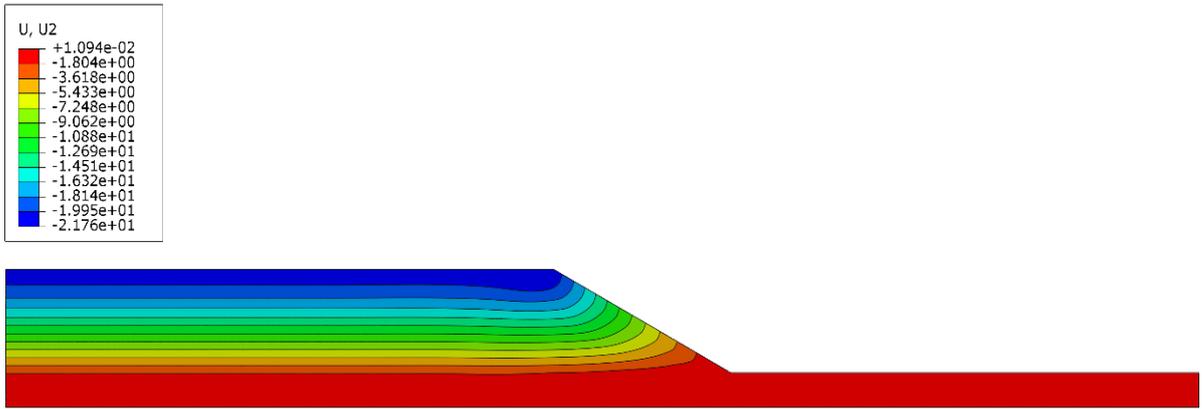


Рисунок 3.24 – Вертикальные абсолютные деформации (м) отвала фосфогипса при высоте отвала 70 м

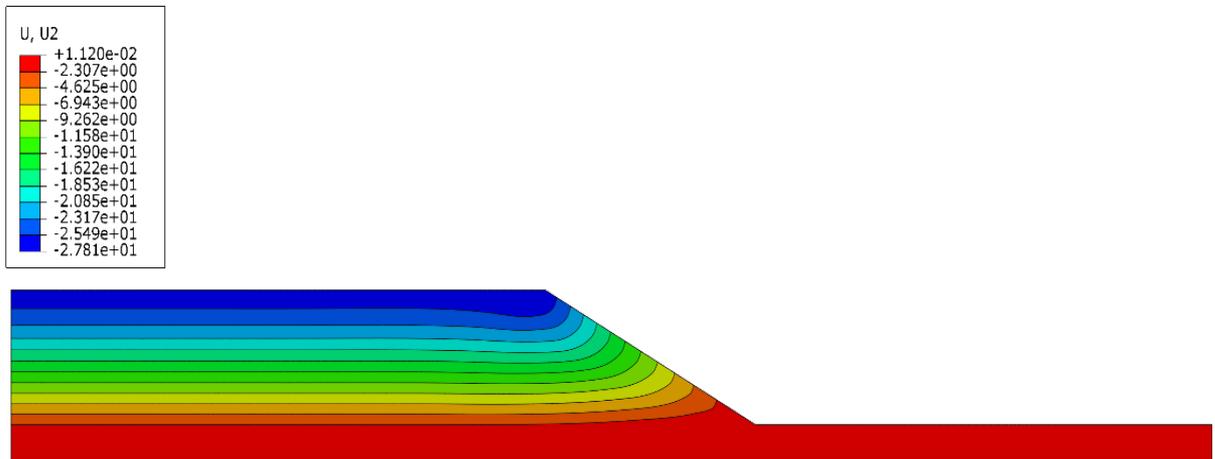


Рисунок 3.25 – Вертикальные абсолютные деформации (м) отвала фосфогипса при высоте отвала 85 м

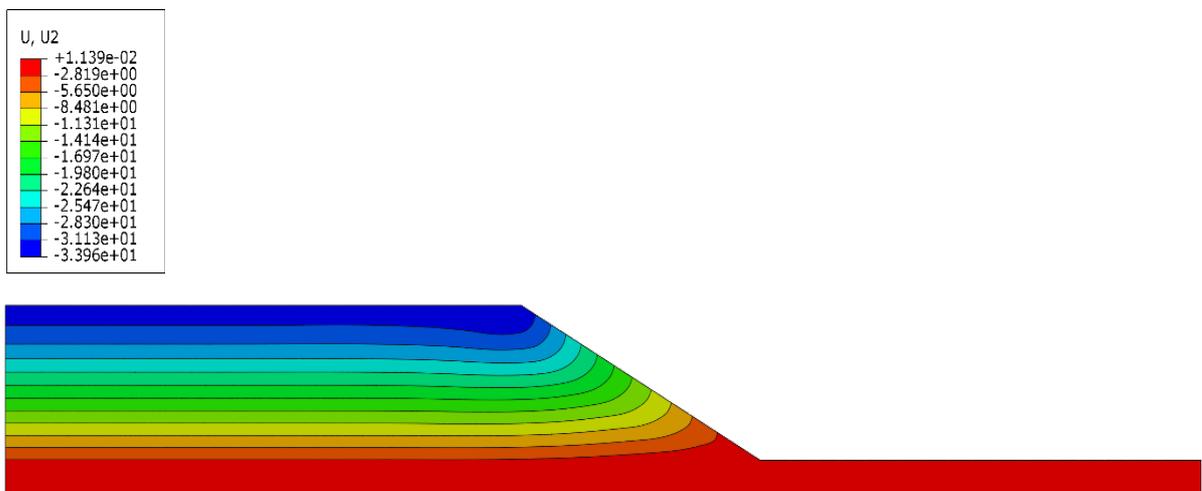


Рисунок 3.26 – Вертикальные абсолютные деформации (м) отвала фосфогипса при высоте отвала 100 м



Рисунок 3.27 – Зависимость изменения объема тела отвала от его высоты

Таким образом, установленные натурными измерениями чрезмерные осадки отвала следует рассматривать как закономерное явление, неизбежное в силу специфики складироваемого материала, характеризующегося высокой пористостью и сильной сжимаемостью.

### **3.3 Закономерности развития оползневых процессов, оказывающих влияние на безопасность отвальных работ**

За период эксплуатации 35 лет (до 2009 г.) оползневых деформаций на отвале не наблюдалось. В течение этого времени высота отвала в центре выросла до 50 м, а высота откосов на внешнем контуре отвала достигла 40 м. Откосы находились в устойчивом состоянии. Попытки увеличить высоту отвала на внешнем контуре от 40 до 50 м повлекли интенсификацию горизонтальных смещений на внешних откосах – подъем прилегающей к отвалу земной поверхности и деформации лотков (рисунок 3.28), заболачивание территории между нижней бровкой отвала и трассой водоотводящих лотков (рисунок 3.29), распространившееся на отдельных участках вплоть до насыпи, под которой сооружена противофильтрационная завеса («стена в грунте»). Со временем на участках активного ведения работ протяженностью 120 м деформации переросли в оползневые деформации подпошвенного типа (рисунок 3.30).



Рисунок 3.28 – Деформации водоотводящих лотков



Рисунок 3.29 – Заболачивание территории, прилегающей к нижней бровке отвала



Рисунок 3.30 – Развитие оползней подпошвенного типа с образованием вала выпирания

Анализ результатов измерений (таблицы 3.1-3.6) смещений верхних и нижних реперов за весь период наблюдений позволит установить механизм

нарушения устойчивости откосов отвала и закономерности развития деформационных процессов во времени.

Фиксируемые оседания верхней бровки откосов в сопровождении с образованием валов выпирания у нижней бровки являются признаками нарушения устойчивости отвала по типу подподошвенных оползней. Судя по локализации вала выпирания непосредственно у нижней бровки откоса, поверхность скольжения локализуется в верхнем слое делювиальных суглинков, а глубина захвата пород основания не превышает 1-2 м.

Однако можно заметить некоторые несоответствия типичному проявлению подподошвенных оползней, описанных в специальной литературе [67, 84, 124]. Обращают на себя внимание чрезмерные осадки верхней бровки и неадекватные им по величинам максимальные вертикальные поднятия поверхности у нижней бровки, т.е. гребня валов выпирания. В северо-восточной зоне с наиболее активным проявлением деформаций, разница между осадкой верхнего репера  $\Delta Z\downarrow$  и поднятием нижнего репера  $\Delta Z\uparrow$  достигает более 5 м (за первые 2,5 года наблюдений). Причем, ни в одном полугодии не отмечается резкого сокращения между  $\Delta Z\downarrow$  и  $\Delta Z\uparrow$ , что бы свидетельствовало о проявлении подподошвенного оползня в своей активной стадии (стадии основного смещения). Если рассмотреть характер изменения вертикальных смещений во времени (по полугодиям), то по каждому створу можно заметить тенденцию снижения (затухания) величины осадки верхнего репера и соответствующую тенденцию уменьшения разницы между  $\Delta Z\downarrow$  и  $\Delta Z\uparrow$ .

Отмеченные закономерности говорят о том, что большая часть наблюдаемых чрезмерных осадок верхней площадки отвала, вызвана консолидацией (усадкой, уплотнением) отсыпаемых фосфогипсов под действием собственного веса и физико-химических преобразований. В количественном выражении часть осадки, обусловленную консолидацией фосфогипсов  $\Delta Z^{\text{cons}}\downarrow$ , можно рассчитать как разность между  $\Delta Z\downarrow$  и  $\Delta Z\uparrow$ . Оставшаяся часть ( $\Delta Z - \Delta Z^{\text{cons}}\downarrow$ ) обусловлена проявлением оползневых смещений, соответственно, чем она выше, тем более активно выражены на откосе оползневые смещения.

По соотношению  $(\Delta Z - \Delta Z^{\text{cons}}) / \Delta Z$ , выраженному в %, наблюдаемые профильные створы можно ранжировать в следующем порядке:

Профиль III-III – высокая оползневая активность в течение всего периода наблюдений (18-36%); с наивысшей интенсификацией в 7-м полугодии (58%); с затуханием до апреля 2016 г. (7%); далее нарастание (до 33%) (таблица 3.3).

Профиль IV-IV – высокая оползневая активность в течение всего периода наблюдений (18-40%) с интенсификацией в 2013 г. (54%); к настоящему моменту затухание (таблица 3.4).

Профиль I-I – умеренная оползневая активность (9-19%) с полным затуханием к апрелю 2016 г.; с сентября 2016 г. до последней серии наблюдений в пределах умеренной, но скачкообразно (3-23%) (таблица 3.1).

Профиль II-II – умеренная оползневая активность (5-18%) с полным затуханием к октябрю 2015 г.; с апреля 2016 г. до последней серии наблюдений в пределах умеренной, но скачкообразно (0-22%) (таблица 3.2).

Профиль VI-VI – умеренная оползневая активность в течение всего периода наблюдений (3-19%) с затуханием к настоящему моменту (таблица 3.6).

Профиль V-V – низкая оползневая активность в течение всего периода наблюдений (1-15%) с полным затуханием к настоящему моменту (таблица 3.5).

Совместный анализ величин  $(\Delta S \leftarrow)$  и скоростей развития горизонтальных смещений  $V(\Delta S \leftarrow)$  верхних и нижних реперов позволяет судить о механизме проявления оползневых деформаций. Так, синхронный и однонаправленный (к отвалу или от отвала) характер изменения во времени величин  $(\Delta S \leftarrow)$  и скоростей  $V(\Delta S \leftarrow)$  свидетельствует о развитии подподошвенного оползня по типичному для него механизму, а именно: смещению отчленившегося оползневого тела по поверхности скольжения, проходящей в породах основания с одновременным выпиранием в виде вала пород основания. При этом рост высоты вала у нижней бровки и развитие горизонтальных смещений верхней бровки должны совпадать по времени и интенсивности проявления.

Несовпадение по времени и интенсивности развития горизонтальных смещений в верхней и нижней частях откоса отвала с явным превалированием

смещений поверхности у низового откоса свидетельствует о проявлении оползней оседания, связанных с выдавливанием «слабого» основания из-под отвала. Выдавливание может быть обусловлено постепенным нарушением естественной структуры глинистого основания под воздействием возрастающих сдвиговых нагрузок, увеличением их влажности за счет впитывания фильтрационных вод техногенного водоносного горизонта, и, как следствие, снижением их сопротивления сдвигу. Механизму проявления типичных подпошвенных оползней более всего отвечает характер развития деформаций в профилях IY-IY и III-III. По остальным профилям характер развития деформаций более соответствует оползням выдавливания.

Для дальнейшего обеспечения безопасных условий формирования отвала важно установить причины образования деформаций, механизм нарушения устойчивости откосов отвала и закономерности развития деформационных процессов.

Геодезическими измерениями было установлено, что при высоте 40 м углы внешних откосов составляют 27-28°. Ранее при высоте 15-25 м откосы находились в устойчивом состоянии при углах 32°-40°. Следовательно, повышение высоты отвала сопровождается самопроизвольным выполаживанием откосов, вызванным развитием процессов ползучести в толще глинистых пород, залегающих в основании сооружения. Развитие процессов ползучести сопровождается разрушением структуры грунтов, снижением их прочности, повышением водопроницаемости.

Важным является факт, что активному развитию оползней предшествует появление воды у нижней бровки отвала с последующим затоплением всего промежутка земной поверхности от откоса отвала до места расположения противофильтрационной завесы. Источником подтопления могут быть только воды техногенного водоносного горизонта, т.к. для перехвата поверхностных вод служит система водоотводящих сооружений (лотков), которая на протяжении десятилетий эффективно выполняла свои функции.

Анализ результатов численного эксперимента по моделированию НДС пород отвала и его основания с учетом повышения уровня техногенного водоносного горизонта, позволил установить, что при достижении высоты откоса 40 м в грунтах основания формируется локальная зона, в которой градиенты фильтрации превышают критические значения (0,8), определяющие фильтрационную прочность делювиальных суглинков (рисунок 3.31). Зона локализуется в верхнем слое делювиальных суглинков, наиболее водопроницаемом ( $k_f < 10^{-3}$  м/сут) относительно ниже лежащих шоколадных глин, являющихся региональным водоупором ( $k_f < 10^{-5}$  м/сут).

В этой зоне под воздействием гидродинамического давления происходит частичное разрушение структуры делювиальных суглинков (нарушение фильтрационной прочности), в результате чего их несущая способность снижается, и они отдавливаются из-под отвала. Развитие сдвиговых смещений сопровождается также структурными нарушениями в кровле слоя шоколадных глин, что обеспечивает возможность их набухания за счет дополнительного впитывания фильтрационных вод с соответствующим снижением характеристик сопротивления сдвигу. Так в толще основания отвала формируется выраженная поверхность ослабления – это контакт между слоем суглинков и глин, по которому происходит оползневое смещение с образованием вала выпирания.

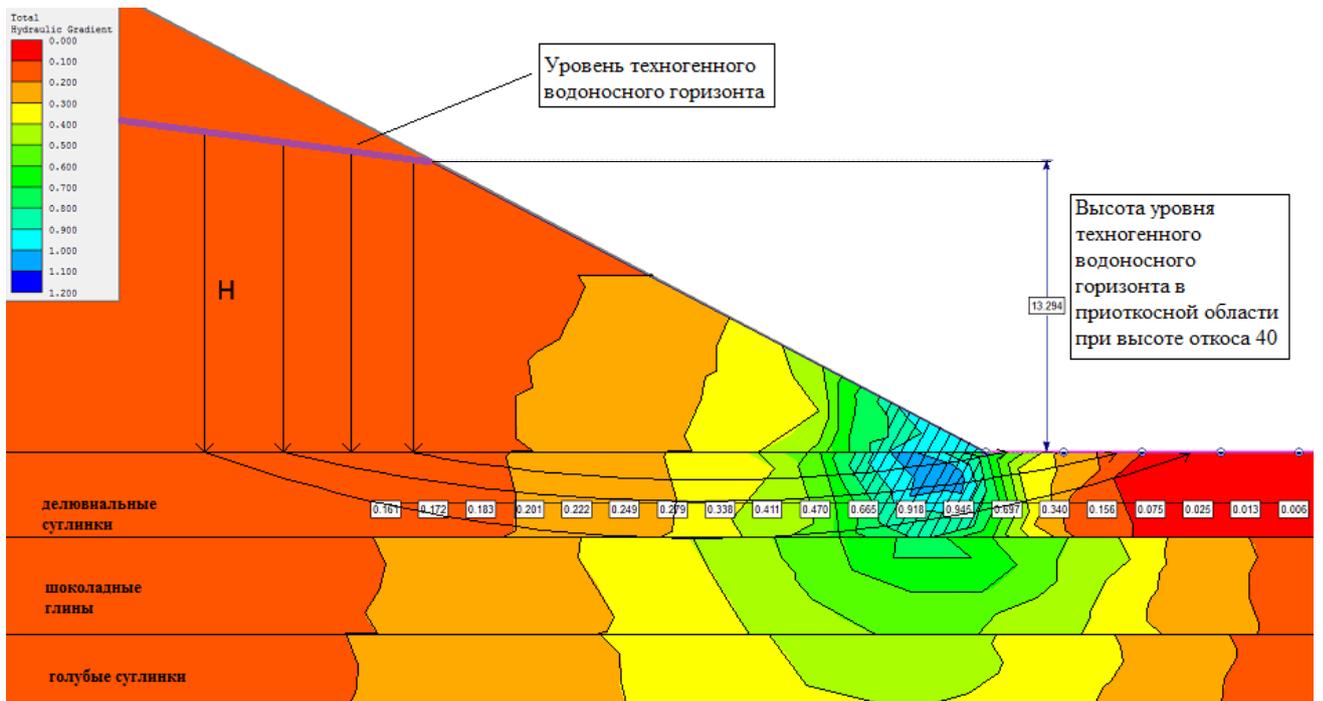


Рисунок 3.31 – Численное моделирование НДС пород отвала и его основания с учетом повышения уровня техногенного водоносного горизонта

Специфика организации мониторинга устойчивости отвала состоит в том, что оползневые процессы на ранних стадиях трудно определяемы даже инструментальными методами ввиду того, что регистрируемые деформации уплотнения исчисляются величинами на порядок и более превышающими оползневые смещения до тех пор, пока не появляются признаки развития деструктивных процессов. В этой связи важным результатом исследований являются установленные признаки развития оползневых процессов и количественные показатели динамики их развития на разных стадиях:

*1 стадия (подготовительная)* – нарушение структуры слоя делювиальных суглинков, сопровождающееся выходом фильтрационных вод на дневную поверхность. Визуальным признаком является заболачивание участка земли между нижней бровкой отвала и ПФЗ. Инструментально фиксируются преимущественно вертикальные смещения верхней бровки с интенсивностью  $2,5 \div 6,5$  мм/сут, обусловленные уплотнением насыпных пород; деформации основания у нижней бровки отвала – в пределах точности измерений. Технологические условия проявления – высота отвального яруса менее 40 м.

*2 стадия (начальная)* – оседание откоса отвального яруса без разрыва сплошности насыпного массива, обусловленное выдавливанием грунтов основания. Визуальные признаки – подъем поверхности основания у нижней бровки отвала, деформации изгиба стенок дренажной канавы. Инструментально фиксируются как вертикальные осадки верхней бровки с интенсивностью 3-10 мм/сут, так и поднятия нижней бровки со скоростью 0,1-1,0 мм/сут; вертикальные смещения нижней бровки не превышают 10-30% от смещений верхней бровки; на участке за ПФЗ – деформаций нет. Диагностическим признаком является нарастающий характер горизонтальных смещений нижней бровки в сторону от отвала с интенсивностью от 0,3 до 2,0 мм/сут при слабо выраженном нарастании скоростей горизонтальных смещений верхней бровки 0,04-1,0 мм/сут. Высота отвального яруса 40-45 м.

*3 стадия (активная)* – развитие оползней подподошвенного типа с образованием вала выпирания (рисунок 3.30). Визуальные признаки – нарушение устойчивости откоса отвала с отчленением оползневого тела, обнажение разреза четвертичных грунтов в вале выпирания, разрушение дренажной канавы. Инструментально фиксируются вертикальные осадки верхней бровки с интенсивностью 3-11 мм/сут, поднятия нижней бровки со скоростью 1,2-3,5 мм/сут; вертикальные смещения нижней бровки составляют более 50% от осадки верхней бровки. Диагностическим признаком является синхронное возрастание горизонтальных смещений верхней и нижней бровок до скорости 1,5-3,7 мм/сут. Высота отвального яруса выше 45 м.

Во избежание дальнейшей интенсификации оползней отвальные работы в 2010 году были перенесены вглубь отвала на значительное расстояние от внешних откосов, а затем – на новые сопредельные территории, так называемые прирезки. Геодезические наблюдения, выполнявшиеся на протяжении последующих 7 лет, свидетельствуют о весьма длительном характере затухания деформаций на стадии стабилизации оползневых процессов. Наблюдаемые на сегодняшний день деформации откосов отвала характеризуют *затухающую стадию* развития оползневого процесса. В результате развития деформационных

процессов произошло выполаживание углов откосов отвала; по данным последних геодезических измерений (2017 г.) они уменьшились до  $16\div 23^0$ .

По состоянию на осень 2017 года на охваченном инструментальными измерениями участке продолжают фиксироваться существенные по величине осадки поверхности отвала, связанные с уплотнением техногенных пород (фосфогипса). Интенсивность развития вертикальных деформаций имеет в целом затухающий во времени характер: если в начальный период наблюдений (2010 г.) скорость оседаний реперов достигала 11 мм/сут, то по истечению 7 лет интенсивность вертикальных смещений на порядок меньше и составляет  $0,9\div 1,35$  мм/сут.

Скорости горизонтальных смещений нижней бровки откосов не превышают  $0,5\div 0,6$  мм/сут; в сопоставлении с максимальной скоростью горизонтальных деформаций ( $2,5\div 3,7$  мм/сут), наблюдавшейся в период активного развития типичных оползневых смещений (01.11.2010–17.05.2011). Измеряемые в настоящее время сдвиговые смещения не расцениваются как типичные оползневые процессы, хотя состояние откосов по-прежнему нельзя считать стабильным. На охваченных наблюдениями откосах повсеместно фиксируются медленные горизонтальные смещения, направленные в сторону по падению откосов. По характеру изменения величин и скоростей горизонтальных смещений по высоте откосов (увеличение сверху вниз) можно сказать, что сдвиговые деформации сегодня вызваны ползучестью верхнего слоя четвертичных глинистых грунтов, залегающего в основании приоткосной части отвала.

### **3.4 Выводы по главе 3**

1. Изучение деформационных процессов на отвале БФ АО «Апатит» производилось на основании результатов инструментальных геодезических наблюдений по 8 реперным линиям, заложенным на участке развития оползневых деформаций, а также посредством интерпретации данных лазерной сканирующей съемки откосов и поверхности всего отвала.

2. Анализ результатов мониторинга показывает, что деформации поверхности и откосов отвала фосфогипса обусловлены одновременным развитием двух геодинамических процессов: осадками, обусловленными уплотнением фосфогипса в массиве, и оползневыми смещениями, распространенными на откосах первого яруса высотой свыше 40 м.

3. Осадки отвала фосфогипса проявляются повсеместно и непрерывно, поэтому их следует рассматривать как закономерное явление, неизбежное в силу специфики складированного материала, характеризующегося низкой структурной прочностью, высокой пористостью и сильной сжимаемостью. Они не влияют на безопасность горных работ, а, наоборот, носят положительный характер, т.к. увеличивают ёмкость сооружения в пределах отведенного под него земельного отвода.

4. Оползневые деформации на откосах отвала фосфогипса обусловлены влиянием двух факторов – высокой обводненностью отвального массива и снижением прочности глинистых грунтов основания вследствие механического разрушения их естественной структуры в зоне сдвигов и физико-химического преобразования при взаимодействии с технологической водой. Механизм образования оползней определяется развитием в грунтовом основании процессов сдвиговой ползучести, фильтрационных деформаций на участках разгрузки техногенного водоносного горизонта, формированием зоны ослабления в толще набухающих грунтов, что в совокупности приводит к смещениям откосов отвала по типу подподошвенных оползней с выдавливанием грунтов основания.

5. По результатам инструментальных и визуальных наблюдений выполнено описание стадий развития опасных оползневых деформаций на откосах отвала фосфогипса (подготовительной, начальной, активной и затухающей); для каждой стадии приводятся характерные визуальные признаки оползневых процессов и количественные показатели динамики их развития. Установлены значения критической скорости горизонтальных смещений (свыше 2 мм/сут), свидетельствующие о переходе оползневых процессов из начальной стадии в активную.

## **ГЛАВА 4 ОБОСНОВАНИЕ УСТОЙЧИВЫХ ПАРАМЕТРОВ ОТВАЛА ФОСФОГИПСА БФ АО «АПАТИТ» С УЧЕТОМ ОРГАНИЗАЦИИ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА**

### **4.1 Расчетные исследования устойчивости откосов отвала при дальнейшем повышении его высоты**

Целью расчетов являлось обоснование возможности повышения высоты отвала БФ АО «Апатит» до 50, 70 и 100 м и выбора оптимальных результирующих углов откосов.

При выполнении расчетов устойчивости откосов отвала решались следующие задачи:

1. Оценка устойчивости откосов отвала при современном состоянии отвальных работ.
2. Обоснование оптимальных параметров отвала при наращивании до высоты 50 м, 70 м и 100 м с учетом изменения гидродинамического режима в техногенном массиве.

При составлении расчетных схем учтены основные факторы (признаки природно-техногенной системы «техногенный массив + естественное основание»), определяющие устойчивость откосов отвального сооружения, а именно: 1) строение отвального массива и физико-механические свойства техногенных пород, отсыпаемых в отвал; 2) строение естественного основания отвального сооружения и физико-механические свойства слагающих его отложений; 3) характер обводнённости отвального массива и его основания (уровни техногенного водоносного горизонта, уровни и напоры подземных вод в основании отвала).

Суть расчетов устойчивости состоит в том, что при известных параметрах перечисленных признаков ПТС должны быть рассчитаны результирующие углы заложения внешних откосов отвального сооружения, при которых устойчивость откосов обеспечивается с нормативным коэффициентом запаса 1,20, рекомендованном «Правилами обеспечения устойчивости ...» [105].

Расчетная схема, учитывающая особенности инженерно-геологических условий отвалообразования на отвале БФ АО «Апатит» соответствует рекомендованной «Правилами...» схеме оценки устойчивости откосных сооружений на «слабом основании». Это обусловлено тем, что отсыпаемый в отвал фосфогипс после твердения (кристаллизации) и уплотнения гравитационными нагрузками приобретает более высокие прочностные свойства, чем глинистые отложения, залегающие в основании техногенного массива. При таких условиях нарушение устойчивости двухкомпонентной системы «техногенный отвал + естественное основание» происходит в виде подподошвенного оползня с захватом пород основания. На основании результатов исследований механизма проявления оползневых смещений (раздел 3.3) установлено, что поверхность скольжения в основании отвала имеет неглубокое заложение в неоднородной толще четвертичных грунтов и приурочена к контакту между слоем делювиальных суглинков и шоколадных глин.

При обосновании структуры расчетных схем учтена инженерно-геологическая информация, полученная в ходе диссертационных исследований, а именно: неоднородное строение техногенного массива, представленное четырьмя слоями (ИГЭ), неоднородное строение четвертичной толщи в основании отвала с наличием зоны ослабления в пределах призмы возможного оползания, в которой свойства шоколадных глин характеризуется наименьшими прочностными характеристиками («слабый» слой).

Принятые к расчетам устойчивости отвала характеристики физико-механических свойств техногенных и естественных пород представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Расчетные характеристики пород, слагающих отвал фосфогипса и его основание

Наименование ИГЭ	$\rho$ , т/м <sup>3</sup>	$c$ , кПа	$\phi$ , град
ИГЭ 1а – псевдопластичный фосфогипс («корка»)	1,60	50	36
ИГЭ 1б – дезинтегрированный осушенный фосфогипс	1,57	20	41
ИГЭ 1в – трещиноватый водонасыщенный фосфогипс	1,79	50	37
ИГЭ 1 г – «псевдопластичный» водонасыщенный фосфогипс	1,73	80	32
ИГЭ 2 – суглинок делювиальный	2,00	68	22
ИГЭ 3 – глина лиманная шоколадная (измененная в зоне сдвигов)	1,86	15	6
ИГЭ 4 – глина аллювиальная	1,81	37	17
ИГЭ 5 – песок	1,70	3	27

Расчеты устойчивости отвала выполнялись с использованием программного комплекса GALENA, реализующего методы предельного равновесия. Проверка устойчивости производилась на программе ABAQUS посредством численного моделирования напряженно-деформированного состояния обводненной грунтовой системы «отвал фосфогипса + слоистое песчано-глинистое основание» (выполнил д.т.н. М.А. Карасев).

Программный продукт GALENA представляет собой интегрированный комплекс для решения задач по оценке устойчивости искусственных откосов и бортов карьеров как в слабых грунтах, так и в скальных массивах методом предельного равновесия в плоско-деформационной постановке. Программа позволяет выполнять оценку устойчивости откосов с неоднородным геологическим строением, различными инженерно-геологическими и гидрогеологическими условиями. Программа позволяет производить быстрый и удобный поиск опасной поверхности скольжения в соответствии с алгоритмами трех известных методов анализа устойчивости откосов: метода Бишопа, Спенсера-Врайта и Сарма. Поиск наиболее опасной поверхности скольжения в программе осуществляется в пределах заданных границ ее возможного выхода в откосах. Критическая поверхность скольжения может представлять собой как

кругло-цилиндрическую, так и сложную ломаную поверхность, проходящую по слабому контакту. Для установления местоположения поверхности скольжения, соответствующей состоянию предельного равновесия откоса, в программе применяется метод последовательных приближений путем проведения многократных поверочных расчетов.

Построение расчетной модели выполняется в следующей последовательности: 1) создание геометрии откоса сооружения; 2) построение расчетной модели инженерно-геологического строения массива; 3) задание свойств расчетной среды (плотность, сцепление и угол внутреннего трения); 4) задание уровня воды в откосе; 5) назначение критерия разрушения пород и метода решения задачи.

В работе использован метод Спенсера (Spencer), который из нескольких реализованных в программе методов является наиболее теоретически обоснованным и удовлетворяет всем условиям статики. В качестве критерия разрушения назначался критерий Кулона-Мора, предполагающий, что разрушение происходит при достижении определенного соотношения касательных и нормальных сил.

Гидрогеологические условия в программе GALENA могут учитываться по одному из следующих вариантов: 1) задаются пьезометрические поверхности по одному или нескольким водоносным горизонтам; 2) задаются коэффициенты порового давления для каждого выделенного слоя; 3) задается различная плотность жидкости.

Гидрогеологические условия отвала определяются распространением двух водоносных горизонтов: 1) техногенного с безнапорным режимом фильтрации; 2) подземного, приуроченного к толще четвертичных грунтов с напорным режимом фильтрации. В расчетных схемах оба водоносных горизонта объединены в единый комплекс с общей депрессионной кривой, проходящей в теле отвального массива.

Численное моделирование устойчивости откоса отвала фосфогипса и уплотнения отвала фосфогипса в рамках программного комплекса ABAQUS

выполнялась одним из приближенных численных методов анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтового массива – методом конечных элементов. Данный метод основан на дискретизации рассматриваемой площади (объема) на простые геометрические элементы – конечные элементы. Все конечные элементы связаны с соседними элементами в узловых точках, что обеспечивает непрерывность поля перемещений. Напряжения и деформации высчитываются в точках интегрирования, а затем с помощью методов интерполяции распространяются на всю площадь элемента или весь объем элемента.

При выполнении математического моделирования были приняты следующие допущения. Полагая, что протяженность отвала в продольном направлении больше его поперечных размеров, с некоторыми допущениями, задачу можно рассматривать в плоско-деформационной постановке. Грунтовое основание рассматривается как среда, возникновение избыточного порового давления в которой невозможно, а деформации в которой, под действием внешней нагрузки, реализуются мгновенно и не растянуты во времени.

Для описания поведения грунтов с учетом их деформационного поведения принято несколько моделей грунтов. Суглинок делювиальный, глина лиманная шоколадная и глина аллювиальная рассматриваются как упругая пластическая среда с упрочнением, модифицированная модель Друкера-Прагера (шатровая). Песок рассматривается как упругая идеально-пластическая среда, прочность которой характеризуется критерием Кулона-Мора. Фосфогипс рассматривается как пористая среда, уплотняемость которой реализуется за счет разрушения структурных связей и уменьшения объема пористого пространства. До момента начала деформаций уплотнения фосфогипс рассматривается как линейно-деформируемая среда. Для описания поведения фосфогипса принята упруго-пластическая шатровая модель с объемным упрочнением. В качестве критерия прочности рассматривается модифицированный критерий Друкера-Прагера.

При оценке устойчивости все элементы среды (фосфогипс и грунты основания) рассматривались как упруго-идеально-пластические среды, прочность которых задавалась согласно критерию прочности Кулона-Мора.

Численная модель составлена таким образом, что новый слой отвала фосфогипса вводится в работу с учетом уплотнения, которое испытывают расположенные ниже слои фосфогипса и грунтовый массив основания. То есть, отметка ввода нового слоя фосфогипса не соответствует проектному значению, а расположена ниже этой отметки с учетом деформаций нижележащих слоев.

Задача рассматривалась в следующих граничных условиях: поверхность грунтового массива может свободно деформироваться; смещения остальных граничных поверхностей в направлении перпендикулярном рассматриваемой поверхности приравнялись нулю. Задача решалась в гравитационной постановке. В качестве начальных условий задавались начальные величины напряжённого состояния грунтового основания и распределение порового давления.

Численное моделирование выполнялось в следующей последовательности:

- 1) формирование начального поля напряженного состояния грунтового основания, с учетом веса грунтов и начального уровня грунтовых вод;
- 2) послойная отсыпка слоев грунта мощностью по 10 м до высоты сооружений 50, 70 и 100 м;
- 3) расчет устойчивости откоса.

Программные комплексы позволяют положение депрессионных поверхностей водоносных горизонтов задавать вручную, используя натурные замеры напоров в массиве или результаты расчетов, полученные другими методами. В работе расчеты устойчивости отвала выполнялись по трем вариантам определения депрессионной поверхности в откосе отвала: 1 – предварительным расчетом в рамках специализированной программы численного моделирования геофильтрационных процессов (выполнил к.г.-м.н. Ф.П. Стрельский); 2 – приближенным расчетом по результатам гидрогеологического мониторинга (тело отвала обводнено на 70% по мощности); 3 – расчетом порового давления при моделировании НДС массива средствами программного комплекса ABAQUS.

Численное моделирование геофильтрационных процессов было выполнено с целью прогнозирования уровня воды в теле отвала фосфогипса при его наращивании до высоты 50, 70, 85 и 100 м. Модель создана при условии сохранения интенсивности и технологии его нагружения. При такой постановке на положение уровней будут влиять: сокращение площади складирования фосфогипса почти в два раза, в результате чего на единицу рабочей площади отвала будет сливаться технической воды в два раза больше; консолидация нижних слоев отвала, в результате которой сократится их пористость (емкость) и водопроницаемость.

По результатам моделирования были получены депрессионные кривые, соответствующие различным этапам отсыпки отвала фосфогипса (рисунок 4.1).

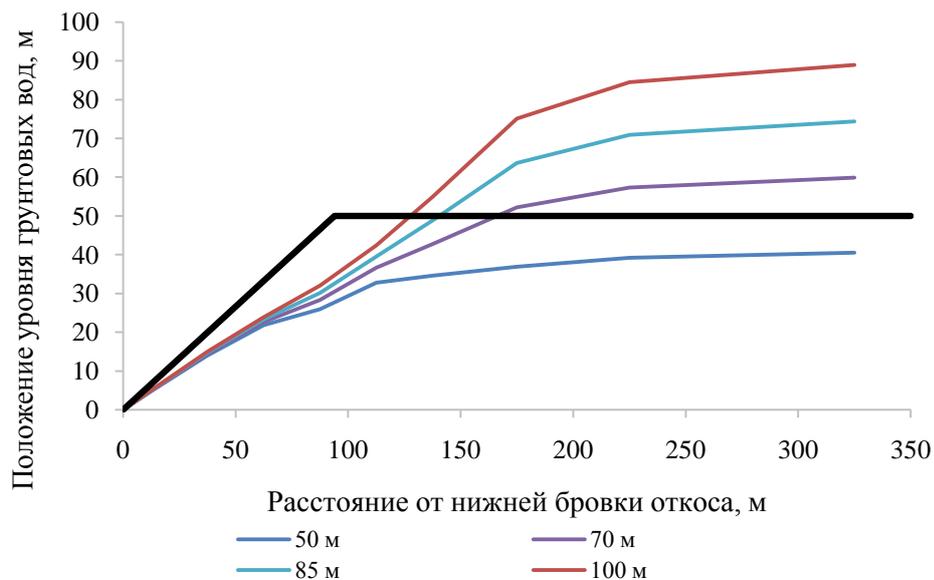


Рисунок 4.1 – Уровни техногенных вод, соответствующие различным этапам отсыпки отвала фосфогипса: до 50, 70, 85, 100 м

Основные результаты расчетного обоснования сводятся к следующему.

Оценка устойчивости откосов отвала при современном состоянии отвальных работ выполнена с учетом последних данных геодезического мониторинга (октябрь 2017 г.), согласно которым средняя высота откосов отвала на разных участках составляет 39 м. Высоты, зафиксированные в районе

оползневых участков (профильные линии III-III и IV-IV) приближаются к 41 м (начальная стадия развития).

Анализ результатов выполненных расчетов (рисунок 4.2-4.3) свидетельствует о том, что устойчивость отвала фосфогипса при современном состоянии отвальных работ обеспечивается с минимальным коэффициентом запаса  $k_{st}=1,19$  на участках, охваченных оползневыми деформациями, что ниже нормативного значения. На других участках отмечается стабильное состояние откосов отвала, характеризующееся коэффициентами выше нормативных, несмотря на использование в расчетах заниженных характеристик слоя шоколадной глины.

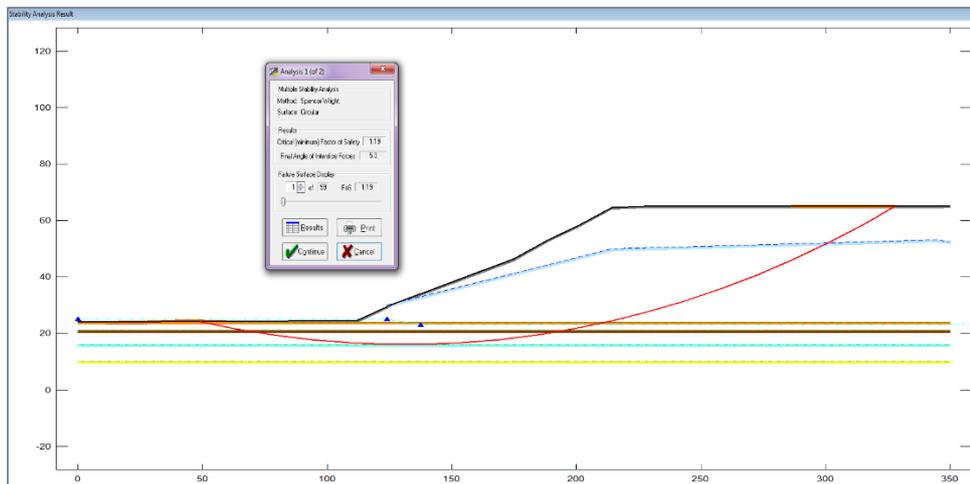


Рисунок 4.2 – Оценка устойчивости откоса отвала на оползневых участках (III-III и IV-IV профиля) ( $k_{st}=1,19$ )

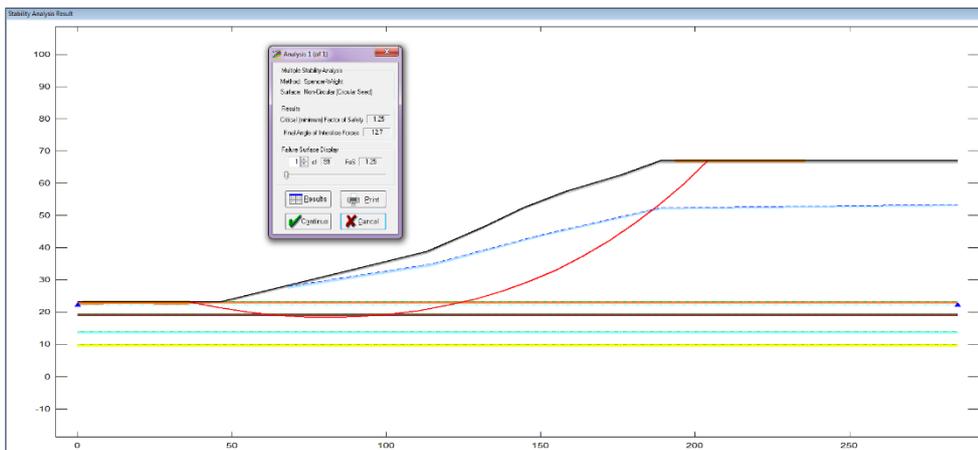


Рисунок 4.3 – Оценка устойчивости откоса отвала на устойчивых участках ( $k_{st}=1,25$ )

При наращивании высоты отвала до 50 м и принятом на сегодня проектном результирующем угле заложения откосов  $28^{\circ}$  устойчивость откосов не обеспечивается с требуемым запасом (рисунки 4.4 и 4.5). Коэффициенты устойчивости, полученные разными методами, не превышают 1,13 (GALENA) и 1,125 (ABAQUS). Влияние любых дополнительных (не учтенных в расчетах факторов) может привести к нарушению устойчивости откосов. Следует отметить, что в настоящее время на всех участках отвала произошло выполаживание откосов до углов  $16-21^{\circ}$ .

Снижение угла откоса до приемлемого по экономическим показателям значения  $21^{\circ}$  увеличивает коэффициент запаса устойчивости до 1,19 при высоте откоса 50 м (рисунки 4.6, 4.7), что также не обеспечивает соблюдения нормативных требований по коэффициенту запаса устойчивости 1,20.

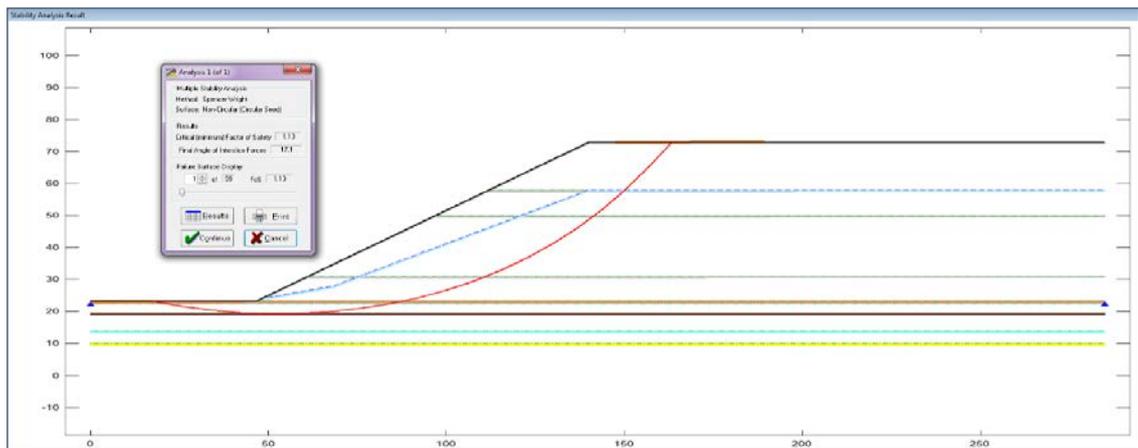


Рисунок 4.4 – Оценка устойчивости откоса при наращивании отвала до 50 м при  $\alpha_{\text{pez}}=28^{\circ}$  ( $k_{\text{st}}=1,13$ )

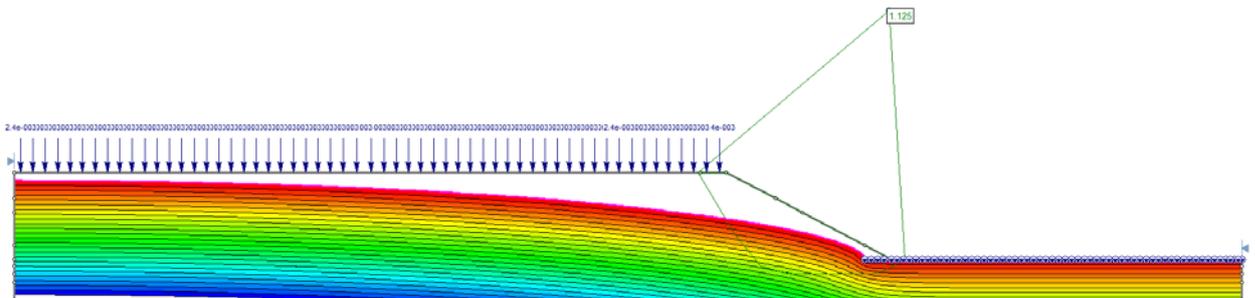


Рисунок 4.5 – Оценка устойчивости откоса при наращивании отвала до 50 м при  $\alpha_{\text{pez}}=28^{\circ}$  ( $k_{\text{st}}=1,125$ )

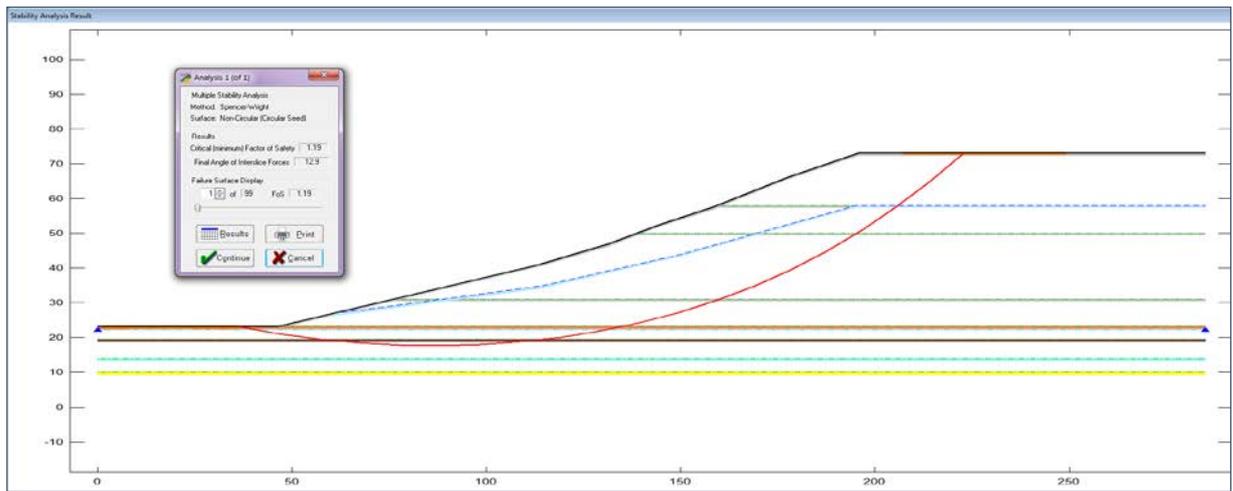


Рисунок 4.6 – Оценка устойчивости откоса при наращивании отвала до 50 м  
при  $\alpha_{\text{рез}}=21^\circ$  ( $k_{\text{ст}}=1,19$ )

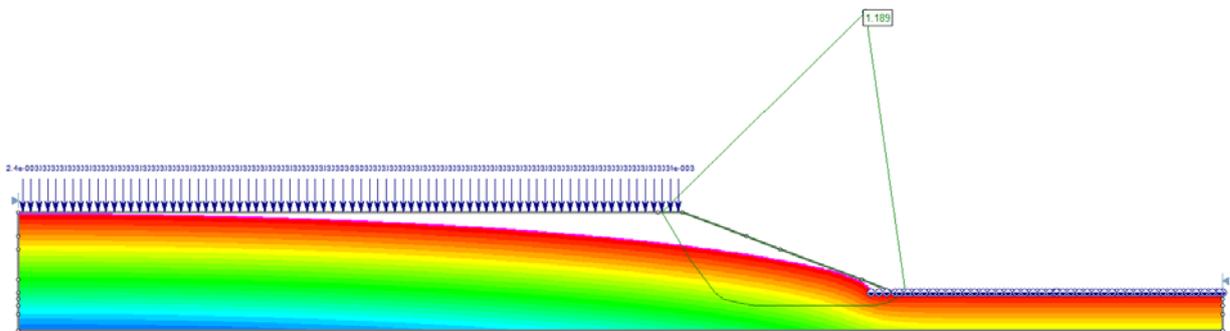


Рисунок 4.7 – Оценка устойчивости откоса при наращивании отвала до 50 м  
при  $\alpha_{\text{рез}}=21^\circ$  ( $k_{\text{ст}}=1,189$ )

Обоснование возможности повышения высоты отвала до 70, 85 и 100 метров выполнялось для следующих расчетных вариантов:

1 вариант – для отвала высотой 70 и 100 м при углах наклона откоса 21 и  $28^\circ$ , в соответствии с расчетными уровнями подземных вод в программе, представленными на рисунке 4.1;

2 вариант – для отвала высотой 70, 85 и 100 м при углах наклона откоса от 21 до  $28^\circ$  с шагом  $1^\circ$  по фактическому уровню подземных вод, полученному по результатам гидрогеологического мониторинга (обводненность отвала составляет 70% по мощности техногенного массива);

3 вариант – для отвала высотой 70, 85 и 100 м при углах наклона откоса от 21 до  $28^\circ$  с шагом  $1^\circ$  по расчетному уровню подземных вод, определенному средствами программы ABAQUS.

Расчетами устойчивости по 1 варианту получены следующие величины коэффициента запаса устойчивости:

- Высота отвала 70 м, угол откоса  $28^{\circ}$  – коэффициент устойчивости 1,06.
- Высота отвала 70 м, угол откоса  $21^{\circ}$  – коэффициент устойчивости 1,11.
- Высота отвала 100 м, угол откоса  $28^{\circ}$  – коэффициент устойчивости 0,93.
- Высота отвала 100 м, угол откоса  $21^{\circ}$  – коэффициент устойчивости 0,717.

Как видно из расчетов, при отсыпке отвала до высоты 70 и 100 м, при заданном уровне подземных вод, коэффициент запаса устойчивости откоса окажется значительно ниже допустимой величины (рисунки 4.8-4.9).

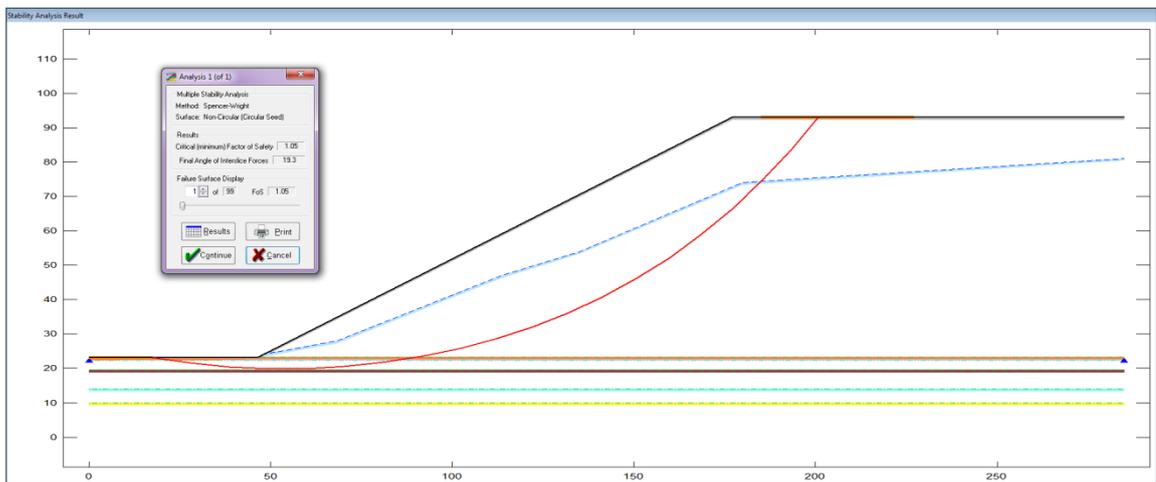


Рисунок 4.8 – Оценка устойчивости откоса при наращивании отвала до 70 м  
при  $\alpha_{\text{pez}}=28^{\circ}$  ( $k_{\text{st}}=1,06$ )

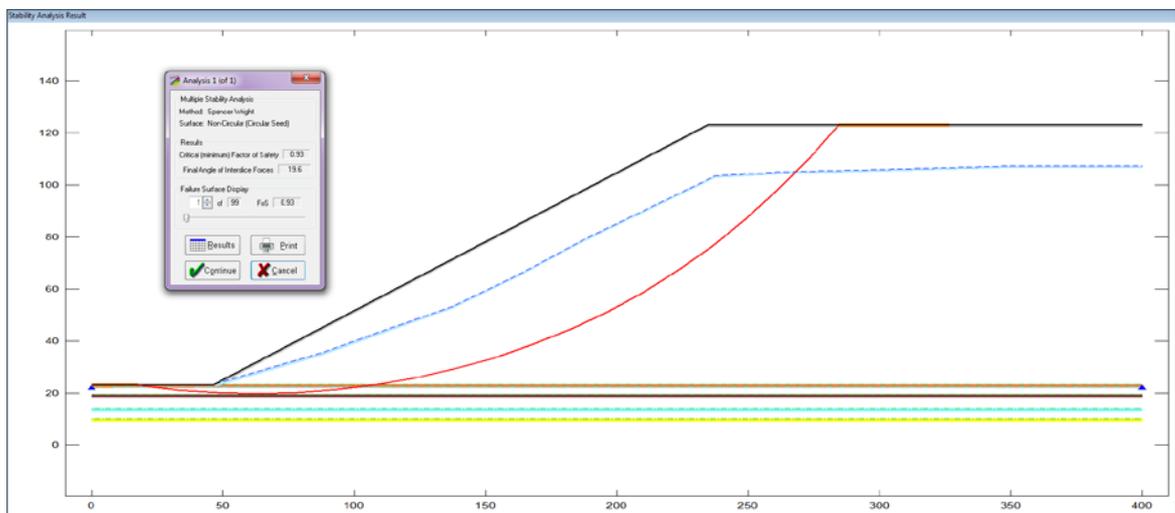


Рисунок 4.9 – Оценка устойчивости откоса при наращивании отвала до 100 м  
при  $\alpha_{\text{pez}}=28^{\circ}$  ( $k_{\text{st}}=0,93$ )

Результаты расчетов устойчивости по вариантам 2 и 3 представлены в таблицах 4.2 и 4.3 и на рисунках 4.10 и 4.11.

Таблица 4.2 – Коэффициент запаса устойчивости откоса отвала в зависимости от его высоты и угла наклона (уровень грунтовых вод согласно результатам натуральных замеров)

Высота отвала, м	Коэффициент запаса при угле откоса отвала, град							
	21	22	23	24	25	26	27	28
70	1,16	1,15	1,13	1,11	1,09	1,07	1,06	1,05
85	1,14	1,12	1,10	1,08	1,06	1,04	1,02	1,00
100	1,12	1,09	1,07	1,05	1,03	1,02	1,01	0,98

Таблица 4.3 – Коэффициент запаса устойчивости откоса отвала в зависимости от его высоты и угла наклона (уровень грунтовых вод рассчитан на основании численного моделирования в программе ABAQUS)

Высота отвала, м	Коэффициент запаса при угле откоса отвала							
	21	22	23	24	25	26	27	28
70	1,156	1,134	1,112	1,106	1,091	1,083	1,074	1,063
85	1,137	1,117	1,103	1,083	1,071	1,060	1,050	1,035
100	1,123	1,095	1,081	1,064	1,050	1,027	1,015	1,016

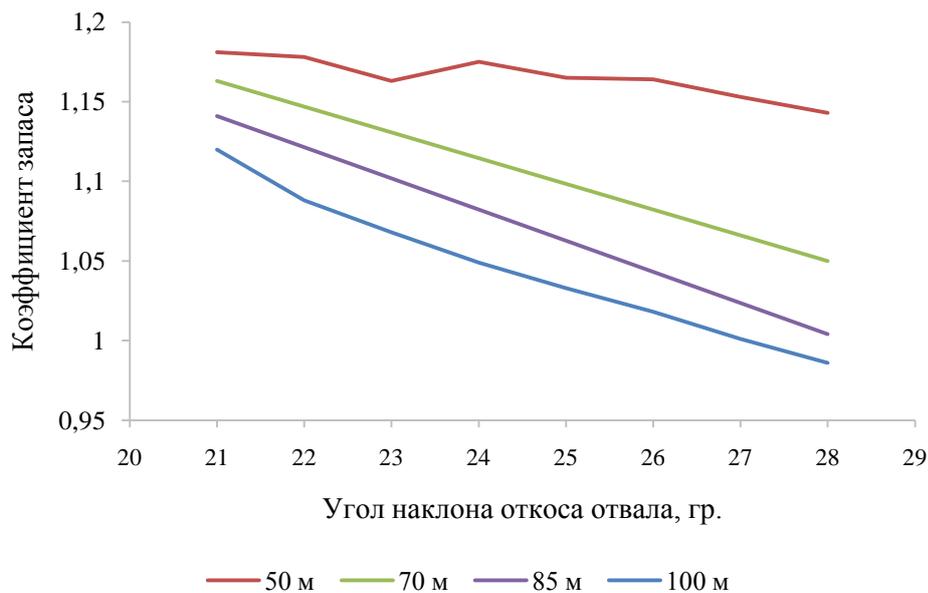


Рисунок 4.10 – Коэффициент запаса устойчивости откоса отвала в зависимости от его высоты и угла наклона (уровень грунтовых вод согласно результатам натуральных замеров)

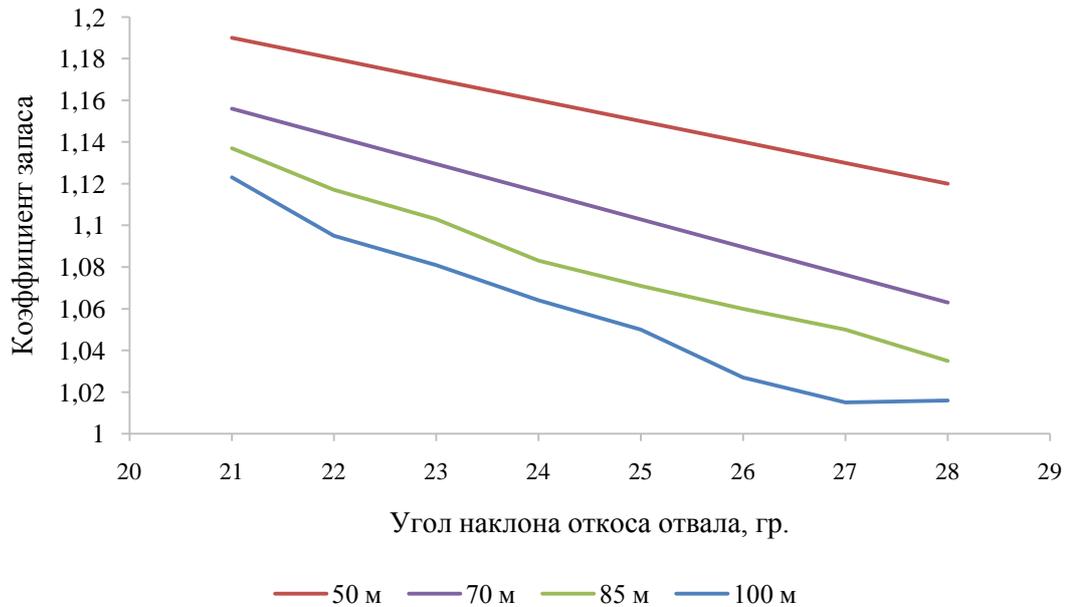


Рисунок 4.11 – Коэффициент запаса устойчивости откоса отвала в зависимости от его высоты и угла наклона (уровень грунтовых вод рассчитан на основании численного моделирования)

С учетом того, что положение депрессионной кривой, полученное расчетным образом, калибровалось по результатам натуральных наблюдений за уровнем подземных вод, результаты оценки устойчивости откоса отвала фосфогипса по вариантам 2 и 3 сопоставимы между собой. В целом можно утверждать, что положение уровня техногенного водоносного горизонта в теле и откосах отвала, является весьма важным фактором, определяющим устойчивость откосов отвала и возможность повышения его высоты. Изменение высоты или угла наклона откоса отвала фосфогипса, оказывает влияние на его устойчивость, однако степень влияния каждого из этих факторов составляет около 10-15%.

Из результатов выполненных расчетов следует, что наращивание высоты отвала до 70 м и 100 м при результирующих углах  $21^{\circ}$  и выше является проблематичным без организации дренажных мероприятий. Ниже приведены результаты расчетов при снижении результирующего угла без организации искусственного понижения уровня воды в теле отвала (рисунки 4.12-4.18), из которых следует, что обеспечение устойчивости откосов отвала высотой 100 м с нормативным коэффициентом устойчивости 1,20 достигается при понижении результирующего угла до  $16^{\circ}$ .

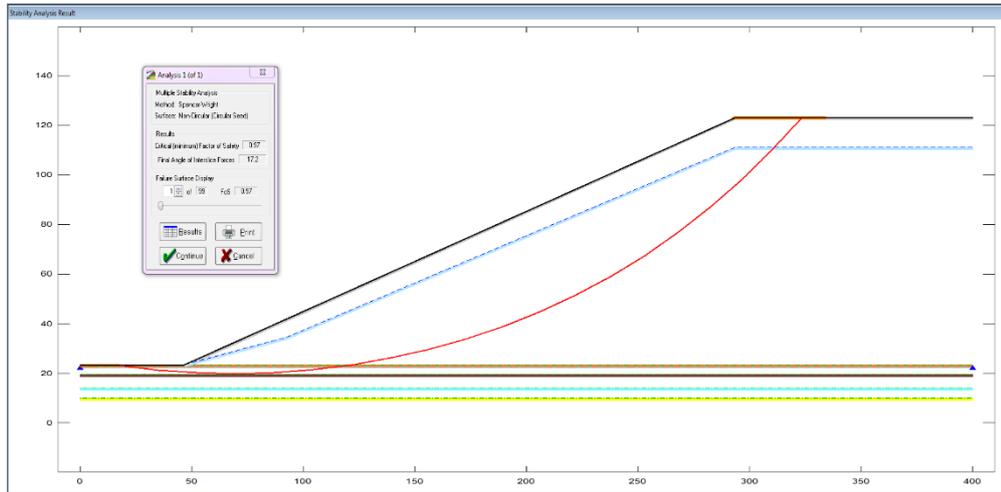


Рисунок 4.12 – Оценка устойчивости откоса методом предельного равновесия при наращивании отвала до 100 м при  $\alpha_{\text{рез}}=22^\circ$  ( $k_{\text{ст}}=0,97$ )

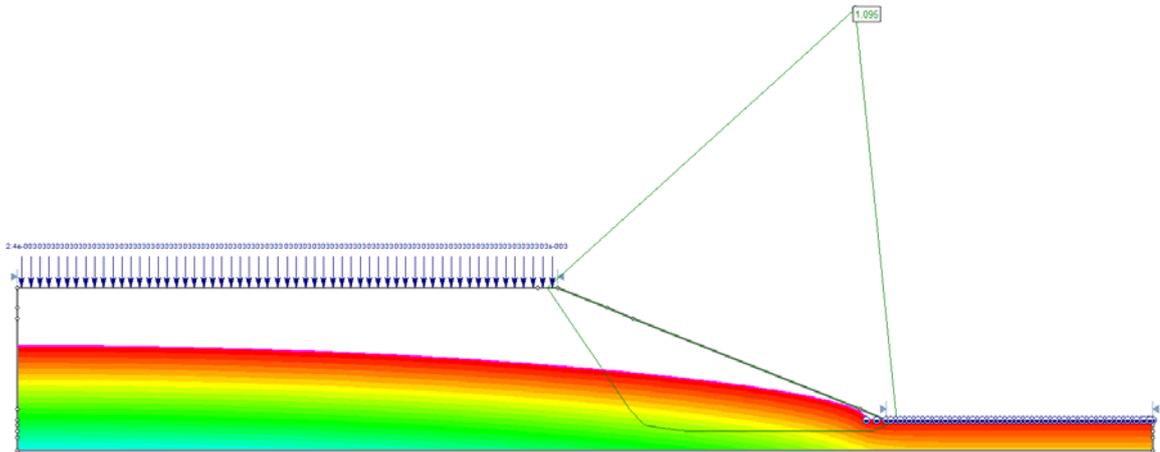


Рисунок 4.13 – Оценка устойчивости откоса методом моделирования при наращивании отвала до 100 м при  $\alpha_{\text{рез}}=22^\circ$  ( $k_{\text{ст}}=1,095$ )

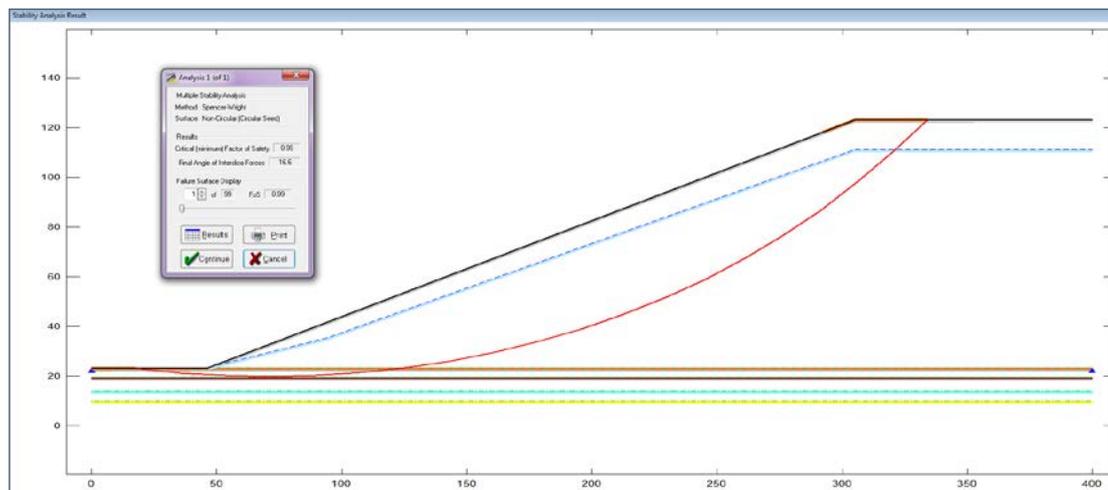


Рисунок 4.14 – Оценка устойчивости откоса методом предельного равновесия при наращивании отвала до 100 м при  $\alpha_{\text{рез}}=21^\circ$  ( $k_{\text{ст}}=0,99$ )

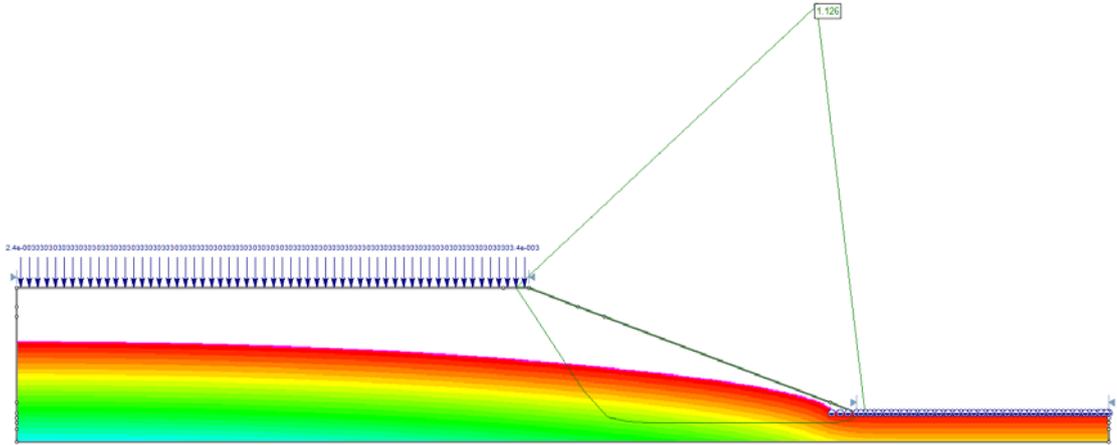


Рисунок 4.15 – Оценка устойчивости откоса методом моделирования при наращивании отвала до 100 м при  $\alpha_{\text{pez}}=21^\circ$  ( $k_{\text{st}}=1,126$ )

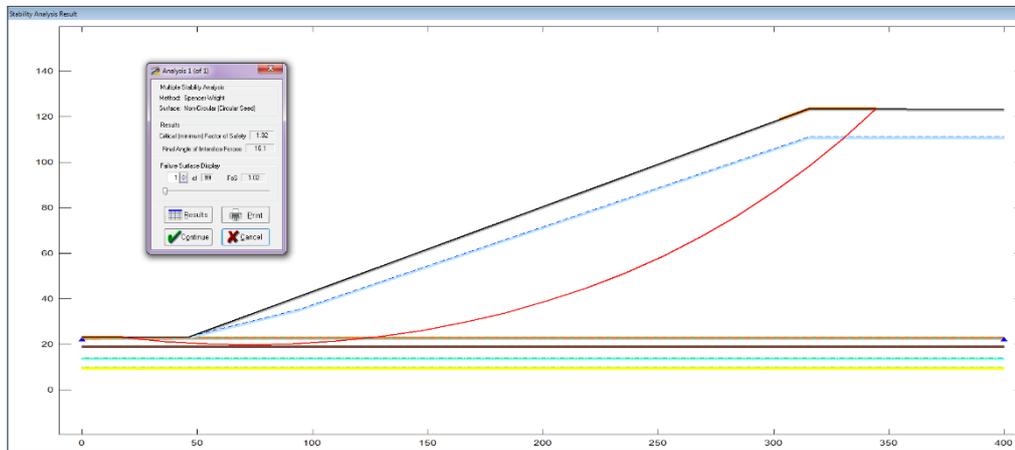


Рисунок 4.16 – Оценка устойчивости откоса методом предельного равновесия при наращивании отвала до 100 м при  $\alpha_{\text{pez}}=20^\circ$  ( $k_{\text{st}}=1,02$ )

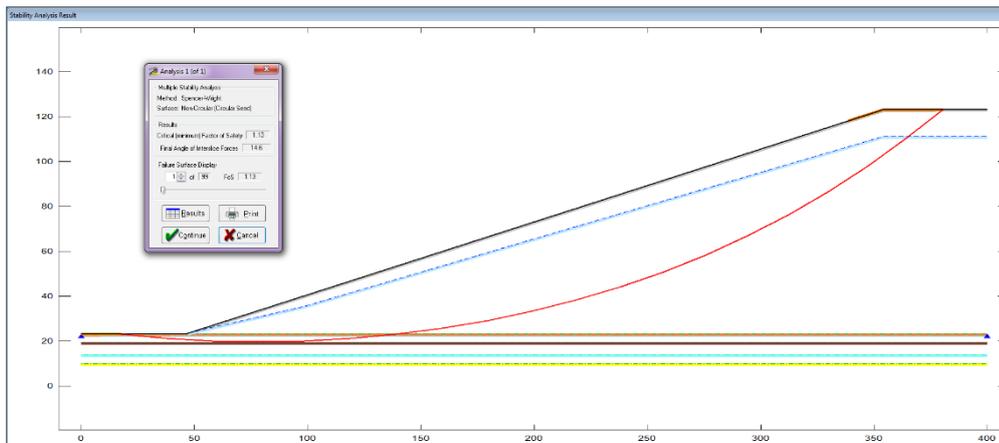


Рисунок 4.17 – Оценка устойчивости откоса методом предельного равновесия при наращивании отвала до 100 м при  $\alpha_{\text{pez}}=18^\circ$  ( $k_{\text{st}}=1,13$ )

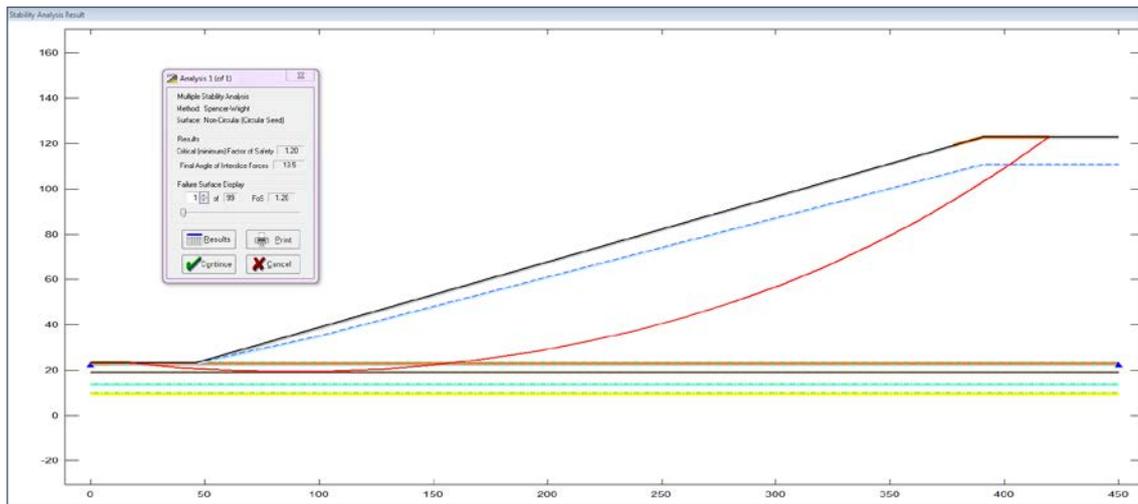


Рисунок 4.18 – Оценка устойчивости откоса методом предельного равновесия при наращивании отвала до 100 м при  $\alpha_{\text{рез}}=16^\circ$  ( $k_{\text{ст}}=1,20$ )

Из прогнозных результатов следует, что условия устойчивости отвала БФ АО «Апатит» при наращивании его высоты до 70 и 100 м с результирующими углами  $21^\circ$  и более не отвечают нормативным требованиям по допустимому коэффициенту запаса, значение которого должно быть не ниже 1,20 согласно «Правил обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах», рекомендованных Ростехнадзором для использования на всех горнотехнических производственных объектах. Снижение результирующих углов откосов не эффективно по экономическим показателям отвалообразования.

Улучшение условий устойчивости может быть достигнуто посредством организации комплекса технических мероприятий, направленных на понижение уровня техногенного водоносного горизонта и контролирование гидрогеологической ситуации ведением регулярного мониторинга [16-17].

## 4.2 Обоснование состава мероприятий по улучшению условий устойчивости откосов отвала

Наибольшее значение для устойчивости откосов исследуемого отвала имеет техногенный водоносный горизонт. При высоких уровнях воды в теле отвала устойчивость его откосов ухудшается, а при выходе фильтрационного потока на откосы возникает опасность образования деформационных процессов. Поэтому в

таких условиях весьма важным моментом при наращивании высоты отвала будет организация мероприятий, направленных на снижение уровня техногенного водоносного горизонта и предотвращение дополнительного увлажнения глинистых грунтов в основании отвала.

В горной промышленности для снижения напоров в бортах карьеров и в подземных горных выработках широко и эффективно используются различные способы осушения, в том числе горизонтальные дренажные скважины, которые сооружают у подошвы водоносного горизонта нормально или под некоторым углом к линии простирания.

Известны многочисленные примеры использования таких скважин для водопонижения на ряде других объектов, например, работы ООО НПФ «Азимут» (г. Белгород). Лабораторией гидрогеологии и экологии ВНИМИ на разрезах угольной промышленности России внедрено использование горизонтальных самоизливающихся скважин для дренажа прибортовых массивов, сложенных крутопадающими угольными пластами. В частности, на разрезе «Бачатский» пробурено более 100 скважин длиной 300 м. Это позволило провести отработку запасов угля до глубины 300 м при углах наклона 30-35°.

Однако на отвалах фосфогипса отсутствует подобный опыт создания дренажа. Так, при формировании отвальных массивов в г. Воскресенске Московской области на территориях старых карьеров по добыче фосфорита невольно возникла гидрогеологическая ситуация, обеспечивающая естественный дренаж отвального массива за счет перетекания технических вод из отвального массива в водопроницаемые грунты основания. Перед отсыпкой фосфоритов дно карьера использовалось для размещения вскрышных песков, строительного мусора и пиритовых огарков. Данные отложения характеризуются повышенными фильтрационными свойствами и при нахождении под отвалом выполняют функцию площадной дрены. Подтверждением дренажного эффекта слоя проницаемых пород в основании отвала является низкий уровень воды в техногенном массиве и невысокая степень его обводнения (20-30%) как для

отвала №1, сложенного из дигидрата сульфата кальция, так и отвала №2, отсыпанного из полугидрата сульфата кальция.

Формирование исследуемого отвала БФ АО «Апатит» производилось с отсыпки первых ярусов непосредственно на естественное основание. Ввиду этого и других особенностей, описанных во 2 главе, сформирован высокий уровень техногенного водоносного горизонта, снижение которого возможно за счет организации искусственного дренажа.

Снижение уровней (напоров) воды в откосах отвала БФ АО «Апатит» и в их основании возможно посредством оборудования водопонижающих дренажных скважин – вертикальных или горизонтальных. При этом вертикальные скважины должны располагаться только на рабочей поверхности отвала вблизи его откосов, поэтому будут действовать временно, препятствуя наращиванию отвала. Кроме того, при бурении вертикальных дренажных скважин и их работе поры и трещины вблизи фильтров в значительной мере кольматируются буровым шламом. Следует также отметить такой негативный фактор применения дренажа вертикальными скважинами как повышенная энергоемкость для обеспечения работы насосов. В связи с этим, достаточно правильным техническим решением будет бурение самоизливающих горизонтальных и субгоризонтальных (слабонаклонных) дренажных скважин, направленные вверх под углом 10-15° к горизонту, которые могут быть существенно эффективнее вертикальных скважин по следующим причинам:

- устья субгоризонтальных скважин могут быть расположены предельно близко к основанию отвала, что способствует максимальному снижению напоров воды в откосах отвала;

- при бурении субгоризонтальных восстающих скважин их промывка происходит постоянно за счет дренируемой воды, свободно вытекающей из скважин, что исключает механическую кольматацию пор и трещин в стенках скважин как в процессе бурения, так и при их работе;

- в процессе работы субгоризонтальные дренажные скважины не нуждаются в насосах и постоянном энергоснабжении;

– не препятствуют наращиванию отвала.

Таким образом, становится очевидным, что при дренаже откосов отвала субгоризонтальные скважины в сравнении с вертикальными могут быть более удобны и эффективны.

Горизонтальные дренажные скважины обладают некоторым недостатком в условиях отвала БФ АО «Апатит», заключающимся в том, что их приходится располагать в нижней части отвала, более старой, более уплотненной и, соответственно, менее водопроницаемой. Бурение субгоризонтальных дренажных скважин на восстание (т.е. направленных по пласту вверх) способствует повышению их эффективности, так как приподнимает их в более высокие слои, менее плотные и более проницаемые.

В процессе бурения забой горизонтальной скважины стремится опуститься вниз. Если забой скважины оказывается ниже устья, значительная часть бурового шлама не будет вымываться из скважины. В результате водопримная способность скважины будет снижена. Для облегчения выноса шлама из бурящейся скважины и для ее самоочищения при эксплуатации целесообразно направлять скважину вверх под углом  $10-15^{\circ}$  к горизонту. Чтобы при этом свести кривизну скважины до минимума и обеспечить ее заданную направленность, в буровой снаряд целесообразно включать направляющую трубу длиной не менее 4-5 м с диаметром, равным диаметру скважины, и сопровождать бурение инклинометрическим контролем.

Для правильного оборудования и обоснованного прогноза эффективности работы любых дренажных скважин необходимы:

- информация о водопроницаемости массива отвала не осредненная, а конкретная для участков расположения скважин, отражающая фильтрационную неоднородность отвала по глубине;

- прочностные, водно-физические и реологические характеристики массива отвала для оценки устойчивости стенок скважин под влиянием горного давления и движения воды через фильтр и стенки скважины по порам и трещинам.

Для оценки эффективности горизонтального дренажа откосов отвала БФ АО «Апатит» была создана профильная (двумерная) численная модель упругой (неустановившейся) фильтрации воды в отвале от его центральной части к откосам (выполнил к.г.-м.н. Ф.П. Стрельский) [87, 109]. Модель реализована в специализированной программе PROF17b методом конечных разностей в явно- неявном виде по равновесной балансовой схеме. Созданная модель, как и любая геофильтрационная модель, является математическим описанием среды фильтрации подземных вод и законов изменений их напоров (уровней) в этой среде с определенной гидрогеологической структурой и фильтрационными параметрами под воздействием естественных (климатических) или техногенных (производственных) факторов [132].

Модель имитирует работу ряда горизонтальных или субгоризонтальных «идеальных» дренажных скважин, т.е. скважин, в которых фильтрационное сопротивление фильтра равно нулю и конструктивный диаметр скважины равен её эффективному диаметру. При решении практических задач в качестве расчетного радиуса каждой дренажной скважины должен задаваться её эффективный радиус, учитывающий фильтрационное сопротивление установленного в ней фильтра. Эффективный (расчетный) радиус дренажной скважины вычисляется исходя из фактических дебита скважины и разности напоров в горизонте и в скважине. Следует иметь в виду, что в практике эффективный радиус дренажной скважины в подавляющем большинстве случаев меньше фактического (конструктивного) из-за гидродинамического (фильтрационного) сопротивления фильтра.

Созданная численная модель фильтрации включает отвал фосфогипса высотой 70 м и четыре слоя его основания, в том числе аллювиальные мелкозернистые пески (рисунок 4.19). Верхняя и нижняя границы модели непроницаемые. Абсолютная отметка верхней границы модели равна 75 м, нижней – 2 м. Ширина модели равна расстоянию между дренажными скважинами в ряду ( $\sigma$ ). По длине модель равна 600 м и охватывает половину отвала от центра к его периферии (400 м) и территорию перед отвалом (200 м). Боковая граница в

центре отвала непроницаемая, периферийная граница – проницаемая с напорами от 25 до 75 м.

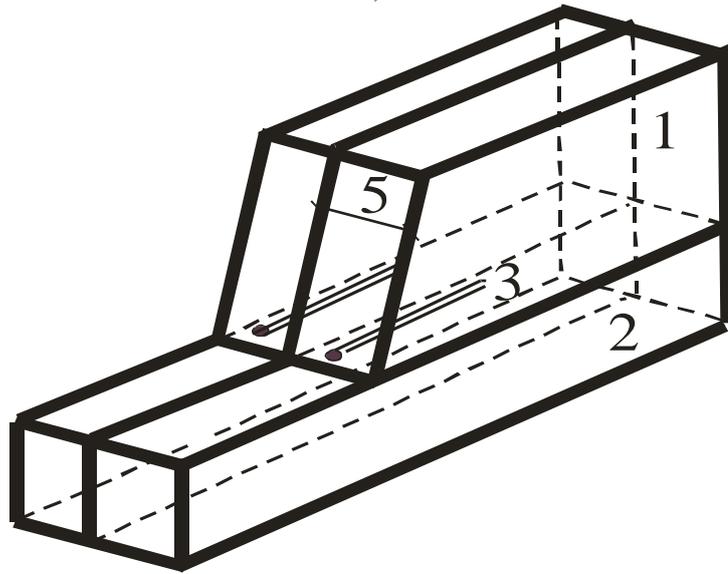
Модель составлена из 192 элементарных однородных блоков, расположенных по 12-ти строкам и 16-ти столбцам. В основании отвала строки модели соответствуют слоям. Размеры блоков изменяются от  $(5*12,5*\sigma)$  м<sup>3</sup> до  $(12*80*\sigma)$  м<sup>3</sup>.

Фильтрационные параметры элементарных блоков отвала фосфогипса, заданные в модели, приняты по результатам, описанным в п. 2.2 работы.

Начальные напоры в моделируемой области соответствовали напорам при установившейся фильтрации с инфильтрационным питанием технической водой и атмосферными осадками на верхней границе отвала за пределами откоса, равном 3,4 мм/сут и только атмосферными осадками – равном 1,3 мм/сут на откосе и перед ним.

По результатам моделирования получено распределение напоров воды при работе рядов субгоризонтальных дренажных скважин длиной 75 и 100 м и с интервалами между скважинами 25 и 50 м (рисунок 4.20). Все субгоризонтальные дренажные скважины в модели располагались в ряду на одном уровне с абс. отм. 27,5 м. Эффективный диаметр всех дренажных скважин в модели был равен 0,15 м (150 мм).

а)



б)

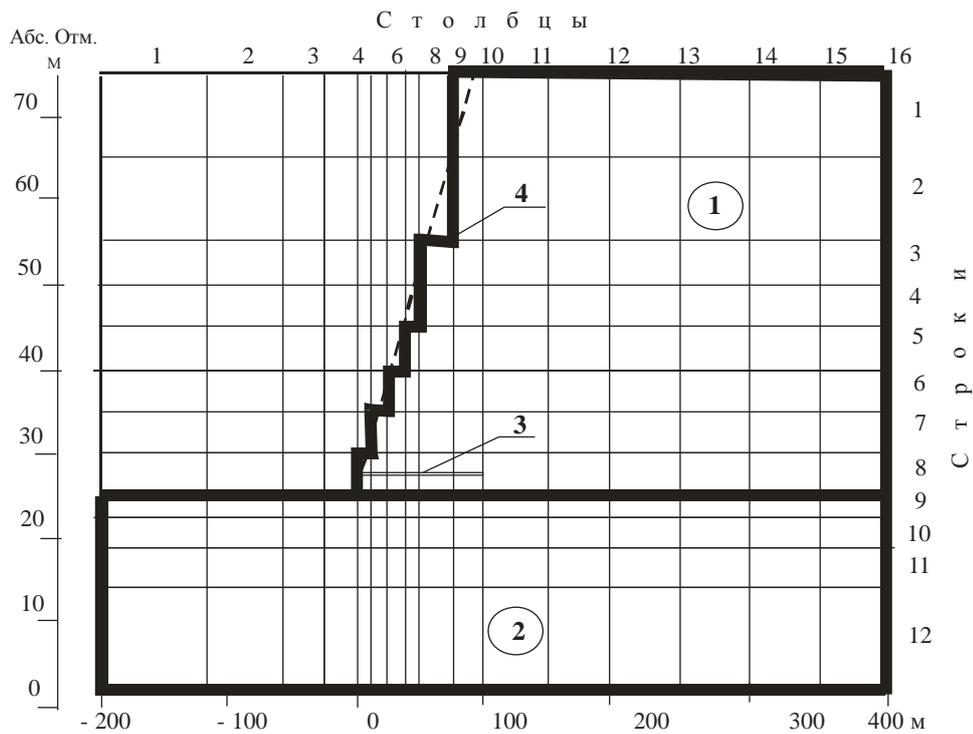


Рисунок 4.19 – Численная профильная модель фильтрации воды в откосе отвала фосфогипса: а) схема модели; б) структура модели; 1 – отвал фосфогипса; 2 – основание отвала (четыре слоя); 3 – горизонтальная дренажная скважина; 4 – откос отвала; 5 – ширина модели и расстояние между скважинами ( $\sigma$ ).

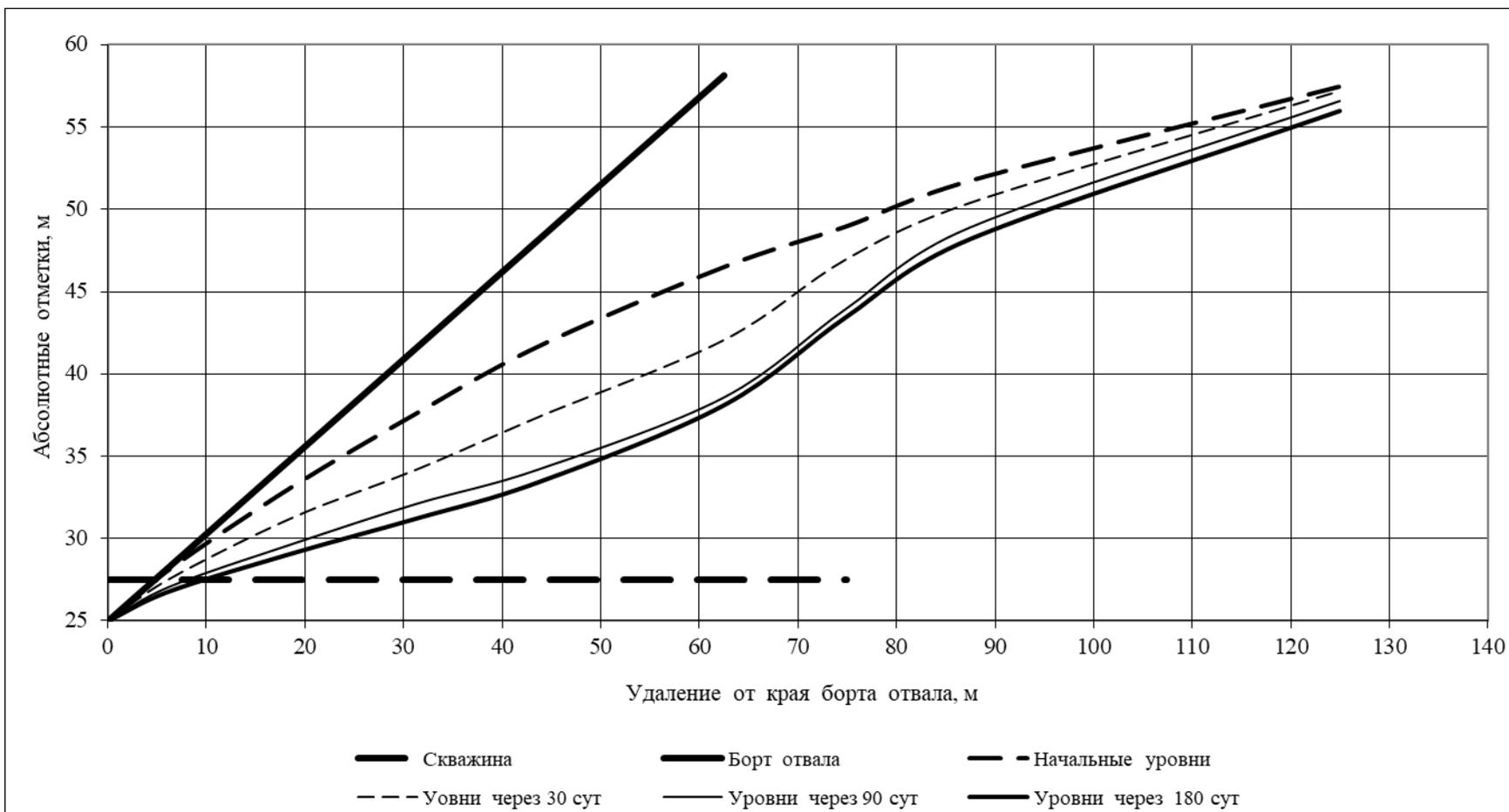


Рисунок 4.20 – Результаты численного моделирования работы в откосе отвала ряда горизонтальных дренажных скважин длиной 75 м с эффективным диаметром 150 мм, и расстоянием между скважинами 50,0 м при условии, что проницаемость отвала везде одинаковая, равная 0,25 м/сут

Установлена достаточно хорошая эффективность работы горизонтальных скважин длиной 75 м при расстоянии между ними 50 метров.

Используя результаты численного моделирования, был произведён расчет устойчивости откоса при наращивании отвала до 70 м с горизонтальным дренажом (рисунок 4.21). Ранее было обосновано, что без внедрения дренажа устойчивость не обеспечивается (рисунок 4.8).

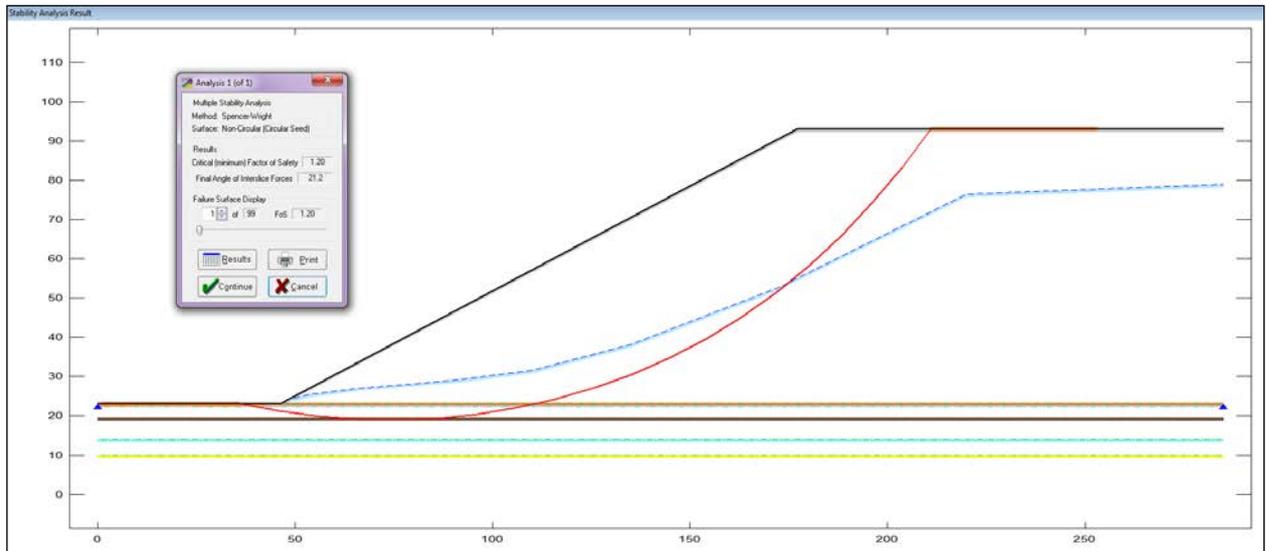


Рисунок 4.21 – Оценка устойчивости откоса при наращивании отвала до 70 м  
при  $\alpha_{\text{рез}}=28^\circ$  ( $k_{\text{ст}}=1,20$ )

Таким образом, применение системы горизонтальных скважин позволяет повысить коэффициент устойчивости от 1,06 до 1,20 при сохранении результирующего угла  $28^\circ$ .

В настоящее время на отвале Балаковского Филиала уже функционирует одна горизонтальная самоизливающаяся дренажная скважина, оборудованная в 2013 г. в качестве эксперимента [87]. Предварительно был вырыт приямок в породах основания у подножия отвала на абсолютной отметке +31,3 м (рисунок 4.22). Бурение производилось несколько метров через породы основания, затем через само тело отвала. Скважина смонтирована на абсолютной отметке +31 м (рисунок 4.23). Длина ее составляет 100 м, наклонена вверх под углом  $4^\circ$  к горизонту. Фильтр типа ФПД-105 с фильтровой колонной установлен на

глубине от 0 до 100 м. Наружный диаметр фильтра равен 105 мм, диаметр фильтровой колонны – 105 мм, длина – 95 м.

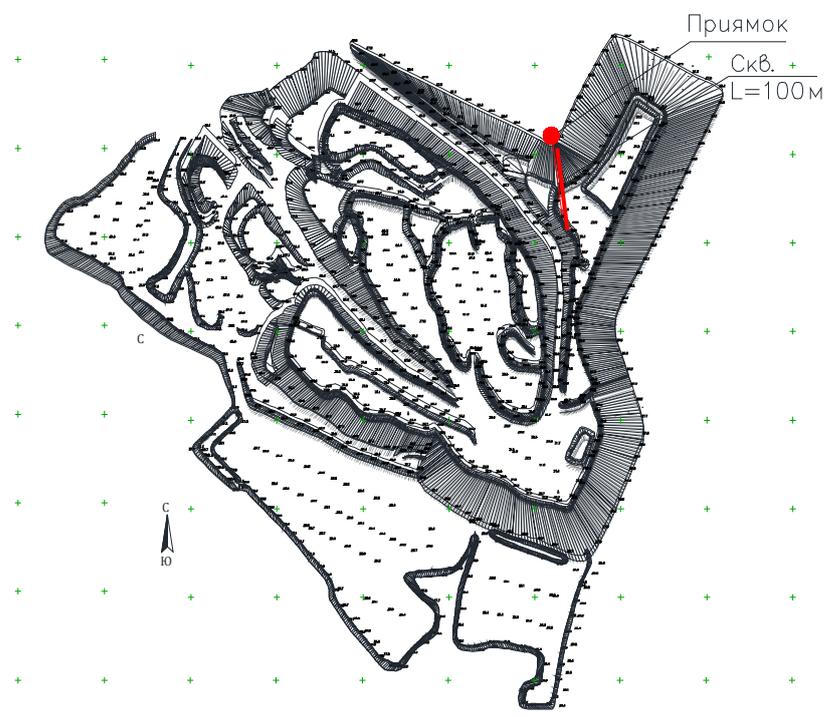


Рисунок 4.22 – Расположение горизонтальной дренажной скважины в плане



Рисунок 4.23 – Сооружение горизонтального дренажа (июль 2013 г.)

Эффективность работы скважины оценивается по замерам уровня воды по вертикальной пьезометрической скважине (рисунок 4.24). Представленные на

рисунке 4.25 данные свидетельствуют о положительном влиянии горизонтального дренажа на состояние устойчивости откоса на участке расположения скважины.

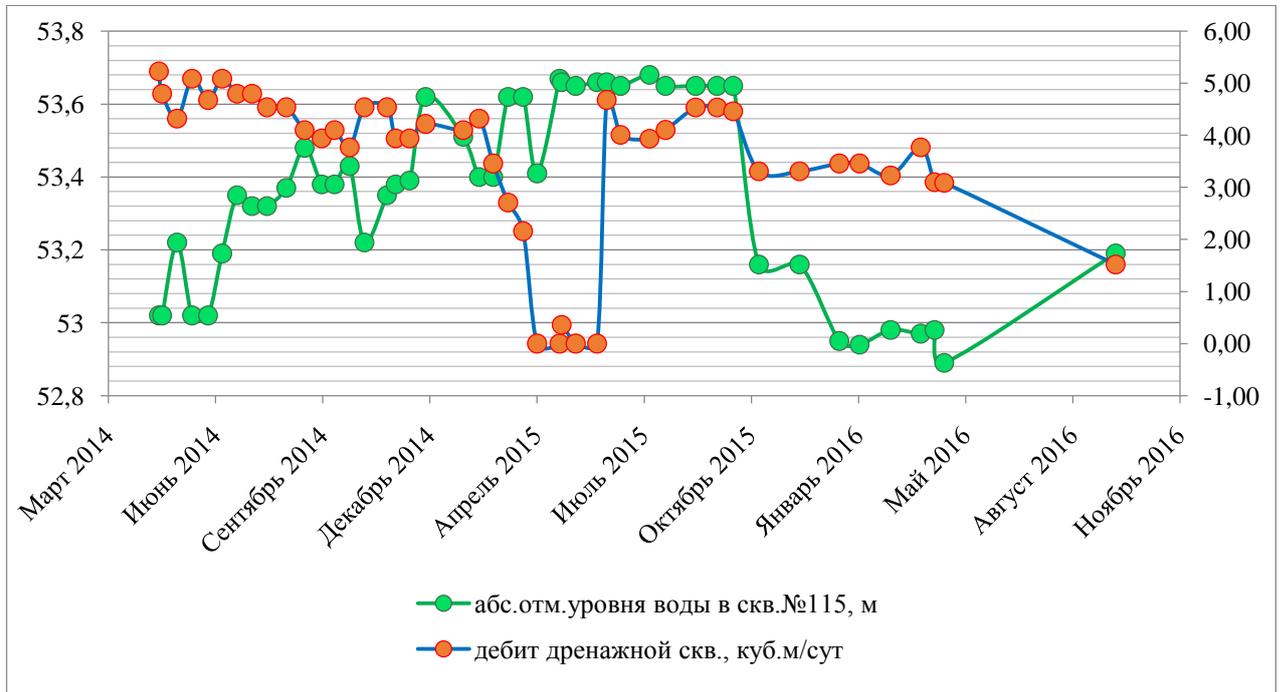


Рисунок 4.24 – Зависимость уровня техногенного водоносного горизонта от дебита горизонтальной дренажной скважины

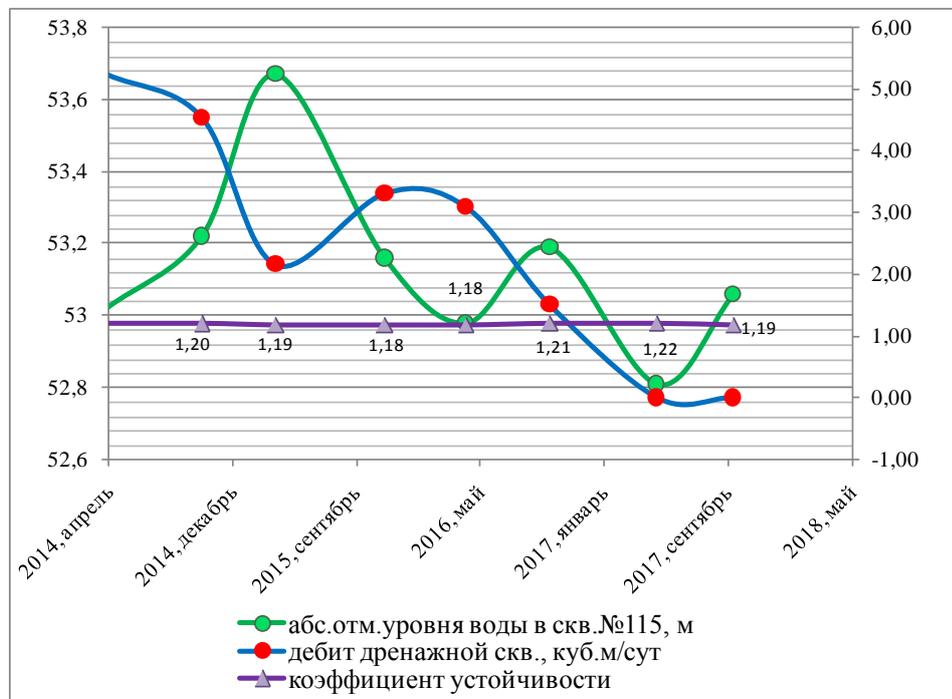


Рисунок 4.25 – Влияние горизонтального дренажа на состояние устойчивости откоса отвала

Приведенные графики еще раз доказывают, что при исправной работе горизонтальной дренажной скважины, уровень техногенного водоносного горизонта снижается, что в свою очередь влияет на состояние отвала, что подтверждается увеличением коэффициента устойчивости.

#### **4.3 Методические принципы управления устойчивостью отвала на базе организации геодинамического мониторинга при ведении отвальных работ на предприятии Балаковский Филиал АО «Апатит»**

Одним из нормативных документов, устанавливающих общие требования устойчивости горнотехнических сооружений при осуществлении деятельности по проектированию, строительству, эксплуатации, расширению, реконструкции, техническому перевооружению, консервации и ликвидации отвалов являются «Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах», разработанные ВНИМИ и утвержденные Ростехнадзором (Госгортехнадзором) РФ 18 апреля 1998 года [105]. Данным документом предписывается требование осуществлять контроль за состоянием откосов отвалов. Однако конкретные требования в части состава работ по контролированию состояния отвалов, порядка организации и функционирования систем мониторинга безопасности «Правилами ...» не регламентированы.

В этой связи в работе сформулированы общие принципы организации и функционирования геодинамического мониторинга устойчивости (безопасности) на отвалах, которые носят рекомендательный характер. Их целесообразно учитывать на стадии проектирования отвальных горных работ в части раздела, касающегося проектирования технических средств и контрольно-измерительной аппаратуры для натурных наблюдений [16-17, 69-70].

При эксплуатации отвалов геодинамический мониторинг устойчивости организуют с целью обеспечения постоянного контроля состояния их откосов, предотвращения возникновения аварийных ситуаций и создания безопасных условий работы людей и горнотранспортного оборудования.

Основной задачей геодинамического мониторинга на отвалах является выполнение регулярных наблюдений за основными показателями состояния сооружения, изменение которых относительно проектных значений может привести к снижению степени устойчивости откосов с образованием опасных оползневых деформаций.

Организация и функционирование системы геодинамического мониторинга на отвалах состоит из следующих этапов:

1. Обоснование состава контролируемых показателей.
2. Определение видов наблюдений за изменением контролируемых показателей.
3. Создание оптимальной пространственной системы геомеханического мониторинга (технических средств мониторинга).
4. Разработка постоянно действующей модели сооружения.
5. Расчет количественных параметров критериев безопасности.
6. Оценка состояния устойчивости откосов отвалов и уровня безопасности условий ведения отвальных работ по результатам мониторинга.

При проведении мониторинга для оценки состояния устойчивости откосов отвалов и уровня безопасности производства отвальных работ устанавливают состав контролируемых параметров (показателей), включая:

- *количественные параметры*, которые измеряются с помощью контрольно-измерительной аппаратуры или других технических средств, либо рассчитываются на основании сделанных измерений;

- *качественные показатели*, определяемые визуальными наблюдениями.

Состав контролируемых параметров для отвалов следует определять исходя из установления наиболее вероятных причин развития аварий на откосах с учетом горно-технологических параметров сооружения, геолого-структурных особенностей отвального массива и основания, инженерно-геологических и гидрогеологических условий района расположения отвала, показателей природных и техногенных воздействий, а также опыта эксплуатации аналогичных объектов.

Практика показывает, что нарушение устойчивости откосов отвалов (образование оползневых деформаций) вызвано в большинстве случаев следующими причинами: неправильными проектными решениями из-за недостаточности достоверных инженерно-геологических, гидрологических данных изысканий, отсутствием обоснованных методик расчета устойчивости откосов; отступлением от проектных параметров в эксплуатационный период; нарушением работы (снижением эффективности) дренажных устройств; постепенным снижением прочностных свойств пород в призме возможного оползания; развитием поверхностных экзогенных явлений, постепенно приводящих к образованию оползневых смещений.

Исходя из установленных причин оползневых деформаций, к числу основных показателей состояния устойчивости откосов отвалов, которые подлежат контролю в рамках геомеханического мониторинга, относятся:

*количественные показатели:*

- геометрические параметры сооружения (высота и углы заложения уступов, ширина межъярусных берм; результирующий угол наклона отвала);
- деформации (вертикальные и горизонтальные смещения) откосов уступов и земной поверхности в пределах ширины призмы возможного оползания;
- уровни и напоры техногенных, грунтовых и подземных водоносных горизонтов в отвале и его основании;
- параметры физико-механических свойств пород.

*качественные показатели:*

- опасные экзогенные явления на откосах и земной поверхности в пределах ширины призмы возможного оползания.

Контролирование показателей состояния отвалов осуществляют посредством организации и выполнения комплекса работ и исследований, включая:

- деформационный контроль (геодезический мониторинг);
- эксплуатационный контроль (визуальные наблюдения);
- дополнительные инженерно-геологические исследования;

- гидрогеомеханический мониторинг (оперативный контроль).

Деформационный мониторинг является неотъемлемой частью производственного процесса, выполняется в обязательном порядке геодезистами предприятия, эксплуатирующего отвал, или организацией, имеющей разрешительные документы на данный вид работ, на основании действующих методических указаний и местных инструкций с применением имеющихся у них технических средств наземной и космической геодезии. Результаты геодезического контроля используются в рамках мониторинга устойчивости для оценки соответствия фактических параметров сооружения проектным решениям, а также для учета деформаций (вертикальных и горизонтальных смещений) откосов уступов и земной поверхности в пределах ширины призмы возможного оползания.

Эксплуатационный контроль состояния отвалов производят путем визуального осмотра или с применением простейших измерительных инструментов, фиксируя все замеченные негативные явления (оконтуривающие трещины, эрозионные размывы, крупные осыпи, обвалы, просадки и заболачивания на земной поверхности в пределах призмы возможного оползания и др.) в соответствующих журналах и актах обследования.

Дополнительные инженерно-геологические исследования в рамках ведения геодинамического мониторинга устойчивости выполняются периодически с целью уточнения строения и параметров физико-механических свойств пород на отдельных участках откосов отвалов. Основанием для проведения дополнительных изысканий является развитие нарастающих деформаций на откосах отвалах при удовлетворительном эксплуатационном состоянии сооружения.

Гидрогеомеханический контроль является наиболее важной и оперативной составляющей геодинамического мониторинга. Обоснование устойчивых параметров отвалов на стадии проектирования базируется на результатах прогнозных геофильтрационных расчетов, при этом часто предполагается полное осушение отвального массива. Фактическое положение уровней и напоров в

период эксплуатации отвалов могут отличаться от прогнозных оценок по ряду объективных причин (недоизученность строения и свойств пород, приближенность расчетных методов, недостаточная эффективность работы дренажных устройств или выход их из строя). Поэтому регулярные гидрогеологические наблюдения позволяют оперативно получать достоверные сведения о фактическом положении депрессионной поверхности в отвалах и распределении напоров в основании сооружения и оценивать на этой основе состояние устойчивости откосов и эффективность работы дренажных систем.

Основными средствами гидрогеомеханического мониторинга являются:

1. Стационарная наблюдательная сеть скважин, оборудованных контрольно-измерительной аппаратурой для замеров гидростатического давления.
2. Постоянно-действующая компьютерная модель сооружения для расчетов устойчивости откоса по результатам замеров гидростатического давления.

Сеть гидрогеомеханического мониторинга должна состоять из одного или нескольких профилей наблюдательных скважин, расположенных перпендикулярно фронту отвала на откосах и земной поверхности в пределах ширины призмы возможного оползания. Количество профилей и скважин в каждом профиле определяются с учетом масштабов отвала, его параметров (высоты и диаметра), неоднородности гидрогеологической структуры, обусловленной распространением слоев (комплексов) пород различной литогенетической принадлежности и степени водопроницаемости.

Для выполнения оценок эксплуатационного состояния сооружения и уровня безопасности производства горных работ по результатам мониторинга должны быть определены критерии безопасности – предельные значения количественных и качественных показателей состояния сооружения, соответствующие допустимому уровню снижения устойчивости откосов.

Основным критерием оценки общей статической устойчивости отвала является коэффициент запаса устойчивости, который на всех этапах эксплуатации отвала не должен быть ниже нормативного значения, определенного проектом.

Показателем соответствия (превышения) фактического и нормативного коэффициентов устойчивости является отсутствие вертикальных и горизонтальных смещений отвала (допустимые смещения оцениваются в пределах точности измерений используемых приборов). При коэффициенте  $\geq 1,20$  отвальный массив испытывает преимущественно упругие деформации в пределах точности измерения приборами. Развитие деформаций, фиксируемое инструментальными наблюдениями, является свидетельством снижения коэффициента запаса устойчивости. До достижения коэффициента запаса устойчивости значения  $1,10$  смещения носят затухающий характер развития во времени, что не приводит к разрушению отвала. Хотя при этом визуально на поверхности отвалов могут прослеживаются трещины и заколы. При коэффициенте устойчивости  $< 1,10$  откосы отвалов высотой более  $100$  м начинают деформироваться в прогрессирующем режиме, что со временем приводит к образованию оползня. Следовательно, для отвала высотой более  $100$  м предельно допустимым является коэффициент запаса устойчивости  $1,10$ . Проектирование же отвала должно вестись, исходя из нормативного значения коэффициента запаса  $1,20$ .

Учитывая данные закономерности, предлагается для оценки состояния устойчивости в рамках мониторинга безопасности рассматривать два уровня критериев безопасности.

*Критерии безопасности 1-ого уровня* – значения контролируемых показателей (распределение гидростатических давлений и деформации отвального массива), при которых состояние отвала соответствует нормативному коэффициенту запаса устойчивости, определенному проектом.

*Критерии безопасности 2-ого уровня* – значения контролируемых показателей, при которых состояние отвала соответствует предельно допустимому коэффициенту запаса устойчивости.

На стадии проектных разработок критерии безопасности определяются на основе результатов расчетов устойчивости отвала с использованием материалов предпроектных инженерных изысканий, а также опыта эксплуатации

аналогичных сооружений. При необходимости организуют специальные экспериментальные исследования геофильтрационного режима, напряженно-деформированного состояния, физико-механических свойств горных пород.

На стадии эксплуатации отвалов состав и значения критериев безопасности в обязательном порядке уточняются и дополняются на основе конструктивных и других изменений проекта, внесенных в ходе строительства, результатов мониторинговых исследований, контрольных расчетов, выполненных с учетом конкретных мест расположения контрольно-измерительной аппаратуры и уточненных физико-механических характеристик пород. Рекомендуется для каждого этапа развития отвальных работ разрабатывать отдельный документ «Критерии безопасности и оценка состояния устойчивости отвала при отметке верхней площадки (указывается абсолютная отметка в соответствии с планом развития отвальных работ)».

На основании сравнения значений контролируемых показателей, регистрируемых при ведении геомеханического мониторинга, с проектными значениями критериев безопасности оценивают эксплуатационное состояние отвалов и уровень безопасности ведения отвальных работ.

*Надежное эксплуатационное состояние отвала (уровень безопасности сооружений нормальный)* – состояние, при котором значения контролируемых показателей не превышают (не менее) соответствующих критериев безопасности I-ого уровня. При этом коэффициент запаса устойчивости отвала соответствует нормативному значению. Сооружение можно эксплуатировать без разработки каких-либо мероприятий, повышающих устойчивость откосов и уровень безопасности условий ведения отвальных работ.

*Удовлетворительное эксплуатационное состояние (уровень безопасности пониженный)* – состояние, при котором значение хотя бы одного контролируемого показателя стало больше (меньше) соответствующих критериев безопасности 1-ого уровня, но значения контролируемых показателей состояния сооружений не превышают (не менее) соответствующих критериев безопасности 2-ого уровня. При этом коэффициент запаса устойчивости отвала не

соответствует нормативному, но не ниже предельно допустимого. Ведение горных работ на данном отвале можно продолжать при условии разработки и выполнения в определенные сроки необходимых мероприятий по улучшению условий устойчивости. Эти мероприятия разрабатываются на основе анализа конкретных показателей по факторам, которые могут создать аварийную ситуацию, и содержат необходимые меры по устранению действия таких факторов.

*Предаварийное эксплуатационное состояние (уровень безопасности опасный)* – состояние, при котором значение хотя бы одного контролируемого показателя стало больше (меньше) соответствующих критериев безопасности 2-ого уровня, имеются признаки прогрессирующего развития деструктивных процессов, необратимо ведущих к нарушению устойчивости отвала. При этом коэффициент запаса устойчивости отвала ниже предельно допустимого, что со временем приведет к образованию оползневой деформации. Состояние отвального сооружения на данном участке не отвечает требованиям правилам безопасной эксплуатации в проектном режиме. Работы на опасном участке отвала должны быть прекращены и приняты меры по улучшению условий устойчивости откосов. Работы могут быть возобновлены с разрешения технического руководителя организации по утвержденному им плану организации работ, предусматривающему необходимые меры безопасности.

Оптимальная программа мониторинга безопасности на отвале БФ АО «Апатит» включает контролирование деформаций откосов с использованием инструментальных геодезических средств измерений, режимные наблюдения за уровнями техногенного водоносного горизонта в теле отвала, а также периодические опробования глинистых грунтов основания на предмет выявления развития в них деструктивных процессов, ведущих к понижению прочности.

В качестве критериев безопасности при выполнении мониторинга следует использовать показатели состояния системы «отвал + основание», оцениваемые количественно, а именно: 1) значения скоростей горизонтальных смещений реперов, соответствующие переходу оползневых процессов из начальной стадии в

активную, которая по имеющемуся опыту наблюдений составляет 2 мм/сут; 2) положение депрессионной поверхности в откосе, удовлетворяющее двум условиям: устойчивость откоса обеспечивается с нормативным коэффициентом запаса (не ниже 1,20); действующие градиенты фильтрационного потока в основании отвала не превышают критических значений, при которых возможно нарушение фильтрационной прочности песчано-глинистых грунтов; 3) характеристики сопротивления сдвигу глинистых грунтов основания, которые должны быть не ниже расчетных параметров, принятых при обосновании оптимальных параметров откосов отвала.

Сравнение контролируемых показателей с критериями безопасности позволяет своевременно выявить признаки снижения степени устойчивости откосов отвала и скорректировать параметры отвалообразования.

Управление устойчивостью откосов отвала по результатам ведения мониторинга безопасности достигается посредством изменения технологии отвальных работ, высоты отвальных ярусов или углов заложения откосов. Если данные меры нежелательны по экономическим или технологическим соображениям, то применяются специальные противооползневые мероприятия:

- селективное размещение пород в отвалы;
- инженерная подготовка основания;
- пригрузка нижней и разгрузка верхней частей откоса;
- изменение направления фронта отвалообразования.

Селективное отвалообразование предполагает последовательность размещения пород в отвалы, которая обеспечивает формирование откосных частей сооружения из наиболее прочных пород и возрастание прочности пород в направлении сверху вниз.

Инженерная подготовка основания отвалов включает следующие мероприятия: полное удаление пород слабого слоя или контакта по всей территории отвала; частичное удаление пород слабого слоя или контакта и замена их прочными, неразмокающими, хорошо фильтрующими породами; террасирование основания.

При отсыпке отвала на слабое основание большой мощности рекомендуется в качестве противооползневого мероприятия его пригрузка опережающим отвалом. Опережающий отвал отсыпают на выходе поверхности скольжения в основании отвала и ориентируют параллельно фронту отвалообразования. Высота опережающего отвала не должна быть меньше величины, обеспечивающей безопасность отвалообразования; ее регулируют по необходимости.

Одним из эффективных мероприятий, обеспечивающих устойчивость обводненных отвальных сооружений, является дренаж непосредственно тела отвала или его основания. Снижения уровней подземных вод в отвалах достигают за счет применения следующих технических средств: дренажных подушек, укладываемых в подошве отвала при его селективной отсыпке; системы продольных и поперечных канав, пройденных в основании отвалов и заполненных фильтрующим материалом до отсыпки отвалов; вертикальных скважин, заполненных фильтрующим материалом («песчаных свай»), пройденных по сетке на площади отвалов или образующих контурные системы (параллельные фронту отсыпки отвалов).

Для предотвращения фильтрационных деформаций на откосах отвалов применяют дренажные пригрузки, представленные грубообломочным материалом и отсыпаемые на фильтрующий откос с перекрытием промежутка высачивания подземных вод.

Из всех перечисленных выше мероприятий наиболее применимым на отвалах фосфогипса БФ АО «Апатит» можно считать: 1) организацию дренажа тела отвала с применением горизонтальных скважин; 2) селективное размещение в отвалы отходов; 3) изменение фронта развития отвальных работ на отвале. Кроме того, учитывая специфические условия формирования отвалов их фосфогипсов, содержащих на выходе из технологических процессов получения фосфорной кислоты большое количество свободной (гравитационной) воды, важнейшим мероприятием управления устойчивостью отвала будет дифференцированное по площади отвала размещение влагосодержащих отходов.

Селективное отвалообразование на отвалах предполагает отдельное

складирование полугидратов и дигидратов, причем первые размещаются во внешних частях отвалов, а вторые – во внутренних. Это позволяет создать упорные призмы из наиболее прочных пород, за счет появления структурных связей в результате процесса перекристаллизации при переходе полугидрата в дигидрат. Таким образом, при селективном размещении в отвалы дигидратов в центральной части сооружения, а полугидратов в краевых частях, получается неоднородный по прочности техногенный массив, параметры (высота и результирующий угол откоса) которого определяются, во многом, наличием наиболее прочных пород, полученных при растворении полугидратов и их перекристаллизации в дигидрат. Кроме того, по гидрогеологическим условиям, определяющим формирование в отвале техногенного водоносного горизонта, отложения, содержащие наибольшее количество свободной влаги размещаются в центре породного массива, в краевых же частях ее содержание минимальное. Эти условия сказываются на величинах питания, определяющих положение уровня воды в теле отвала (максимальные в центре и минимальные по краям) и, в конечном итоге, на устойчивости откоса и его оптимальных параметрах.

Учитывая специфические условия формирования техногенного водоносного горизонта в отвале, связанные с условиями его питания, следует рекомендовать общее направление развития отвальных работ в пределах сооружения от центра к его периферии. Не следует допускать длительного складирования отходов (особенно дигидратового состава) на незначительном по площади участке отвала. Это условие должно соблюдаться при ведении отвальных работ вблизи откосов, где подъем уровня воды в отвале может существенно сказаться на устойчивости его откосов. Подтверждением данного тезиса являются следующие наблюдения: когда отвальные работы велись вблизи откоса в районе гидронаблюдательной скважины, деформации по реперам геодезической станции достигли значений 2 метров за 6 месяцев, когда работы были перенесены в центр отвала, величины деформаций за тот же период были снижены в два раза.

В качестве мероприятий по предотвращению фиксируемого сегодня подтопления откосов отвала на оползневом участке можно рассмотреть два

варианта: отсыпку пригруза в промежутке между отвалом и водоотводящей канавой или организацию системы водоотведения.

Принципиальная схема формирования пригруза следующая: на первом этапе производится откачка воды с территории (или перепуск воды по вырытым временным траншеям в водоотводную канаву), на втором – отсыпка слоя хорошо дренирующих неразмокаемых грунтов, на третьем – досыпка пригруза фосфогипсом. Данное мероприятие помимо осушения территории обеспечит существенное повышение устойчивости откосов за счет усиления призмы упора.

Организация системы водоотведения подразумевает приведение в работоспособное состояние водоотводной канавы и восстановление ее взаимосвязи с осушаемой территорией. Последнее может быть обеспечено посредством планировки этой территории с созданием необходимых уклонов в сторону канавы, либо посредством проходки дополнительных дренажных траншей на осушаемой территории с выходом в канаву.

Следует отметить, что реализация обоих предложенных вариантов в условиях отвала БФ АО «Апатит» имеет свои трудности. Отсыпка пригруза затруднительна ввиду небольшой ширины участка между отвалом и водоотводной канавой, что затрудняет возможность маневрирования (разворота) автосамосвалов. Создание системы водоотведения сопряжено со значительными экономическими затратами на ремонт лотков водоотводной канавы, планировку территории, а также на приобретение и постоянную эксплуатацию специального насосного оборудования в коррозионностойком исполнении.

#### **4.4 Выводы по главе 4**

1. Для рассмотрения возможности повышения высоты отвала БФ АО «Апатит», выбора оптимальных результирующих углов откосов и разработки мероприятий по улучшению условий устойчивости сооружения выполнены расчеты устойчивости откосов отвала при высоте 50, 70 и 100 м. Для обоснования расчетных схем использована инженерно-геологическая информация, полученная в ходе диссертационных исследований. Расчеты выполнялись с применением

программного комплекса GALENA, реализующего методы предельного равновесия (в расчетах использован метод Спенсера). Проверка устойчивости выполнялась на программе ABAQUS посредством численного моделирования НДС обводненной грунтовой системы «отвал фосфогипса + слоистое песчано-глинистое основание».

2. Из прогнозных результатов следует, что условия устойчивости отвала БФ АО «Апатит» при наращивании его высоты до 50, 70 и 100 м с проектным результирующим углом откосов  $28^{\circ}$ , а также со сниженным до  $21^{\circ}$  (приемлемым по экономическим показателям), не отвечают нормативным требованиям по допустимому коэффициенту запаса, значение которого должно быть не ниже 1,20.

3. В качестве мероприятия по улучшению условий устойчивости отвала рассмотрена возможность применения горизонтальных дренажных скважин для снижения уровней воды в теле насыпного массива. На основании результатов численного моделирования геофильтрационных процессов для отвала высотой 70 м установлена достаточно хорошая эффективность работы горизонтальных скважин длиной 75 м при расстоянии между ними 50 метров. Показано, что применение системы горизонтальных скважин позволяет повысить коэффициент устойчивости от 1,06 до 1,20 при сохранении результирующего угла  $28^{\circ}$ .

4. Эффективность горизонтального дренажа на отвале экспериментально доказана наблюдениями за работой опытной скважины, наблюдения по которой проводились регулярно в течение 5 лет. Установлена прямая зависимость между дебитом функционирующей горизонтальной скважины и уровнем техногенного водоносного горизонта в наблюдательной вертикальной скважине, а также коэффициентом запаса устойчивости откоса отвала по сечению, к которому приурочена опытная и наблюдательные скважины.

5. Управление устойчивостью откосов отвала в процессе его формирования осуществляется посредством ведения геодинамического мониторинга, по результатам которого принимаются меры безопасности – корректировка параметров отвала, схемы размещения фосфогипса, внедрение дренажных мероприятий и других технологических решений. Оптимальная программа

мониторинга безопасности на отвале БФ АО «Апатит» включает контролирование деформаций откосов с использованием инструментальных геодезических средств измерений, режимные наблюдения за уровнями техногенного водоносного горизонта в теле отвала, а также периодические опробования глинистых грунтов основания на предмет выявления развития в них деструктивных процессов, ведущих к понижению прочности.

6. В качестве критериев безопасности при выполнении геодинамического мониторинга следует использовать показатели состояния системы «отвал + основание», оцениваемые количественно: 1) значения скоростей горизонтальных смещений реперов, соответствующие переходу оползневых процессов из начальной стадии в активную; 2) положение депрессионной поверхности в откосе, удовлетворяющее двум условиям: – устойчивость откоса обеспечивается с нормативным коэффициентом запаса (не ниже 1,20); – действующие градиенты фильтрационного потока в основании отвала не превышают критических значений, при которых возможно нарушение фильтрационной прочности песчано-глинистых грунтов; 3) характеристики сопротивления сдвигу грунтов основания, которые должны быть не ниже расчетных параметров, принятых при обосновании оптимальных параметров откосов отвала.

7. Комплекс технических мероприятий, рекомендуемый для повышения устойчивости откосов отвалов фосфогипсов, включает: 1) селективное складирование отходов по площади отвалообразования с размещением полугидратов во внешних частях отвала (по контуру отвалообразования), а дигидратов – во внутренних частях (в центре отвала); 2) соблюдение общего направления развития фронта отвальных работ в пределах сооружения – от центра к периферии; 3) недопущение длительного складирования отходов (особенно дигидратов) на малом по площади участке отвала вблизи откосов; 4) инженерную подготовку основания с оборудованием дренажных устройств; 5) пригрузку нижней и разгрузку верхней частей откоса.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### *Основные научные и практические выводы:*

1. На базе анализа результатов полевых и лабораторных исследований физико-механических свойств складированного фосфогипса, техногенных пород отвала и отложений основания, инструментальных геодезических измерений, наблюдений за гидродинамическим режимом техногенного водоносного горизонта, а также произведенных расчетов устойчивости, численного моделирования геофильтрации и напряженно-деформированного состояния пород выполнена оценка условий формирования отвала фосфогипса на Балаковском Филиале АО «Апатит».

2. Установлено, что инженерно-геологические и гидрогеологические условия устойчивости отвала характеризуется наличием: – техногенного массива из фосфогипса с выделением четырех слоев по физико-механическим свойствам и деформационному поведению; – грунтового основания, сложенного делювиальными суглинками в верхней части разреза и лиманными набухающими хвалынскими глинами; – сложной гидрогеологической структурой взаимосвязанных между собой водоносных горизонтов: безнапорного в теле отвала и напорного – в его основании.

3. Выявлены причины повсеместного развития больших по величине деформаций оседания поверхности отвала, интенсифицирующихся с ростом высоты сооружения. Оседания вызваны изменением строения техногенного массива вследствие протекающих процессов самоцементации складированного фосфогипса, дальнейшего разрушения сформированной цементационной структуры, развития трещиноватости и гравитационного уплотнения под действием возрастающего веса отсыпаемых грунтов.

4. Выявлены факторы, обуславливающие снижение устойчивости откосов отвала с ростом их высоты, к числу которых отнесены: формирование в теле отвала техногенного водоносного горизонта и снижение прочности глинистых грунтов основания вследствие механического разрушения их естественной структуры в зоне сдвигов и физико-химического преобразования при

взаимодействии с кислой технической водой. Механизм образования оползней определяется развитием в грунтовом основании фильтрационного выпора на участках разгрузки техногенного водоносного горизонта, активизацией сдвиговой ползучести и выдавливанием слабых глинистых грунтов из-под отвала.

5. Разработана система геодинамического обоснования устойчивости отвалов фосфогипса на глинистом грунтовом основании, базирующаяся на учете изменений инженерно-геологических и гидрогеологических условий техногенных и естественных грунтовых массивов, видов деформационных процессов и закономерностей их развития с ростом высоты сооружений.

6. Разработаны рекомендации по управлению состоянием откосов отвала на базе ведения комплексного геодинамического мониторинга, по результатам которого принимаются меры безопасности – корректировка параметров отвала, схемы размещения фосфогипса, внедрение дренажных мероприятий и других технологических решений. В качестве эффективной меры предотвращения развития опасных деформаций рекомендуется осушение техногенного массива с помощью горизонтальных скважин.

7. Результаты работы могут быть использованы проектными организациями при обосновании параметров отвалов фосфогипса и выполнении на них инженерно-геологических исследований, а также эксплуатирующими предприятиями при организации и выполнении мониторинга и разработки мероприятий по обеспечению устойчивости отвальных сооружений.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Ангелов, А. И., Левин, Б. В., Черненко, Ю. Д. Фосфатное сырье // Справочник. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. – 120 с.
2. Архипов, С. А. К литолого-фациальной характеристике хвалынских шоколадных глин и условиям их образования // Бюл. ком. по изуч. четвертич. периода. 1958. № 22. С. 19–25.
3. Бадюкова, Е. Н. Генезис хвалынских (плейстоцен) шоколадных глин Северного Прикаспия // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2000. Вып. 5. С. 25-34.
4. Бадюкова, Е. Н. История колебаний уровня Каспия в позднем плейстоцене (была ли великая хвалынская трансгрессия?) // XXI Международная научная конференция (школа) по морской геологии «Геология морей и океанов» [устный доклад]. – Москва, 2015.
5. Бахаева, С. П. Расчет устойчивости откосов при открытой геотехнологии: учебное пособие / С. П. Бахаева. – Кемерово, 2011. – 161 с.
6. Васильев, Ю. М. Хвалынские отложения Северного Прикаспия // Бюл. МОИП. Отд. геол. 1961. Вып. 3. С. 70-84.
7. Внедрение на ООО «Балаковские минеральные удобрения» системы мониторинга устойчивости отвала фосфогипса с одновременной оценкой количества размещаемого материала: отчет о НИР / Кутепов Ю. И. – СПб: Горный университет, 2012. – 23 с.
8. Выполнить изучение инженерно-геологических условий и разработать рекомендации по оптимизации параметров отвалов ООО «Балаковские минеральные удобрения»: отчет о НИР / Кутепов Ю. И. – СПб: Горный Университет, 2010. – 122 с.
9. Выполнить изучение инженерно-геологических условий и разработать рекомендации по оптимизации параметров отвалов ООО «Воскресенские минеральные удобрения»: отчет о НИР / Гальперин А. М. – Москва, Московский государственный горный университет, 2011. – 100 с.
10. Выполнить изучение физико-механических свойств фосфогипсов, полученных при переработке сырья из Каратауского и Егорьевского

месторождений фосфоритов на ОАО «Воскресенские минеральные удобрения»: отчет о НИР / Кутепова Н. А. – Санкт-Петербург, ООО НПФ «Карбон», 2012. – 40 с.

11. Галустьян, Э. Л. Геомеханика открытых горных работ. – М.: Недра, 1992. – 272 с.

12. Гальперин, А. М. Геомеханика открытых горных работ. – М.: Изд-во МГГУ, 2003. – 473 с.

13. Гальперин, А. М. Специальные вопросы инженерной геологии при гидромеханизации открытых разработок. М.: Изд-во МГИ, 1974. – 72 с.: ил.

14. Гальперин, А. М., Кириченко, Ю. В., Ермолов, В. А., Кутепов, Ю. И. Инженерно-геологическое обеспечение экологически безопасного освоения горнопромышленных природно-технических систем. – М.: Геоэкология, 2012. – № 6. – С. 520-526.

15. Гальперин, А. М., Кутепов, Ю. И., Еремин, Г. М. Методы определения параметров отвалов и технологии отвалообразования на склонах. – М.: Горная книга, 2012. – 101 с.

16. Гальперин, А. М., Кутепов, Ю. И., Круподеров, В. С., Киянец, А. В. Гидрогеомеханический мониторинг и освоение техногенных массивов на горных предприятиях. – М.: МГГУ, ГИАБ, 2012, отдельный выпуск, С. 44-57.

17. Гальперин, А. М., Кутепов, Ю. И., Мосейкин, В. В. Гидрогеомеханические аспекты освоения техногенных массивов на горных предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ). Отдельный выпуск №1, Труды научного симпозиума «Неделя Горняка – 2014», 2014. С. 18-31.

18. Гальперин, А. М., Фёрстер, В., Шеф, Х.-Ю. Техногенные массивы и охрана природных ресурсов: Учебное пособие для вузов: В 2 т. – М.: МГГУ, 2006. – Т. 1: Насыпные и намывные массивы. – 391 с.: ил.

19. Гальперин, А. М., Фёрстер, В., Шеф, Х.-Ю. Техногенные массивы и охрана природных ресурсов: Учебное пособие для вузов: В 2 т. – М.: МГГУ, 2006. – Т. 2: Старые техногенные нагрузки и наземные свалки. – 259 с.: ил.

20. Гидродинамические и физико-химические свойства горных пород / Н. Н. Веригин, С. В. Васильев, В. С. Саркисян. – М.: Недра, 1977. – 271 с.
21. Горькова, И. М. Глинистые породы и их прочность в свете современных представлений коллоидной химии. – Труды лаборатории гидрогеологических проблем АН СССР, 1957, т. 15, с. 26-52.
22. Горькова, И. М. Физико-химические исследования дисперсных осадочных пород в строительных целях. М.: Стройиздат, 1976. – 149 с.
23. ГОСТ 12248-2010 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. – М.: Издательство стандартов, 2012. – 82 с.
24. ГОСТ 12536-79 Грунты. Методы лабораторного определения зернового (гранулометрического) и микроагрегатного состава. – М.: Издательство стандартов, 1980. – 18 с.
25. ГОСТ 20522-2012 Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. – М.: Стандартинформ, 2013. – 19 с.
26. ГОСТ 24143-80 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик набухания и усадки. – М.: Издательство стандартов, 1981. – 20 с.
27. ГОСТ 25100-2011 Грунты. Классификация. – М.: Издательство стандартов, 2012. – 42 с.
28. ГОСТ 5180-2015 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. – М.: Стандартинформ, 2016. – 23 с.
29. Грунтоведение / Е. М. Сергеев, Г. А. Голодковская, Р. С. Зиангиров, В. И. Осипов, В. Т. Трофимов. Под ред. Е. М. Сергеева. – М., Изд-во МГУ, 1983 г. – 392 с.
30. Дашко, Р. Э. Инженерно-геологический анализ и оценка водонасыщенных глинистых пород как основания сооружений: Институт «ПИ Геореконструкция» – СПб. 2015. – 380 с.
31. Дашко, Р. Э. Прогноз консолидации слабых глинистых оснований отвалов и хвостохранилищ. Тезисы докладов Всесоюзного совещания "Инженерно-

геологическое обоснование условий разработки месторождений полезных ископаемых". М., 1977. – С. 89-97.

32. Дашко, Р. Э. Физико-химическая природа набухания и осмотической усадки глинистых пород в основании сооружений по результатам экспериментальных исследований / Р. Э. Дашко, А. В. Шидловская // Записки Горного института. – 2013. – Т. 200. – С. 193-200.

33. Дашко, Р. Э., Каган, А. А. Об оценке физического состояния набухающих грунтов. – Расширенные тезисы докладов и сообщений научно-технической конференции изыскателей ин-та Гидропроект, М., 1969. – С. 31-38.

34. Дашко, Р. Э., Петров, Н. С., Крысов, О. Ю. Особенности состава и методики инженерно-геологических и гидрогеологических исследований при проектировании и эксплуатации хвостохранилищ на слабых глинистых основаниях. Сб. Гидрогеология и инженерная геология. Полевые методы исследований, Новочеркасск, 1981.

35. Демин, А. М. Закономерности проявлений деформаций откосов в карьерах. – М.: Наука, 1981. – 144 с.

36. Демин, А. М., Шушнина, О. И. Напряженное состояние и устойчивость отвалов на карьерах. – М., Недра, 1978. – 187 с.

37. Демин, А. М. Методика прогноза нарушений устойчивости открытых горных выработок и отвалов. – М., 1972. – 34 с.

38. Емельянова, Е. П. Основные закономерности оползневых процессов. М.: Недра, 1972. – 310 с.

39. Еремин, Г. М. Физико-технические и геомеханические процессы в насыпных породах на склонах. – М.: Горная книга, 2007. – 337 с.

40. Ермаков, И. И. Устойчивость отвалов на слабом основании / Ермаков И. И. // Труды ВНИМИ. Сб. 83. – Л., 1971. – с. 136-140.

41. Ермолов, В. А., Ларичев, Л. Н., Тищенко, Т. В., Кутепов, Ю. И. Горнопромышленная геология твердых горючих ископаемых. Ч. 7. – М.: Изд-во МГГУ, 2009. – 688 с.

42. Жариков, В. П. Инженерно-геологическое и гидрогеологическое обоснование эксплуатации и рекультивации гидроотвалов вскрышных пород Центрального Кузбасса: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.16 / Жариков Вениамин Петрович. – М., 2005. – 20 с.
43. Зиангиров, Р. С., Окнина, Н. А., Лаврова, Н. А. Изменение физико-механических свойств хвалынских глинистых пород под влиянием кислых техногенных вод. В кн.: Изменение геологической среды под влиянием деятельности человека. М.: Наука, 1982. С. 5-9.
44. Злочевская, Р. И., Королёв, В. А. Деформируемость глинистых грунтов при набухании. – Глава XVI в кн.: Физико-химическая механика природных дисперсных систем / Под ред Е.Д. Щукина и др. – М.: Изд-во МГУ, 1985. С. 196-208.
45. Зотеев, В. Г., Фролов, А. В. Совершенствование технологий отвалообразования на Ковдорском ГОКе. – М.: Горный журнал, 1981. – № 4.
46. Зурков, П. Э. Отвальные работы на карьерах. – М.: Углетехиздат, 1951, 354 с.
47. Иванов, И. П. Инженерная геология месторождений полезных ископаемых: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1990. – 302 с.
48. Ивочкина, М. А. Инженерно-геологическое обеспечение устойчивости отвалов фосфогипса: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.16. / Ивочкина Мария Александровна – СПб., 2013. – 172 с.
49. Изучение физико-механических свойств гипсосодержащих отходов производства фосфорной кислоты и пород в техногенных массивах «сухих» отвалов фосфогипса с установлением их нормативных значений для выполнения расчетов устойчивости при обосновании оптимальных параметров отвальных сооружений: отчет о НИР / Кутепов Ю. И. – СПб: Горный университет, 2012. – 93 с.
50. Инженерная геология СССР. В 8-ми томах. Т. 1. Русская платформа / Под ред. И. С. Комарова, Д. Г. Зилинга, В. Т. Трофимова. – М, 1978. – 528 с.
51. Иофис, М. А., Певзнер, М. Е., Попов, В. Н. Геомеханика. 2-е изд. – М.: Изд-во МГГУ, 2008. – 438 с.: ил.

52. Истомина, В. В., Наумов, И. К., Черненко, М. Б., Ялтанец, И. М. Терминология открытых горных работ / Под общ. ред. акад. В. В. Ржевского. М.: МГИ, 1987. – 95 с.
53. Кириченко, Ю. В. Инженерно-геологическое обеспечение экологической безопасности формирования техногенных массивов: дис. ... д-ра техн. наук: 25.00.16, 25.00.22 / Кириченко Юрий Васильевич. – М., 2001. – 386 с.
54. Коробанова, И. Г. Закономерности формирования свойств терригенных отложений. М.: Наука, 1983. – 112 с.: ил.
55. Коробанова, Т. Н. Изучение прочностных характеристик техногенных пород отвала БФ АО «АПАТИТ» / Т. Н. Коробанова // Успехи современной науки и образования. 2016. Т. 7. № 11. С. 113-117.
56. Коробанова, Т. Н. Исследование влияния технических вод на физико-механические свойства глинистых грунтов в основании отвала фосфогипса / Т. Н. Коробанова // Научные исследования и разработки 2018 года: сборник материалов IV Международной научно-практической конференции / Под общ. ред. С.С. Чернова. – Новосибирск: Издательство ЦРНС, 2018. – С. 165-171.
57. Коробанова, Т. Н. Мониторинг опасных геодинамических процессов при формировании отвала фосфогипса Балаковского Филиала АО «АПАТИТ» / Т. Н. Коробанова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 4. С. 405-408.
58. Коробанова, Т. Н. Российский и зарубежный опыт утилизации фосфогипса / Т. Н. Коробанова // Наука вчера, сегодня, завтра. 2016. № 11 (33). С. 63-71.
59. Котлов, Ф. В. Изменение геологической среды под влиянием деятельности человека. – М.: Недра, 1978. – 263 с.
60. Крячко, О. Ю. Управление отвалами открытых горных работ / О. Ю. Крячко. – Москва: Недра, 1980. – 255 с.
61. Кудашов, Е. С. Инженерно-геологическое обоснование устойчивости намывных гипсонакопителей: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.16. / Кудашов Егор Сергеевич – СПб., 2015. – 210 с.

62. Кульчицкий, Л. И., Усъяров, О. Г. Физико-химические основы формирования свойств глинистых пород. М.: Недра, 1981. – 178 с.
63. Кутепов, Ю. И., Кутепова, Н. А. Закономерности формирования техногенных пород при отвалообразовании // Труды ВНИМИ, сб. «Исследование сдвижения горных пород и гидрогеомеханических процессов в массивах сложной структуры при разработке месторождений». – СПб, ВНИМИ, 1992, С. 83-96.
64. Кутепов, Ю. И. Научно-методические основы инженерно-геологического обеспечения отвалообразования при разработке угольных месторождений: дис. ... д-ра техн. наук: 05.15.15 / Кутепов Юрий Иванович. – М., 1999. – 351 с.
65. Кутепов, Ю. И., Васильева, А. Д. Инженерно-геологические условия внешнего отвалообразования на разрезах Кузбасса / Ю. И. Кутепов, А. Д. Васильева // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 10. С. 122-131.
66. Кутепов, Ю. И., Кутепова, Н. А. Основные закономерности деформирования «сухих» отвалов при размещении их на гидроотвалах // Труды ВНИМИ, сб. «Совершенствование методов расчета сдвижения и деформаций горных пород, сооружений, бортов разрезов при разработке угольных пластов в сложных горно-геологических условиях». – Л., 1985. – С. 66-72.
67. Кутепова, Н. А. Закономерности оползневых процессов на подрабатываемых территориях / Н. А. Кутепова // Геоэкология. – 2005. – №5. – С. 431-441.
68. Кутепова, Н. А. Инженерно-геологические условия формирования свойств техногенных отложений углеобогачительных фабрик: дис. ... канд. геол.-мин. наук: 25.00.08 / Кутепова Надежда Андреевна. – Л., 1987. – 250 с.
69. Кутепова, Н. А. Инженерно-геологическое обоснование прогноза гидрогеомеханических процессов при ведении горных работ: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 25.00.16 / Кутепова Надежда Андреевна. – СПб., 2010. – 39 с.
70. Кутепова, Н. А. Инженерно-геологическое обоснование прогноза гидрогеомеханических процессов при ведении горных работ: дис. ... д-ра техн. наук: 25.00.16 / Кутепова Надежда Андреевна. – СПб., 2011. – 424 с.

71. Кутепова, Н. А., Коробанова, Т. Н. Особенности развития деформаций отвалов фосфогипса в г. Балаково Саратовской области / Н. А. Кутепова, Т. Н. Коробанова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 10. С. 132-140.
72. Кутепова, Н. А., Коробанова, Т. Н. Особенности развития деформаций отвалов фосфогипса / Н. А. Кутепова, Т. Н. Коробанова // Горные науки и технологии. 2017. № 1. С. 31-39.
73. Ларионов, А. К. Особенности фильтрации воды в хвалынских глинах. – ДАН СССР, 1955, Т. 102, № 6. С. 1201-1202.
74. Ломтадзе, В. Д. Инженерная геология. Специальная инженерная геология. Л.: Недра, 1978. – 496 с.
75. Макшаев, Р. Р., Ощепков, Г. В., Хомченко, Д. С. Палеогеография хвалынской эпохи Северного Прикаспия // Изменение климата и природной среды Северной Евразии: анализ, прогноз, адаптация. М.: ГЕОС, 2014. С. 169-171.
76. Маслов, Н. Н. Длительная устойчивость и деформация смещения подпорных сооружений. – М.: Энергия, 1968. – 160 с.
77. Маслов, Н. Н. Механика грунтов в практике строительства (Оползни и борьба с ними). – М.: Стройиздат, 1977. – 320 с.
78. Маслов, Н. Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии. Изд. 2-е. – М.: Высшая школа, 1968. – 629 с.
79. Мельников, Н. В. Механизация отвальных работ на открытых разработках. – М.: Углетехиздат, 1954, 504 с.
80. Мельников, Н. Н. Теория и принципы механизации отвалообразования на карьерах. – М.: Наука, 1968. 385 с.
81. Месчян, С. Р. Механические свойства грунтов и лабораторные методы их определения. – М.: Недра, 1974. – 192 с.
82. Месчян, С. Р. Начальная и длительная прочность глинистых грунтов. М.: Недра, 1978. – 207 с.

83. Методические рекомендации по устройству оснований дорожных одежд с использованием свежего фосфополугидрата сульфата кальция. – Москва: СОЮЗДОРНИИ, 1987. – 20 с.
84. Методические указания по расчету устойчивости и несущей способности отвалов. – Л.: Изд-во ВНИМИ, 1987. – 126 с.
85. Мещеряков, Ю. Г., Федоров, С. В. Промышленная переработка фосфогипса. – СПб: Стройиздат, 2007. – 104 с.
86. Мосейкин, В. В. Геолого-экологическая оценка намывных техногенных массивов хранилищ горнопромышленных отходов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.15.15 / Мосейкин Владимир Васильевич. – М., 2000. – 359 с.
87. Научно-техническая оценка возможного водопонижения в теле отвала фосфогипса с помощью горизонтального дренажа для условий ООО «БМУ»: отчет о НИР / Кутепов Ю. И. – СПб: Горный университет, 2013. – 69 с.
88. Нерпин, С. В., Дерягин, Б. В. Поверхностные явления в механике грунтов / Исследования в области поверхностных сил. М., 1961. С. 156-161.
89. Нерпин, С. В., Котов, А. И., Раев, В. А. Природа сжимаемости глинистых грунтов / Труды Ленингр. инс-та инженеров водн. транспорта. Вып. 26. Л., 1959. С. 105-111.
90. О промышленной безопасности опасных производственных объектов: федер. закон от 20 июня 1997 № 116-ФЗ // принят Гос. Думой РФ. – 1997. – 24 с.
91. Огородников, Е. Н. Техногенные грунты: учебное пособие / Е. Н. Огородников, С. К. Николаев. – Москва: Изд-во МГУ, 2004. – 250 с.
92. Орадовская, А. Е. Гидрогеологическая роль фильтрации в глинах. В сб.: Исследование фильтрации через глинистые породы. Вып. 152, М., 1983. С. 14-19.
93. Орадовская, А. Е. Определение сорбционной способности грунтов в целях прогноза распространения промстоков в подземных водах. – Труды ВСЕГИНГЕО, 1969. Вып. 14. С. 160-173.
94. Освоение техногенных массивов на горных предприятиях // А. М. Гальперин, Ю. И. Кутепов и др. – М.: Издательство «Горная книга», 2012. – 336 с.

95. Осипов, В. И., Соколов, В. Н. Прочность дисперсных грунтов. В кн. Физико-химическая механика природных дисперсных систем. М.: Изд-во Моск. ун-та. Гл. XII, 1985. С. 147-158.
96. Оценка степени уплотнения фосфогипса при наращивании отвала до высоты 100 м на ООО «БМУ»: отчет о НИР / Кутепов Ю. И. – СПб, Горный университет, 2013. – 69 с.
97. Панюков, П. Н. Геомеханика отвальных работ на карьерах / П. Н. Панюков, В. В. Ржевский, В. В. Истомина, А. М. Гальперин. – М.: Недра, 1972. – 182 с.
98. Панюков, П. Н. Инженерная геология. – М.: Недра, 1978. – 269 с.
99. Певзнер, М. Е. Деформации горных пород на карьерах. – М.: Недра, 1992. – 234 с.: ил.
100. Певзнер, М. Е., Попов, В. Н., Макаров, А. Б. Геомеханика. М., изд. МГГУ, 2012. – 345 с.
101. Попов, В. Н., Шпаков, П. С., Юнаков, Ю. Л. Управление устойчивостью карьерных откосов: Учебник для вузов / В. Н. Попов, П. С. Шпаков, Ю. Л. Юнаков. – Москва: Горная книга, 2008. – 683 с.: ил.
102. Попов, И. В. Инженерная геология / И. В. Попов. – М.: Геолитдат, 1951. – 444 с.
103. Попов, С. В. Разработка методов обеспечения устойчивости отвалов на слабом основании: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 25.00.16. / Попов Сергей Владиславович – М., 2003. – 25 с.
104. Попов, С. И. Деформации отвалов на открытых горных работах / «Горный журнал», 1945, № 7-8, с. 3-6.
105. Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах. (Минтопэнерго РФ, РАН, Гос. НИИ горн. геомех. и маркшейд. дела – Межотраслевой научн. центр ВНИМИ). – СПб, 1998. – 208 с.
106. Приклонский, В. А., Горькова, И. М., Окнина, Н. А. Инженерно-геологические особенности хвалынских глинистых пород в связи с условиями их формирования // Труды лаборатории гидрогеологических проблем. М.: АН СССР. Том 13, 1956. – 152 с.

107. Проведение комплекса инженерно-геологических работ по обоснованию увеличения высоты отвала фосфогипса ООО «Балаковские минеральные удобрения» до 100 м: отчет о НИР / Кутепов Ю. И. – СПб, Горный Университет, 2012. – 104 с.
108. Пындак, В. И. Геоэкологические особенности почв и водных ресурсов Нижнего Поволжья // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее образование. – 2013. – № 1 (29). – С. 163-169.
109. Разработка системы мониторинга устойчивости откосов существующего отвала фосфогипса ООО «Балаковские минеральные удобрения»: отчет о НИР / Кутепов Ю. И. – СПб, Горный университет, 2011. – 106 с.
110. Рекомендации по лабораторным методам определения характеристик набухающих грунтов. М., Стройиздат, 1974. – 19 с.
111. Реутова, Н. С. Инженерно-геологические свойства хвалыньских шоколадных глин в связи с условиями их формирования // Труды лаборат. гидрогеол. проблем им. Ф. П. Саваренского», т. XV. М., 1957. С. 162-172.
112. Ржевский, В. В. Проектирование контуров карьеров. – М.: Metallurgizdat, 1956. – 230 с.
113. Русский, И. И. Технология отвальных работ и рекультивация на карьерах / И. И. Русский. – Москва: Недра, 1979. – 221 с.
114. Сафохина, И. А., Монюшко, А. М. Закономерности изменения состава свойств морских хвалыньских глин на подтопленных территориях. – В кн.: Инженерно-геологические процессы и свойства грунтов. М., 1980.
115. Сорочан, Е. А. Строительство сооружений на набухающих грунтах. М.: Стройиздат, 1974. – 224 с.
116. Сорочан, Е. А., Горлова, А. Р. Влияние набухания и усадки грунта на поведение зданий и сооружений. В кн.: Инженерно-геологические проблемы градостроительства (мат-лы научно-техн. совещания в Баку). Изд-во МГУ, 1971.
117. Сухаревский, В. М. Деформации породных отвалов / В. М. Сухаревский, А. П. Стельмах, И. С. Фридман. – К.: Техника, 1970. – 108 с.

118. Теоретические основы инженерной геологии. Физико-химические основы / Под ред. акад. Сергеева Е. М. – М.: Недра, 1985. – 288 с.
119. Технический отчет о разработке рекомендаций по складированию на отвале ООО «БМУ» фосфогипса с учетом его физико-механических свойств (разработчик ОАО «Инженерный центр энергетики Поволжья») – г. Самара, 2009 г.
120. Указания по методам гидрогеомеханического обоснования оптимальных параметров гидроотвалов и отвалов на слабых основаниях. Часть I. Изучение гидрогеомеханических условий строительства и рекультивации отвальных сооружений / Ю. И. Кутепов, Ю. А. Норватов, Н. А. Кутепова и др. – Л.: Изд-во ВНИМИ, 1989. – 55 с.
121. Указания по методам гидрогеомеханического обоснования оптимальных параметров гидроотвалов и отвалов на слабых основаниях. Часть II. Обоснование оптимальных параметров отвальных сооружений // Ю. И. Кутепов, Ю. А. Норватов, Н. А. Кутепова и др. – Л.: Изд-во ВНИМИ, 1990. – 51 с.
122. Фисенко, Г. Л. Прочностные характеристики массива горных пород // Механика горных пород и маркшейдерское дело. – М.: Углетехиздат, 1959. С. 91-100.
123. Фисенко, Г. Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов / Г. Л. Фисенко. – М.: Недра, 1965. – 378 с.
124. Фисенко, Г. Л., Веселков, В. И. Исследование ползучести глинистых горных пород при испытаниях на сдвиг / Г.Л. Фисенко // Наукова думка. – 1970. – с. 203-211.
125. Флорин, В. А. Основы механики грунтов. Том 1. Л.-М.: Госстройиздат, 1957. – 357 с.
126. Фосфатно-сырьевая база России: новые технологии и перспективы освоения / Непряхин А. Е., Сенаторов П. П., Карпова М. И. // Горная техника. 2009. № 4. С. 136 – 144.
127. Фосфогипс и его использование / В. В. Иваницкий, П. В. Классен, А. А. Новиков и др. – М.: Химия, 1990. – 224 с.

128. Цытович, Н. А. Механика грунтов. М.: Госстройиздат, 1979. – 638 с.
129. Цытович, Н. А., Тер-Мартirosян, З. Г. Основы прикладной геомеханики в строительстве. М.: Высшая школа. 1981. – 317 с.
130. Чистякова, И. А. Вещественный состав отложений раннехвалынской трансгрессии // Бюлл. Комиссии по изуч. четв. периода. № 64. 2001. С. 60-69.
131. Шаров, В. С. Природа глины и ее отношение к воде и водным растворам. – В кн.: Гидрогеология и инженерная геология, сб. 5, М.-Л., Госгеолиздат, 1940.
132. Шестаков, В. М. Гидрогеомеханика / В. М. Шестаков. – М.: МГУ. – 1998. – 72 с.
133. Шестаков, В. М. О кинетике сорбции на грунтах. – В сб. Гидрогеологические вопросы подземного захоронения промышленных стоков. Труды ВСЕГИНГЕО, 1969. Вып. 14. С. 23-42.
134. Шешко, Е. Ф. Разработка месторождений полезных ископаемых открытым способом. – М.: Углетехиздат, 1949, 450 с.
135. Шпаков, П. С. Статистическая обработка экспериментальных данных / П. С. Шпаков, В. Н. Попов. – М.: Горная книга, 2003. – 268 с.
136. Шукле, Л. Реологические проблемы механики грунтов. – М.: Стройиздат, 1976. – 485 с.
137. Яценко, В. А. Исследования шоколадных глин в красноармейском районе Волгограда. – В сб.: Строительство на набухающих грунтах. М.: Стройиздат, 1963. – 71 с.
138. Best Available Techniques for Pollution Prevention and Control in the European Fertilizer Industry, Booklet No. 4 of 8: Production of phosphoric acid. England, 2000. – 48 p.
139. Fuleihan, N. F., Phosphogypsum disposal – the pros & cons of wet versus dry stacking. Florida, 2011. – 11 p.
140. H. Tayibi, M. Choura, F. A. López, F. J. Alguacil and A. López-Delgado. Environmental Impact and Management of Phosphogypsum (Review) // Journal of Environmental Management, Vol. 90, 2009, pp. 2377-2386.

141. Hilton, J. Phosphogypsum (PG): uses and current handling practices worldwide // Proceedings of the 25th Annual Lakeland Regional Phosphate Conference. London UK, 1994. – 53 p.
142. Korobanova, T. N. Dangerous geodynamic processes accompanying dump's formation / T. N. Korobanova // Applied and Fundamental Studies: Proceedings of the 8th International Academic Conference. – St. Louis: Science and Innovation Center Publishing House, 2015. – PP. 84-90.
143. Korobanova, T. N. Phosphogypsum storage and its functioning in the fertilizer industry of Balakovo (SE Russia) and overriding stability factors / T. N. Korobanova // Scientific Reports on Resource Issues: Efficiency and Sustainability in the Mineral Industry. – Freiberg: TU Bergakademie Freiberg, 2016. – Vol.1. – PP. 94-98.
144. Larionov, M. V. Scheme technogenic stress of natural and artificial landscapes of the Saratov and Volgograd regions // Теоретические и прикладные вопросы науки и образования: в 16 ч. Ч. 15. Тамбов, 2015. С. 8-9.
145. Lee, W. Abramson, Thomas, S. Lee, Sunil, Sharma, Glenn, M. Boyce. SLOPE STABILITY AND STABILIZATION METHODS. Second Edition // Library of Congress Cataloging in Publication Data. – Canada, 2007. – 712 p.
146. Pe´rez-Lo´pez, R., A´lvarez-Valero, A. M., Nieto, J. M. Changes in mobility of toxic elements during the production of phosphoric acid in the fertilizer industry of Huelva (SW Spain) and environmental impact of phosphogypsum wastes. Journal of Hazardous Materials 148. – Spain, 2007 – pp. 745-750.
147. Potential uses of phosphogypsum and associated risks. Background information document. Florida Institute of Phosphate Research. April 1992. 114 p.
148. R. F. Gennari, I. Garcia, N. H. Medina, M.A.G. Silveira. Phosphogypsum analysis: total content and extractable element concentrations. International Nuclear Atlantic Conference. – Brazil, 2011. – 9 p.
149. Sarma, S. K. Stability analysis of embankments and slopes // Geotechnique, 1973. – № 23 (3). – pp. 423-433.
150. Spencer, E. A Method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces // Geotechnique, 1967. – vol. 17. №. 1. – pp. 11-26.

151. Terzaghi, K. Soil mechanics in engineering practical. Third Edition / K. Terzaghi. – New York, 1996. – 487 p.
152. USEPA, “Code of Federal Regulations,” Title 40, Vol. 7, Parts 61.202 and 61.204 (40CFR61.202 and 40CFR61.204), 1998.