

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(СПбГУ)

Институт наук о Земле  
Кафедра грунтоведения и инженерной геологии

**Соловьева Наталья Владимировна**  
**Выпускная квалификационная работа**  
**Инженерно-геологическое обеспечение устойчивости отвальных сооружений отходов**  
**химической промышленности Балаковского района Саратовской области**

Направление 05.03.01 «Геология»  
Основная образовательная программа бакалавриата СВ.5018.2017

Научный руководитель:  
ст. преподаватель кафедры гидрогеологии,  
канд. техн. наук  
Кудашов Егор Сергеевич

Рецензент:  
канд. геол.-минерал. наук  
Поспехов Георгий Борисович

Санкт-Петербург  
2021

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	2
1. Общая характеристика территории объекта .....	3
1.1. Административное положение .....	3
1.2. Геотектоническое положение .....	5
1.3. Стратиграфия.....	7
1.4. Геоморфология.....	13
1.5. Гидрография .....	15
1.6. Климат.....	17
2. Факторы, определяющие устойчивость отвальных сооружений на предприятии Балаковский Филиал АО «Апатит» .....	19
2.1. Общие представления об объекте исследования.....	19
2.2. Инженерно-геологическое строение техногенного массива отвального сооружения .....	22
3. Оценка устойчивости откосов отвала Фосфогипса Балаковского Филиала АО «Апатит».....	27
3.1. Анализ результатов геодезического мониторинга .....	27
3.2. Оценка устойчивости откосов отвала на оползневом участке.....	37
3.3. Рекомендации по обеспечению устойчивости откосов отвала ....	54
Заключение.....	51
Список литературы.....	52

## ВВЕДЕНИЕ

Разработка месторождений полезных ископаемых и переработка минерального сырья предполагает неизбежное образование отходов, некоторые из которых представляют собой полезный продукт, который впоследствии может быть использован. Так, например, во время производства экстракционной фосфорной кислоты из апатитов и фосфоритов в больших объемах образуется попутный продукт – фосфогипс. Фосфогипс может быть использован в сельском хозяйстве, в цементной и химической промышленности, а также в некоторых других отраслях. Но на сегодняшний день востребованность фосфогипса, как минерального ресурса в России составляет не более 5 % от получаемых объемов, оставшаяся часть отправляется на длительное хранение в отвальное хозяйство. Ускорение темпов производства все сильнее обостряет проблему размещения фосфогипса, так как увеличение площадей хранения продуктов химической промышленности рядом с крупными городами осложняется недостатком доступных площадей и ужесточением природоохранных требований. Наиболее рациональным решением данной проблемы может быть увеличение отвалоемкости уже имеющихся сооружений путем наращивания их высоты.

Образование высоких отвалов на естественном основании сопряжено с возможным риском нарушения их устойчивости и возникновения оползневых процессов. Соответственно, обеспечение устойчивости отвалов требует геомеханического обоснования оптимальных проектных параметров сооружения.

Балаковский Филиал АО «Апатит» является одним из объектов, нуждающихся в проведении специальных исследований для обоснования устойчивости. Предприятию ежегодно нужно размещать около 3 млн т фосфогипса, а недостаток площади, отведенной под отвальное хозяйство, предполагает необходимость непрерывного увеличения высоты. Но уже сейчас эксплуатация отвала осложнена оползневыми процессами, представляющими угрозу для транспортных средств и инженерных сооружений.

Главной целью данной работы является обоснование устойчивости действующего отвального сооружения и определение необходимых параметров для увеличения высоты отвала.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить инженерно-геологические условия отвала БФ АО «Апатит»
2. Изучить гидрогеологические условия отвала БФ АО «Апатит»
3. Проинтерпретировать данные геодезического мониторинга
4. Произвести необходимые расчеты устойчивости откосов

# 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРРИТОРИИ ОБЪЕКТА

## 1.1. Административное положение

В административном отношении исследуемый объект находится в Балаковском районе Саратовской области Приволжского федерального округа Российской Федерации, на 8 км юго-восточнее города Балаково (рис.1 и рис.2).

Балаково считают маленьким сердцем Поволжья, так как он расположен практически в центре европейской части России. Сегодня в нем проживают более 196 тысяч человек. Здесь сконцентрированы мощные энергетические комплексы: Саратовская ГЭС, Балаковская АЭС, городская теплоцентраль. Кроме того, тут развиты химическая промышленность и машиностроение, действует крупный грузовой порт, железнодорожный вокзал, имеются автомобильный и железнодорожный переезды через Волгу по плотине Саратовской ГЭС [20]. В СМИ город Балаково и Балаковский район часто называют «локомотивом экономического развития Саратовской области».



Рисунок 1. Местоположение Саратовской области (на рисунке выделена красным цветом) на территории Российской Федерации и Приволжского федерального округа (на рисунке закрашен желтым цветом).

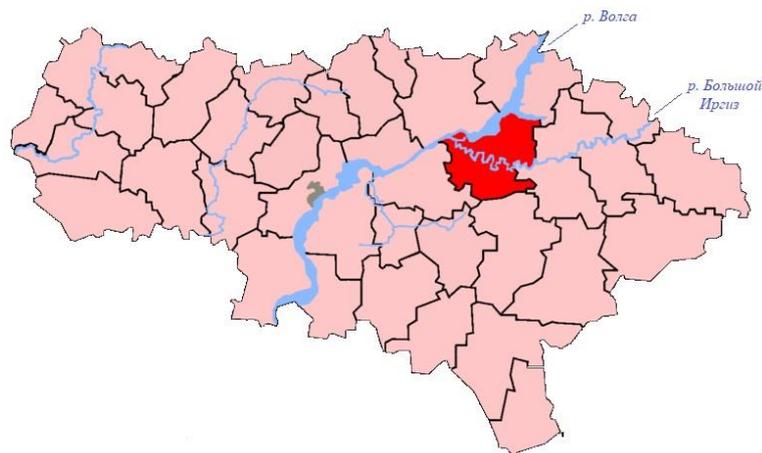


Рисунок 2. Местоположение Балаковского района на территории Саратовской области.

Объект исследования непосредственно расположен на территории филиала БФ АО «Апатит», одного из ведущих агротехнических предприятий России, находящегося на междуречье Саратовского канала и реки Большой Иргиз (рис.3). Территория представляет собой промышленную зону. Общая площадь предприятия составляет 5 625 090 м<sup>2</sup>, сообщение с городом Балаково осуществляется при помощи автомобильной и железной дорог.

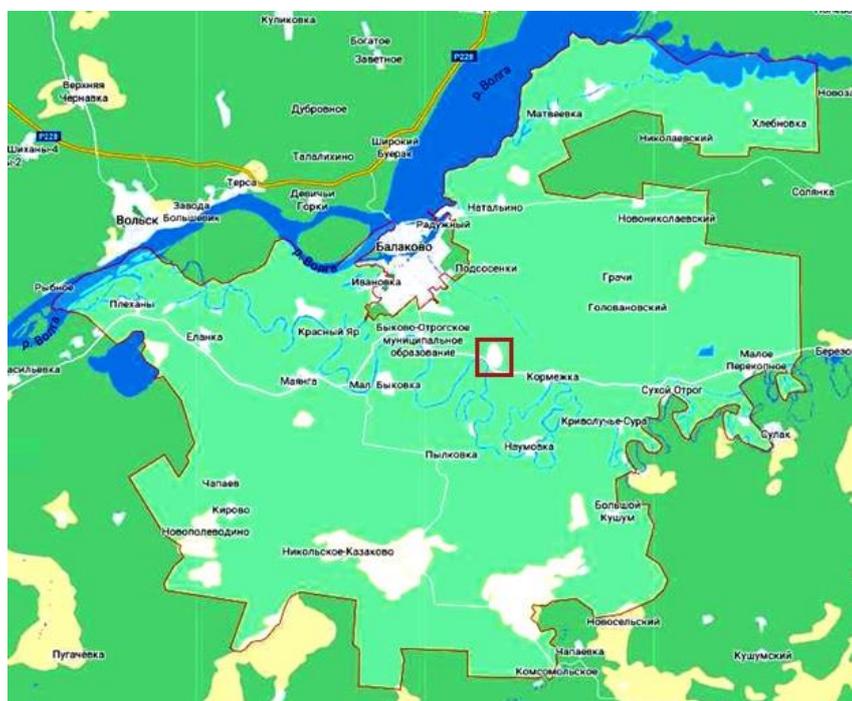


Рисунок 3. Местоположение филиала АО «Апатит» на территории Балаковского района.

## 1.2. Геотектоническое положение

В геотектоническом плане объект расположен в южной части Волго-Уральской антеклизы, занимающей значительную территорию на востоке Восточно-Европейской платформы [9]. На севере и северо-востоке данная геологическая структура ограничивается Вычегодской впадиной и частью Предтиманского прогиба. На юге она по системе ступенчатых разломов граничит с Прикаспийской впадиной, на западе антеклиза отделяется от Московской синеклизы достаточно крутым уступом, выраженным в фундаменте и в чехле. На юго-западе через Рязано-Сердобскую седловину Волго-Уральская антеклиза сочленяется с Воронежской антеклизой (рис.4) [9].

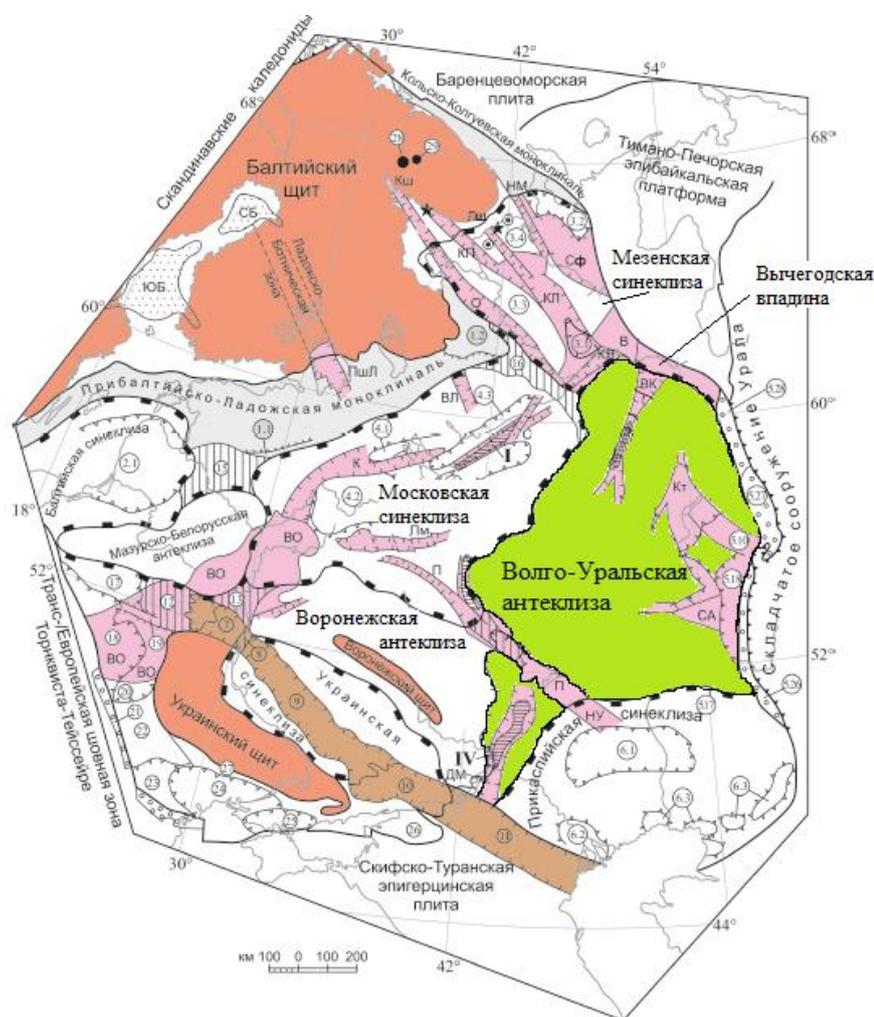


Рисунок 4. Геотектоническое районирование Восточно-Европейской платформы.

В основании антеклизы находится сильно расчлененный массив кристаллического фундамента, протягивающийся почти на 800 км по широте и 1000 км по долготе. Глубина залегания фундамента меняется от 0,8 – 1,5 до 2,5 – 3 км на сводах и увеличивается до 4 - 5 км на склонах антеклизы (в южных и юго-восточных районах – до 8 – 12 км. В направлении

прилегающих к антеклизе впадин происходит ступенчатое опускание фундамента по разломам с амплитудой до нескольких километров, в основном на юго-западной, южной и юго-восточной ее границах. Поверхность фундамента антеклизы – совокупность изометричных поднятий-сводов, куполов, отдельных выступов и мульд, впадин и грабенообразных прогибов, определенных соответствующей тектонической зональностью [9].

Еще до образования антеклизы рассматриваемый регион отвечал континентальной окраине материка Лавруссия. Накопление осадков и образование платформенного чехла в этой области начинается со среднего девона, после обширной трансгрессии в эмском веке (ранний девон) и последующего неравномерного погружения территории. Связь между восточным и среднеевропейским бассейнами в это время была прервана, а Волго-Уральское поднятие представляло собой «остров». В первую очередь заполнялись рифтовые впадины, внутри которых накапливались песчаные породы, иногда в разрезе авлакогенов в небольшом объеме встречаются также вулканогенные образования. Мощность таких отложений составляет от 500-600 до 1000 м. Нижняя часть франского яруса (поздний девон) представлена песчано-алеврито-глинистой толщей изменчивой по простиранию мощности. Средняя часть франского яруса сложена органогенными известняками с прослоями битуминозных сланцев и известково-кремнистых пород. На границах прогибов-рифтов встречаются рифовые постройки. Накопление осадков этого возраста происходило в глубоководной обстановке в условиях быстрого погружения на востоке. Верхняя часть франского, фаменский ярус и карбон сложены морскими карбонатными отложениями, представляющими собой нефтематеринский комплекс. Концентрация нефти начинается в визейских карбонатах и продолжается вплоть до верхнего карбона. Общая мощность каменноугольных отложений составляет около одного километра. В конце перми произошли деформации коллизионного характера на Урале, приведшие к сжатию этого региона и инверсии ряда авлакогенов в валы, антиформные структуры [9].

В Восточно-Русском бассейне пермские отложения существенно изменяются в широтном и долготном направлениях. В конце карбона-начале перми образуется Урал, который испытывает постепенное воздымание в течение перми, а вдоль его западного борта возникает Предуральский краевой прогиб [2]. В начале перми темп погружения в Предуральском прогибе превышает скорость седиментации, и в течение аксея, сакмара и артина накапливаются маломощные глубоководные глинисто-кремнисто-карбонатные толщи. Суммарная мощность отложений нижней перми составляет от 100 до 500 м. В середине перми прогиб заполняется эвапоритами и сносимым с Урала обломочным материалом, западнее преобладают лагунные отложения. К концу перми и в начале триаса по мере усиления воздымания Урала обломочный материал начинает разноситься вглубь континента. В

середине триаса опускание рассматриваемой территории прекращается, а в каких-то участках даже начинается незначительное поднятие. В конце триаса на рубеже герцинского и альпийского циклов, почти вся территория была осушена и временно вовлечена в общее поднятие, произошел перерыв в осадконакоплении [9].

В юрском периоде произошло эвстатическое повышение уровня Мирового океана, раскрытие окраинных морей океана Тетис. Оно начинается в средней юре, а в позднеюрскую эпоху распространяется на северо-восток, в результате чего южный шельфовый бассейн соединился с северным морем, занимавшим современные бассейны Северной Двины и Печоры. Характерными отложениями среднеюрского возраста являются песчано-глинистые породы, а в конце юры – глинистые осадки небольшой мощности. Меловые отложения представлены маломощными разновидностями песчано-глинистых пород [9].

На территории Волго-Уральской антеклизы выделяется ряд синформных и антиформных структур. Объект находится в пределах Ульяновско-Саратовского прогиба, в северо-восточной его части, на стыке с Жигулевско-Пугачевским сводом. Ульяновско-Саратовский прогиб является крупной наложенной структурой мезозой-кайнозойской эпохи. Его размеры составляют около 125 тыс. км<sup>2</sup>. Прогиб сформировался в ранней юре на размытой поверхности позднепалеозойских отложений [9].

### 1.3. Стратиграфия

Исследуемая территория сложена различными образованиями палеозой-мезозойского возраста, образующими единую субгоризонтальную структуру, поэтому в пределах данной области можно установить один структурно-формационный комплекс (рис.5 и 5а). Нижняя возрастная граница комплекса – средний девон, верхняя граница – поздняя юра.

В объеме данного структурно-формационного комплекса выделяются два подкомплекса, разделенных параллельным несогласием, но значительным перерывом в осадконакоплении. Нижний подкомплекс имеет среднедевонский-позднекаменноугольный возраст. Верхний подкомплекс имеет средне-позднеюрский возраст.

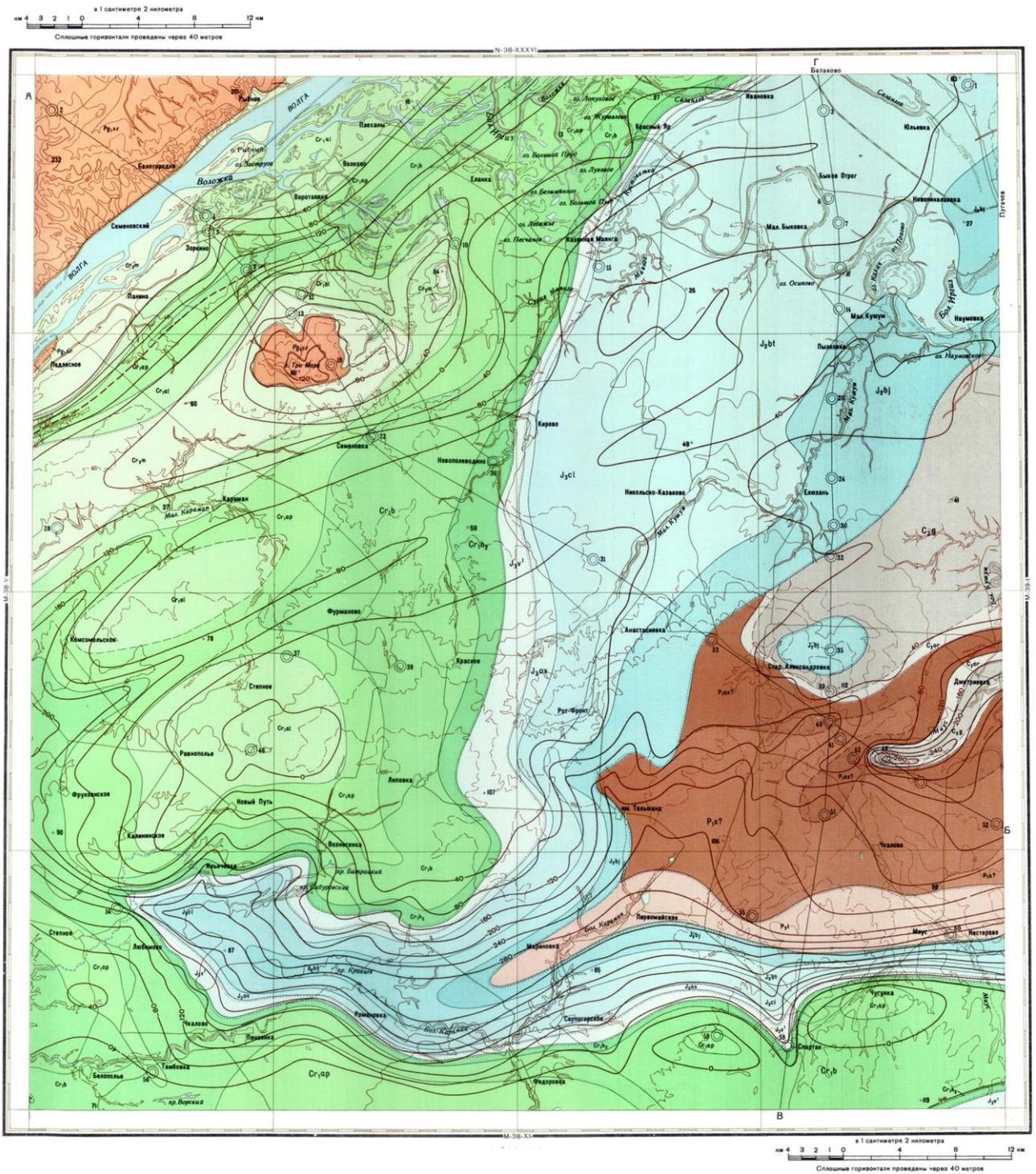


Рисунок 5а. Геологическая карта дочетвертичных отложений центральной части Балаковского района.

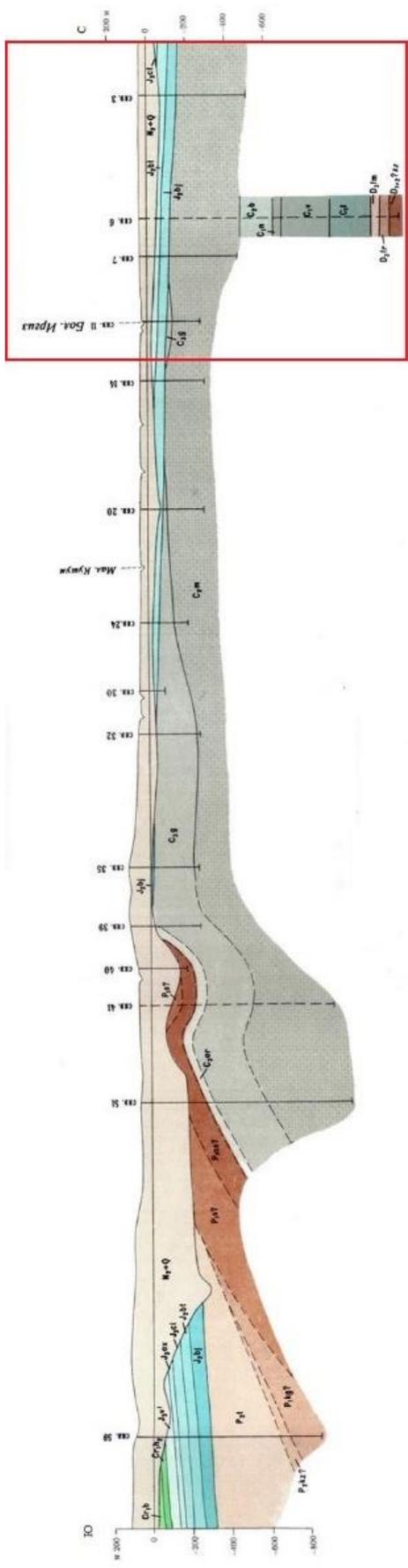


Рисунок 5. Геологический разрез Балаковского района субмеридианального направления. (Исследуемая территория отмечена на рисунке красным прямоугольником.)

## Палеозойская эратема

### Девонская система

Девонские отложения залегают с угловым несогласием и большим стратиграфическим перерывом на породах фундамента или верхнего рифея. Они представлены образованиями среднего и верхнего отделов. Отложения этого возраста в пределах исследуемой территории не выходят на дневную поверхность и были установлены только в скважинах.

#### Средний отдел

##### Казанлинская свита ( $D_{1-2\text{ kz}}$ )

Мощность отложений казанлинской свиты не превышает 49 метров. Породы свиты представлены красно-бурыми кварцитоподобными песчаниками с псилофитами.

#### Верхний отдел

##### Франский ярус ( $D_{3\text{ fr}}$ )

Мощность отложений франского яруса в пределах изучаемой территории составляет около 66 метров. Породы данного возраста представлены терригенно-глинистыми отложениями: песчаниками, аргиллитами и алевролитами в нижней части разреза, и известняками с органическими остатками в верхней части.

##### Фаменский ярус ( $D_{3\text{ fm}}$ )

Мощность отложений фаменского яруса в данной области составляет примерно 50 метров. Образования яруса сложены карбонатными породами: доломитами и известняками с органическими остатками.

### Каменноугольная система

Каменноугольные отложения согласно налегают на нижележащие осадочные толщи пород девонского возраста. Они представлены образованиями нижнего среднего и верхнего отделов. Также, как и девонские породы, каменноугольные отложения были установлены только по скважинам.

#### Нижний отдел

##### Турнейский ярус ( $C_{1\text{ t}}$ )

Мощность отложений турнейского яруса составляет чуть более 200 метров. Породы яруса представлены известняками с прослоями глин.

##### Визейский ярус ( $C_{1\text{ v}}$ )

Мощность отложений визейского яруса составляет примерно 260 метров. Отложения этого возраста сложены известняками с прослоями глин в нижней части разреза. В верхней

части в объеме отложений помимо карбонатных пород и глин появляются терригенные образования, представленные песчаниками.

#### Намюрский ярус ( $C_{1n}$ )

Мощность отложений намюрского яруса составляет около 40 метров. Породы яруса представлены органогенными известняками.

#### Средний отдел

#### Башкирский ярус ( $C_{2b}$ )

Мощность отложений башкирского яруса составляет примерно 180 метров. Породы этого возраста представлены органогенными известняками в нижней части. Вверх по разрезу они сменяются терригенно-глинистой толщей переслаивающихся песчаников и глин.

#### Московский ярус ( $C_{2m}$ )

Мощность отложений московского яруса составляет около 400 метров. Породы яруса представлены терригенно-глинистыми отложениями в нижней части разреза. Выше они сменяются карбонатными породами: доломитами и органогенными известняками.

#### Верхний отдел

#### Гжельский ярус ( $C_{3g}$ )

Отложения этого возраста сохранились только в районе долины реки Большой Иргиз, они имеют незначительную мощность, примерно 20-30 метров. Породы данного яруса представлены карбонатными образованиями: органогенными известняками и доломитами.

#### Мезозойская эратема

#### Юрская система

Породы юрского возраста залегают на нижележащих каменноугольных отложениях с небольшим угловым, а в отдельных областях даже с параллельным несогласием, но со значительным перерывом в осадконакоплении. Отложения юрской системы представлены образованиями среднего и верхнего отделов.

#### Средний отдел

#### Байосский ярус ( $J_{2bj}$ )

Мощность отложений байосского яруса составляет около 60 метров. Они представлены глинами, песчаниками и алевролитами, включающими органические остатки.

#### Батский ярус ( $J_{2bt}$ )

Мощность отложений батского яруса незначительная и составляет примерно 10-20 метров. Образования данного возраста сложены глинами, песчаниками и алевролитами с органическими остатками.

#### Верхний отдел

#### Келловейский ярус ( $J_{3cl}$ )

Породы келловейского яруса имеют ограниченное распространение и встречаются только в северной части исследуемого района, на южной периферии города Балаково и севернее. Мощность отложений яруса составляет около 10-15 метров. Образования этого возраста представлены глинами в нижней части разреза. Выше они сменяются мергелями и песчаниками.

#### Неогеновые и четвертичные отложения

Неогеновые и четвертичные отложения распространены практически повсеместно и представлены осадками плиоценового, плейстоценового и голоценового возрастов. Они плащеобразно покрывают нижележащие толщи.

#### Неогеновая система

##### Плиоцен

#### Акчагыльский ярус ( $N_2^{ak}$ )

Мощность образований акчагыльского яруса составляет около 30 метров. Отложения представлены глинами, включающими органические остатки, в нижней части разреза и толщей переслаивающихся песков и алевритов.

#### Четвертичная система

##### Плейстоцен

#### Хазарский горизонт ( $Q_{II\ hz}$ )

Мощность отложений хазарского горизонта составляет примерно 10-15 метров. Образования этого возраста представлены песками и имеют аллювиальный генезис.

#### Нижнехвалынский подгоризонт ( $Q_{III\ hv1}$ )

Мощность отложений нижнехвалынского подгоризонта составляет 4-6 метров. Образования этого яруса имеют речное происхождение, они представлены голубыми суглинками.

#### Верхнехвалынский подгоризонт ( $Q_{III\ hv2}$ )

Мощность отложений верхнехвалынского подгоризонта примерно 3-5 метров. Породы этого возраста имеют лиманно-морской генезис, то есть они накопились в условиях залива с извилистыми невысокими берегами, образовавшегося при затоплении морем долин равнинных рек в результате погружения прибрежных частей суши. Образования подгоризонта представлены «шоколадными» глинами. Особенный окрас глин объясняется высоким содержанием в них окислов железа, так как осадконакопление происходило в условиях слабощелочной среды ( $pH=8$ ) и достаточного насыщения бассейна кислородом. Породы имеют тонкую горизонтальную слоистость, которая обусловлена пропластками и налетом пылевато-песчаного материала. При подсыхании и выветривании глины расслаиваются на листовые пластинки. Они обладают полиминеральным составом, преобладающими

глинистыми минералами являются: монтмориллонит, иллит, каолинит, также присутствует хлорит.

#### Голоцен

#### Делювиальные отложения (dQ<sub>IV</sub>)

Мощность отложений голоценового возраста не превышает 3 метров. Породы были образованы деятельностью струйчатых снеговых или дождевых потоков на склонах. Делювиальные отложения сложены суглинками желтовато-коричневого цвета.

Образование такой последовательности плиоцен-голоценовых отложений связано с формированием и развитием Каспийского моря, с изменением его водного режима, с происходившими трансгрессиями, в период которых накапливались морские отложения. Трансгрессивные эпохи разделены продолжительными регрессиями, на протяжении которых накапливались континентальные делювиальные и аллювиальные отложения.

### 1.4. Геоморфология

Рельеф исследуемой области равнинный, пологоволнистый, с незначительным овражно-балочным расчленением. Абсолютные отметки варьируют в пределах от 25 (долины рек) до 113 метров (рис.6).

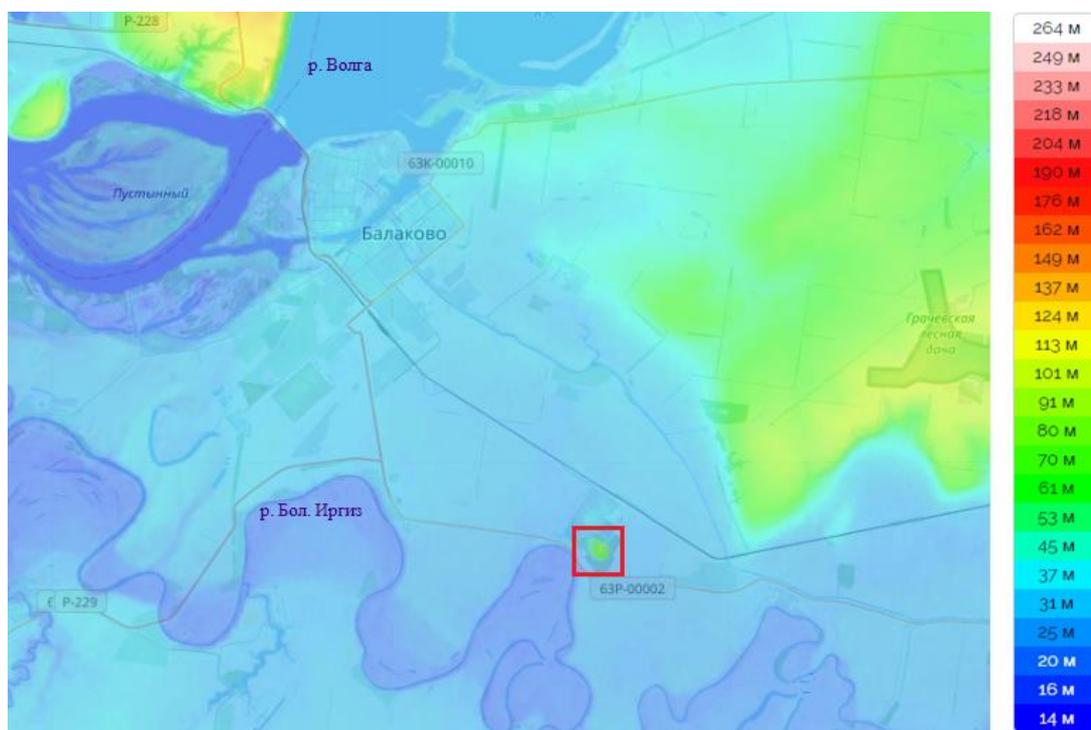


Рисунок 6. Топографическая карта Балаковского района. (Красным прямоугольником на карте выделен объект исследования.) [14]

Деятельность геологических процессов, происходящих в той или иной местности, может приводить к двум типам результатов. С одной стороны в ходе этих процессов образуются горные породы магматического, метаморфического или осадочного генезиса, связанные с перемещением магматического расплава, флюидов, газов, истинных или коллоидных растворов и т.д. С другой стороны, такие перемещения ведут к формированию и изменению облика земной поверхности, то есть образованию всего многообразия форм рельефа [11].

В зависимости от того, какие из процессов перемещают вещество в большей мере, рельеф по происхождению может быть эндогенным или экзогенным. Эндогенные процессы образуют, как правило, более крупные по масштабам неровности земной поверхности, а экзогенные – отвечают за формирование более мелких черт рельефа.

Исследуемая область расположена в пределах центральной части древней платформы, и поэтому на данном этапе геологической летописи основными агентами рельефообразования будут являться скорее экзогенные факторы.

Основными формами рельефа в пределах выбранного участка являются: водоразделы, склоны, овраги и балки, речные долины [11].

Водораздел – форма рельефа, представляющая собой субгоризонтальный участок междуречья, имеющий совсем небольшой угол наклона и ограниченный по периферии склонами [11]. Из-за незначительных углов наклона поверхностные воды почти не способны осуществлять на таких участках эрозионную или аккумулятивную деятельность, поэтому из всех экзогенных процессов главную роль здесь играет выветривание, происходит образование элювиальных отложений. На участке исследования такая форма рельефа может наблюдаться на междуречье реки Волги и реки Большой Иргиз и на междуречье Саратовского канала и реки Большой Иргиз.

Склон – участок земной поверхности, имеющий угол наклона более  $2^\circ$ . В зависимости от крутизны склоны подразделяются на очень пологие ( $2-6^\circ$ ), пологие ( $6-15^\circ$ ), средней крутизны ( $15-35^\circ$ ) и очень крутые ( $>35^\circ$ ). Движение вещества по склону осуществляется преимущественно под действием силы тяжести [3]. Основной причиной склоновых процессов является нарушение равновесия между силой тяжести и силой трения на склоне. Денудационная деятельность на склонах преобладает над аккумулятивной, и в целом процесс направлен на выполаживание склона. В результате аккумулятивной составляющей склоновых процессов могут формироваться следующие типы отложений: делювиальные (отложения струйчатых потоков, связанные с быстрым подступанием воды на склонах из-за ливней или быстрого таяния снега), деляпсивные (чаще всего образуются на глинистых склонах, где есть

выходы грунтовых вод, которые облегчают смещение), коллювиальные (обвальные или осыпные отложения).

Овраги и балки – эрозионные формы рельефа, связанные с деятельностью временных потоков. Овраг представляет собой относительно глубокую и крутосклонную незадернованную ложбину. Балка – это долина с пологими заросшими склонами. Овраг является первичным образованием. Он образуется на участках, состоящих из легкоразмываемых пород в результате воздействия дождевой или талой воды [3]. Первоначально возникает небольшая рытвина, потом она постепенно расширяется и углубляется. Процесс сопровождается непрерывным подмыванием и осыпанием краев образования. Развитие оврага прекращается только тогда, когда его дно опускается до уровня прочных, не поддающихся размыву пород, или в случае, если уменьшается водосборный бассейн, питающий вершину рва. Если склоны оврага обретают устойчивость, и создаются благоприятные условия для укоренения растительности, то такая форма рельефа уже называется балкой.

Речные долины – результат геологической деятельности рек. Они образуются в результате сочетания глубинной и боковой эрозии и аккумуляции. В строении речных долин устанавливают русло, пойма, надпойменные террасы и нетеррасированные склоны. Русло – это наиболее углубленная часть днища речной долины, по которому река протекает в межень (период низкой воды). Дно русла неровное, тут чередуются мелкие (перекаты и отмели) и глубокие (плесы) участки. Пойма – приподнятая над меженным уровнем реки и регулярно затопляемая в половодье часть днища речной долины. Надпойменные террасы – ступени на склонах речной долины, сформированные работой реки [3]. Обычно террасы наблюдаются на намываемом берегу, на подмываемом они уничтожены боковой эрозией. Долины рек Волга и Большой Ирғиз являются основными геоморфологическими элементами исследуемого района. Район расположен в нижнем течении рек, здесь углубление долины ограничено положением базиса эрозии, ниже которого размыв невозможен, поэтому преобладает боковая эрозия, приводящая к образованию свободных излучин. Особенно отчетливо меандры прослеживаются в строении долины реки Большой Ирғиз. Они имеют омеговидную форму, некоторые из них отшнурованы и преобразованы в старицы.

## 1.5. Гидрография

Главной водной артерией исследуемого региона и всего Приволжского федерального округа является река Волга, одна из крупнейших рек на Земле и самая большая по водности, длине и площади бассейна в Европе. Она протекает через 15 субъектов Российской



устьевой части, поэтому летом, особенно в августе, уровень воды очень низкий, а местами река совсем пересыхает [16].

На территории Балаковского района расположены также несколько левых притоков реки Большой Иргиз. Это реки Маянга, Большой и Малый Кушум. Длина реки Маянга равна 62 километрам, а площадь водосборного бассейна – 361 км<sup>2</sup>. Большой Кушум протягивается на 107 километров, а площадь водосборного бассейна составляет 1800 км<sup>2</sup>. Длина реки Малый Кушум – 76 километров, площадь водосборного бассейна составляет 469 км<sup>2</sup> [16].

Долины рек Волга и Большой Иргиз соединяются между собой Саратовским оросительно-обводнительным каналом. Канал питается водой из Саратовского водохранилища, по самотечной части вода поступает в Сулакское водохранилище, расположенное на реке Большой Иргиз. Общая протяженность канала составляет 126 километров. Он предназначен для орошения и обводнения земель и водоснабжения населенных пунктов в левобережных районах Волги Саратовской области.

В самой северной части Балаковского района расположена долина реки Березовка. После затопления Саратовского водохранилища истоки смешались с устьевым заливом реки Малый Иргиз, и сегодня Березовка фактически представляет собой проток, наполненный водами Малого Иргиза. Русло перекрыто плотинами, образованы запруды для сельскохозяйственных нужд и рыбной ловли [18].

## 1.6. Климат

Климат района умеренно континентальный, смягченный близостью реки Волга. Особенностью климата является преобладание в течение года малооблачных ясных дней. Для изучаемого района характерны умеренно холодная и малоснежная зима, непродолжительная засушливая зима и жаркое сухое лето. В последние годы климат имеет тенденцию к потеплению в зимний период и в течение марта [15].

Осадки в районе выпадают неравномерно в течение года. Зимой и весной выпадает незначительное количество осадков, но облачность в эти периоды больше, чем в другие времена года. Лето и весна характеризуются большим количеством осадков, которые часто носят ливневый характер, что может приводить к образованию оврагов и возникновению неблагоприятных условий для растений из-за размывания верхнего слоя почвы.

В Балаковском районе преобладают воздушные массы умеренных широт, движущиеся с Атлантики на восток, в том же направлении продвигаются циклоны, приносящие летом дождливую погоду, а зимой снегопады. Туда свободно проникают северные и южные ветры,

а также – суховеи со стороны Средней Азии и Казахстана. Преобладающее направление ветра – западное, юго-западное [15].

В целом климат Балаковского района мягче, чем на окружающих его территориях и теплее на 2°С. Среднегодовая температура составляет +6,9°С. Средняя температура наиболее холодного месяца года (января) - -9°С, а самого теплого (июль) – +22,4°С. Годовое количество осадков составляет 300-350 мм. Снеговой покров устанавливается в конце ноября, а его высота – 0,28-0,45 м. Глубина промерзания почвы составляет 0,7-0,8 м.

## 2. ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ УСТОЙЧИВОСТЬ ОТВАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ПРЕДПРИЯТИИ БАЛАКОВСКИЙ ФИЛИАЛ АО «АПАТИТ»

### 2.1. Общие представления об объекте исследования

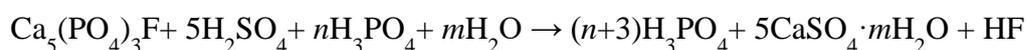
Балаковский филиал АО «Апатит», входящий в состав ПАО «ФосАгро», является одним из ведущих агрохимических предприятий России. Объем производства филиала составляет примерно 40% от объема выпускаемой продукции всех химических предприятий в Саратовской области. Ассортимент продукции предприятия составляют серная кислота различных марок, олеум (раствор серного ангидрита  $SO_3$  в 100% серной кислоте  $H_2SO_4$ ), осветленная фосфорная кислота, кормовой монокальцийфосфат, диаммонийфосфат, сульфоаммофос (комплексное трехкомпонентное удобрение, содержащее в различных пропорциях фосфор, азот и серу), кремнефтористый натрий. Свою продукцию предприятие поставляет как в регионы России, так и за рубеж.

В промзону предприятия входят 4 основных (производственных) объекта и 12 вспомогательных комплексов. В центральной части промплощадки расположено производство экстракционной фосфорной кислоты, в восточной части находится сернокислотное производство, в юго-восточной части – цех минеральных солей, а восточнее него – цех фосфорных удобрений. Объекты вспомогательного комплекса рассредоточены по всей площади промзоны. К ним относятся: электроцех, парогазотурбинный цех, цех нейтрализации и очистки сточных вод и водоснабжения, управление производственно-технической комплектации, цех контрольно-измерительных приборов и автоматики, цех железнодорожного транспорта, цех централизованного ремонта, автотранспортный цех, хозяйственный цех, цех аналитики и контроля качества, пожарногазоспасательный отряд, комбинат рабочего питания.

Кроме того, в юго-восточной части промплощадки расположен земельный отвод под отвальное хозяйство, включающее в себя многоярусный техногенный массив, сеть технологических дорог, электросетей, насосные станции, вспомогательные здания и несколько искусственных водоемов, выполняющих различные функции (накопление шлама, испарение, дренаж).

Исследуемый отвал эксплуатируется с 1975 года. Он образовался в результате активной переработки Кольского апатитового концентрата и сложен побочными продуктами получения экстракционной фосфорной кислоты. Экстракционная фосфорная кислота является основным продуктом при производстве концентрированных простых и сложных удобрений, кормовых

фосфатов, а также при получении большей части элементарного фосфора. Она образуется в ходе химической реакции, во время которой более сильные кислоты вытесняют фосфорную кислоту из апатитового сырья. Как правило, в качестве сильной (вытесняющей) кислоты используются серная или азотная кислота. Процесс разложения апатитового концентрата серной кислотой можно описать следующим химическим уравнением:



Образующийся в результате реакции дигидрат или полугидрат сульфата кальция обычно содержит примесь фосфора, и его называют фосфополугидратом или фосфогипсом. Фосфогипс представляет собой тонкодисперсный порошок белого или серого цвета.

Фосфогипс целесообразно использовать, как вторичное сырье, вместо природного гипса. Наиболее перспективными отраслями его применения в экономике являются:

1. сельское хозяйство (Фосфогипс может быть использован для компостирования с органическими удобрениями и для химической мелиорации солонцовых и кислых почв)
2. цементная промышленность (Фосфогипс может заменить природный гипс в качестве минерализатора)
3. бумажная и лакокрасочная промышленность (Фосфогипс может применяться, как наполнитель)
4. химическая промышленность (Фосфогипс в качестве наполнителя может применяться при изготовлении пластмассы)
5. строительство зданий и сооружений, автомобильных дорог
6. обустройство прибрежных зон

На сегодняшний день, однако, вовлечение фосфогипса в различные отрасли народного хозяйства достаточно затруднительно из-за содержания в нем примесей серной кислоты, фторидов, солей калия и натрия, которые не позволяют ему полностью заменить природный гипс. Во всем мире сейчас только около 15% фосфогипса используется в качестве полезного материала, остальные же 85% направляются в отвалы.

При действующей технологии производства на предприятии «Апатит» на каждую тонну полезной продукции приходится примерно 4 т фосфогипса. Общий объем отвала на данный момент составляет более 3 млн м<sup>3</sup>.

Конструктивно современное отвальное сооружение можно разделить на два отвальных массива (рис. 8):

1. старый отвал (находится на консервации, отсыпался в период с 1975 до 2014 годов)

2. новый отвал (отсыпается с 2014 года, расположен на площадях расширения 1 и 2)



Рисунок 8. Схема расположения отвального хозяйства Балаковского филиала АО «Апатит»

Старый отвал формировался поярусно от периферии к центру по классической схеме веерного размещения. Самосвалы частично разгружались под откос, а частично – на верхнюю площадку, потом породы сталкивались бульдозером. Уплотнение породы происходило в процессе хранения под действием залегающей выше толщи. (Специальная укатка отсыпанной массы при складировании не применялась.)

Нижняя часть расширенного отвала мощностью до 30 метров сформирована от периферии к центру (старому отвалу) ярусами в 2-3 метра. Формирование происходило путем отсыпки дамб по периметру с последующим заполнением образовавшейся емкости и уплотнением колесами транспорта при транспортировке пород на отвал.

Верхняя часть расширенного отвала имеет мощность от 20 до 30 метров. Технология отсыпки идентична той, которая использовалась при формировании нижней части. Мощность ярусов в этой части составляет 3.5-4 м.

Первые признаки развития деструктивных нарушений, проявляющиеся в виде фильтрационных выходов на прилегающей территории между нижней бровкой отвала и противофильтрационной завесой, а также в виде деформаций водоотводящих лотков, на исследуемом объекте появились еще в 2009 году. Проявление оползневых процессов стало

причиной проведения геолого-геодезического мониторинга и определения оптимальных параметров отвального сооружения для его дальнейшей безопасной эксплуатации.

## 2.2. Инженерно-геологическое строение техногенного массива отвального сооружения

Техногенный массив отвала имеет неоднородное строение. С глубиной прослеживается общая тенденция увеличения значений механических свойств, при этом существует зональность по физическим показателям, консистенции и структурированности фосфогипса. На основании этих признаков в объеме отвала можно установить 4 инженерно-геологических элемента (ИГЭ).

*ИГЭ 1а* (первый слой от поверхности отвала): «псевдосплошной» фосфогипс, структурированный, пористый, влажный, напоминает «корочку», хрупко разламывается на блоки при механическом воздействии, мощность около 15 метров.

*ИГЭ 1б* (второй слой от поверхности отвала): дезинтегрированный фосфогипс, плотный, комковатый, относительно сухой, мощность около 8 метров.

*ИГЭ 1в* (третий слой от поверхности отвала): трещиноватый фосфогипс, в блоках – плотный, влажный, пластичный, мощность около 19 метров.

*ИГЭ 1г* (расположен у основания отвала): «псевдопластичный» фосфогипс, монолитный, имеет повышенную прочность, мощность около 8 метров.

Основным фактором, влияющим на изменение свойств фосфогипса с глубиной в отвале большой высоты, являются гравитационные нагрузки, которые приводят к уплотнению грунтов и, следовательно, к увеличению их прочностных свойств. Можно установить следующую последовательность комплексов процессов, приводящих к неоднородности техногенного массива:

1. Дегидратация, химико-минералогическая трансформация, цементация (отвечают за образование «корки» в верхней части массива) (формирование слоя 1а)
2. Разрушение скелета, формирование трещиноватости (происходят при достижении нагрузок, превышающих структурную прочность грунтов, в ходе отсыпки новых слоев поверх «корки») (образование слоя 1б)
3. Уплотнение фосфогипса в блоках, заполнение трещин водой (формирование слоя 1в)

4. Смыкание трещин, уплотнение фосфогипса, образование монолитного тела (происходят при дальнейшем увеличении высоты отвала, сопровождающимся повышением давления вышележащих толщ) (формирование слоя 1г)

Физико-механические свойства для соответствующих инженерно-геологических элементов представлены в таблице 2.1. Данные параметры получены на основании испытаний образцов фосфогипса, отобранных из скважины, пройденной через тело отвала в пределах призмы возможного оползания.

Таблица 2.1. Физико-механические свойства фосфогипса

Фосфогипс (№ ИГЭ)	$\rho$ , т/м <sup>3</sup>	$c$ , кПа	$\varphi$ , град
ИГЭ 1а	1,60	50	36
ИГЭ 1б	1,57	20	41
ИГЭ 1в	1,79	50	37
ИГЭ 1г	1,73	80	32

Примечание:  $\rho$  – плотность;  $c$  – сцепление;  $\varphi$  – угол внутреннего трения;

Естественное основание отвала сложено песчано-глинистыми породами четвертичного возраста, общая мощность которых варьирует от 11 до 22 метров. Непосредственно под подошвой отвала залегают делювиальные суглинки ( $dQ_{IV}$ ) (ИГЭ 2). Суглинки имеют желтовато-бурый цвет, а их мощность не превышает 3 метра. Под ними находится толща лиманно-морских шоколадоподобных глин хвалынского возраста ( $limQ_{IIIv2}$ ) (ИГЭ 3). Мощность глин составляет от 3 до 5 метров. Ниже по разрезу расположены аллювиальные отложения мощностью от 4 до 6 метров, представленные суглинками голубого цвета ( $aQ_{IIIv1}$ ) (ИГЭ 4). Под суглинками находятся пески (ИГЭ 5).

Изучение физико-механических свойств естественного основания отвала выполнялось как непосредственно под отвалом, так и на сопредельной территории, непригруженной отвалом. На основании проведенных исследований 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 глинистые грунты (делювиальные суглинки и шоколадные глины) характеризуются меньшими прочностными качествами, нежели во внутренней части техногенного массива.

Наименьшие показатели, полученные при изучении различных участков отвалообразования приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Физико-механические свойства грунтов основания техногенного массива.

Наименование грунтов	$\rho$ , т/м <sup>3</sup>	$e_0$	$E_0$ , МПа	$c$ , кПа	$\varphi$ , град
ИГЭ 2 - суглинок делювиальный	2,00	0,690	15	68	22
ИГЭ 3 - глина шоколадоподобная	1,90	0,927	11	40	10
ИГЭ 4 – глины и суглинки аллювиальные	1,81	1,238	11	37	17
ИГЭ 5 - песок	1,70	-	30	3	27

*Примечание:  $\rho$  – плотность;  $e_0$  - коэффициент пористости;  $E_0$  – модуль деформации;  $c$  – эффективное сцепление;  $\varphi$  – эффективный угол внутреннего трения.*

Гидрогеологические условия участка отвала характеризуются распространением трех водоносных горизонтов:

1. Техногенного (водовмещающие породы – фосфогипс в объеме отвала)
2. Грунтового (водовмещающие породы – делювиальные суглинки)
3. Субнапорного (водовмещающие породы – аллювиальные пески)

Глубина уровня грунтовых вод за пределами отвала меняется от 0.4 до 3.6 метров при сезонных колебаниях до 0.8 метров. В основании отвала грунтовый горизонт гидравлически связан с техногенным горизонтом отвала и имеет значительные напоры. Питание грунтового горизонта под отвалом осуществляется за счет атмосферных осадков и ограниченной фильтрации техногенного водоносного горизонта.

Подземные воды субнапорного горизонта имеют напоры от 3 до 9 метров. Коэффициент фильтрации песков варьирует от 0.3 до 0.5 м/сут для глинистых разностей, и от 2.2 до 7.6 м/сут - для слабоглинистых мелкозернистых разностей. Питание горизонта происходит вне изучаемой территории, в областях выхода песков на дневную поверхность.

Водовмещающие породы разделены слоем шоколадных глин, являющихся региональным водоупором. Коэффициент фильтрации глин не превышает  $10^{-5}$  м/сут, поэтому они должны препятствовать значимой гидравлической связи между техногенным водоносным горизонтом в отвале и водоносным горизонтом аллювиальных песков.

Уровень техногенного водоносного горизонта постоянно повышается в период эксплуатации отвального сооружения, что является одним из факторов уменьшения

устойчивости откосов отвала. Питание горизонта происходит преимущественно путем инфильтрации технических стоков, поступающих в отвал с фосфогипсом и в меньшей степени за счет атмосферных осадков. Движение техногенных вод в отвале осуществляется от центра к откосам, где воды высачиваются на поверхность. По площади отвалообразования зона питания горизонта перемещается вслед за производством работ на следующем участке складирования с некоторым опозданием. Так как отвал непрерывно уплотняется, более глубокие его слои имеют меньшую водопроницаемость, соответственно, фильтрация воды по нормали к слоистости затруднена, и вода перемещается в основном вдоль слоев. В связи с этим уклоны депрессионной поверхности в центральной области отвала пологие, а на откосах могут почти совпадать с ними. Высачивание воды на поверхность откоса может происходить и выше основания отвала. Ниже участка высачивания депрессионная поверхность воды в отвале совпадает с поверхностью откоса. В таблице 2.3. представлены значения коэффициента фильтрации и гравитационной емкости в зависимости от глубины относительно поверхности отвала.

Таблица 2.3. Изменение с глубиной коэффициента фильтрации и гравитационной емкости фосфогипса в техногенном массиве отвального сооружения.

№ 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

Атмосферные осадки в теплое время года распределяются по поверхности отвала примерно равномерно и не вызывают локальных аномалий в депрессионной поверхности. В зимний период они инфильтруются на талых участках поверхности массива. На замерзших участках отвала атмосферные осадки накапливаются и инфильтруются только весной.

Начиная с 2008 года, в теле отвала велись регулярные наблюдения за уровнем техногенного водоносного горизонта по 4 скважинам (скважины 111-114). В апреле 2014 года была пробурена еще одна скважина (скважина 115) (рис.9). На данный момент функционирует только последняя. Остальные были уничтожены из-за производственной необходимости и их плохого состояния.

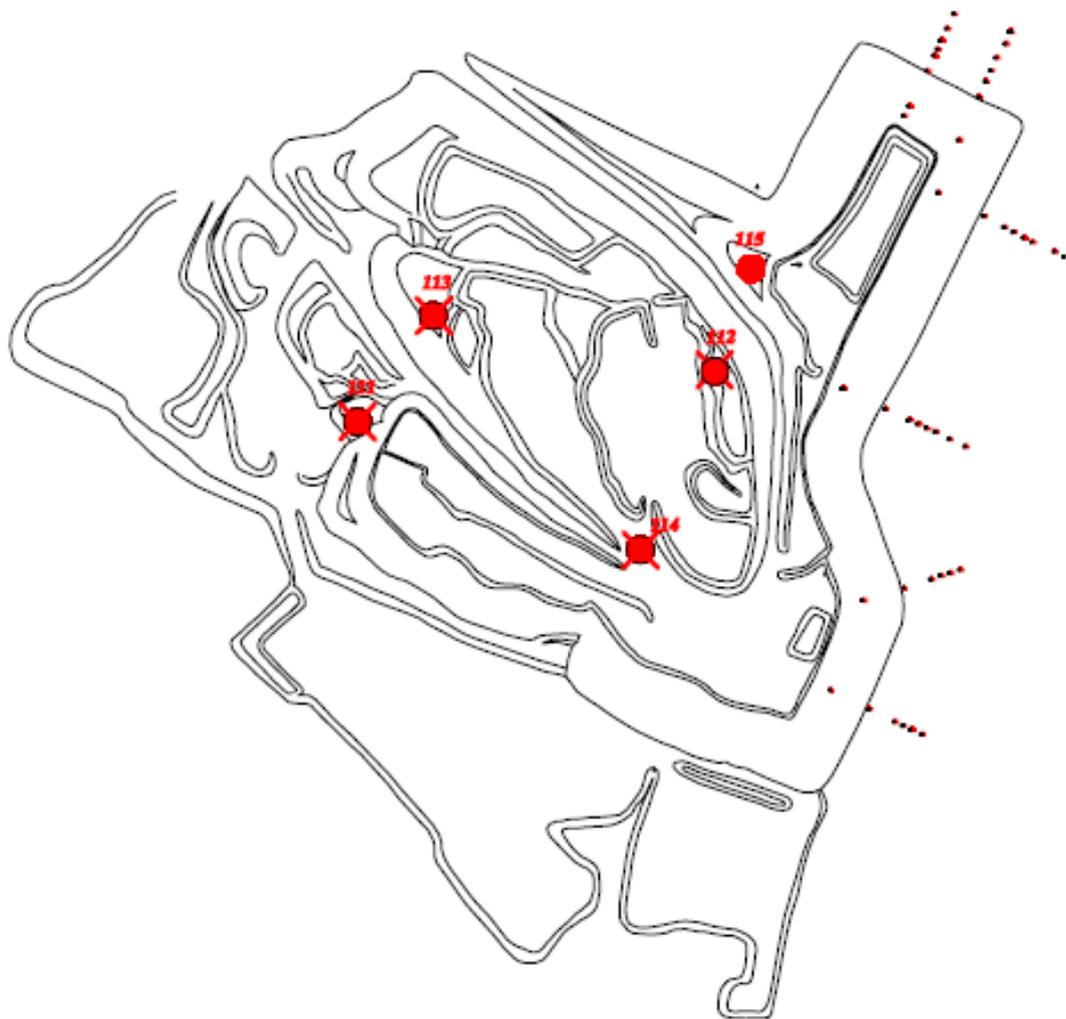


Рисунок 9. Схема расположения наблюдательных скважин в теле техногенного массива отвального сооружения. (Крестами на схеме обозначены уничтоженные скважины.)

### 3. ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ ОТВАЛА ФОСФОГИПСА БАЛАКОВСКОГО ФИЛИАЛА АО «АПАТИТ»

#### 3.1. Анализ результатов геодезического мониторинга

Геодезическая станция на отвале Балаковского Филиала АО «Апатит» была оборудована в 2010 году. Первоначально она состояла из 8 профильных линий, включающих в себя 60 забивных реперов. В дальнейшем две профильные линии (7 и 8) были уничтожены в связи с расширением отвала и увеличением высоты на территории данных линий. Оставшиеся шесть геодезических линий каждый год пополнялись новыми рабочими реперами. В 2018 году летом была произведена закладка двух новых профильных линий (7а и 8а), состоящих из 7 рабочих реперов в каждой линии, и их планово-высотная привязка. В октябре 2018 года наблюдательная сеть на территории расширения была дополнена еще четырьмя профильными линиями (9,10, 11, 12) (рис. 10). В каждой линии было установлено по два рабочих деформационных репера, один из которых расположен в верхней части откоса, а другой – на нижней бровке у основания откоса. На данный момент верхние репера в каждой наблюдаемой линии на новом отвале находятся ниже верхней бровки отвала, и поэтому измеряемые по ним деформации не полностью характеризуют деформационное поведение откосов на полную их высоту.

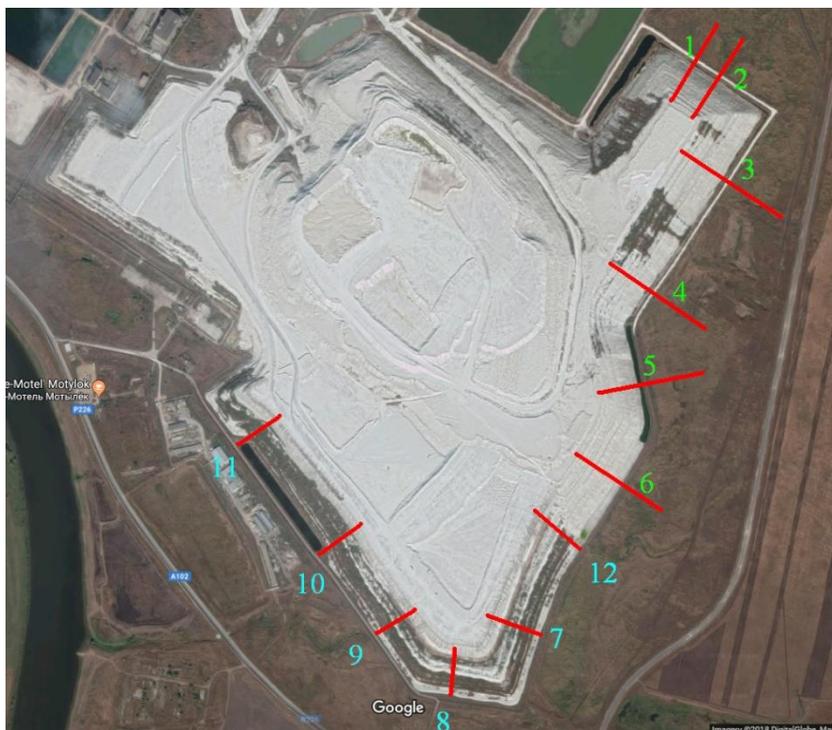
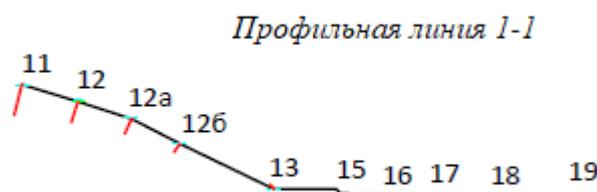


Рисунок 10. Схема расположения профильных линий геодезической наблюдательной станции на отвале Балаковского Филиала АО «Апатит»

По линии 1-1 за период наблюдений 14.05.2019 – 6.11.2019 отмечено незначительное оседание реперов №11, №12 №12а и №12б, расположенных на верхней площадке отвала и на откосе, соответственно на 0,097, 0,071, 0,049 и 0,027 м (рис.11). Значения вертикальных деформаций по остальным реперам данной наблюдательной линии находятся в пределах погрешности измерений ( $\pm 2$  см) и составляют от 0 до +0,016 м. Горизонтальные смещения по верхним реперам и реперам на откосе (№11-12б) составляют примерно равные величины: 0,019-0,021 м в сторону откоса отвала. Значения смещений остальных реперов находятся в пределах погрешности измерений за исключением репера №17, смещение которого также составило незначительную величину – 0,042 м в сторону откоса.



Горизонтальный масштаб: 1:2000  
 Вертикальный масштаб 1:2000  
 Масштаб векторов 100:1

Рисунок 11. Распределение деформаций за период наблюдений 14.05.2019 – 06.11.2019 в виде векторов результирующих смещений  $|R|$  по профильной линии 1-1.

За время наблюдений 6.11.2019-10.07.20 отмечается оседание реперов №11, №12 №12а и №12б, расположенных на верхней площадке отвала и на откосе, соответственно на 0,129, 0,096, 0,069 и 0,039 м. Значения вертикальных деформаций по остальным реперам данной наблюдательной линии находятся в пределах погрешности измерений ( $\pm 2$  см) и составляют от 0 до +0,016 м. Значения горизонтальных смещений всех реперов профильной линии находятся в пределах погрешности измерений.

Распределение вертикальных деформаций по реперам (уменьшение сверху вниз по откосу) и практически нефиксируемые инструментальными наблюдениями значения горизонтальных смещений свидетельствует о преимущественном развитии процесса уплотнения пород отвала. Сдвигение откоса по типу подпошвенного оползня не фиксируется.

Интенсивность развития оползневого процесса оценивается по скорости горизонтальных перемещений установленного у подошвы отвала репера №13, а также по реперам № 15-19, установленным на прилегающей к отвалу территории. На данный момент вектор скорости изменения горизонтальных смещений по данным реперам количественно характеризуется

величинами не более 0,066 мм/сут в сторону откоса отвала, что говорит о затухании подподошвенных сдвижений.

По линии 2-2 за прошедший период (14.05.2019 – 06.11.2019) величина осадки репера №21 составила 0,094 м при скорости развития вертикальных перемещений - 534 мм/сут (рис.12).

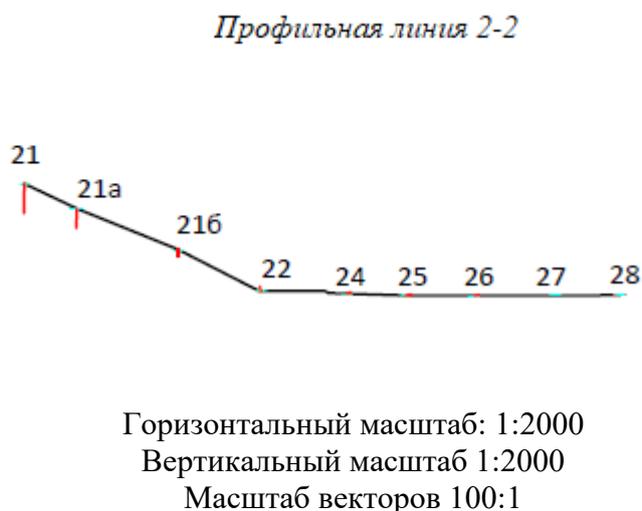


Рисунок 12. Распределение деформаций за период наблюдений 14.05.2019 – 06.11.2019 в виде векторов результирующих смещений  $|R|$  по профильной линии 2-2.

На реперах №21а и №21б, установленных ниже по откосу скорость вертикальных смещений составляет 0,352 мм/сут и 0,125 мм/сут соответственно.

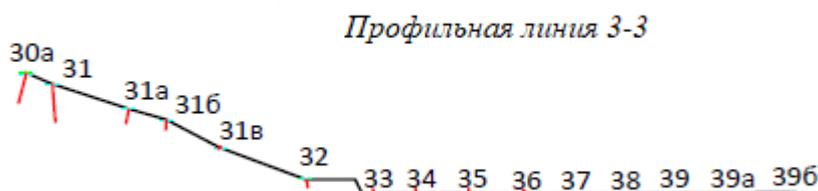
На период наблюдений 6.11.2019-10.07.20 осадки репера №21 составила 0,130 м при скорости развития вертикальных перемещений 0,526 мм/сут. На реперах №21а и №21б, установленных ниже по откосу скорость осадок составляет 0,340 мм/сут и 0,145 мм/сут соответственно. В целом по откосу наблюдается уменьшение вертикальных деформаций сверху вниз, горизонтальные смещения вышеуказанных реперов весьма находятся в пределах погрешности измерений.

Интенсивность развития оползневого процесса на профильной линии 2-2 оценивается по скорости горизонтальных перемещений установленного у подошвы отвала репера №22. Горизонтальное смещение репера №22 период 6.11.2019-10.07.20 также весьма незначительное и находится в пределах погрешности измерений – 0,001 м при скорости смещений 0,005 мм/сут.

В сопоставлении с максимальной скоростью горизонтальных деформаций репера №22 в период активного развития типичных оползневых смещений (происходивших в 2010 и в 2011 годах), которая составляла 2,42 мм/сут, фиксируемые в настоящее время деформации не могут расцениваться как типичные оползневые. Кроме того, деформационный процесс на откосах отвала сегодня идет без нарастания вала выпирания у подножия откоса – характерного признака развития оползней подподошвенного типа.

По линии 3-3 оценка характера развития осадок отвала, вызванных уплотнением фосфогипса, ведется по реперам №30а и № 31, расположенным в самой верхней части откоса. С 2010 года до ноября 2019 года репер №31 опустился на 8,926 м. За период 14.05.2019 – 6.11.2019 – на 0,120 м, что близко к величинам вертикальных деформаций реперов №11 (0,097 м) и №21 (0,094) на профильных линиях 1-1 и 2-2 (рис.13).

Интенсивность развития осадки во времени за период 6.11.2019-10.07.20 по реперу 30а составляет 0,579 мм/сут, а для репера 31 - 0,389 мм/сут, а величины осадки – 0.096 м.



Горизонтальный масштаб: 1:2000  
 Вертикальный масштаб 1:2000  
 Масштаб векторов 100:1

Рисунок 13. Распределение деформаций за период наблюдений 14.05.2019 – 06.11.2019 в виде векторов результирующих смещений |R| по профильной линии 3-3.

О затухающем характере осадок в целом можно также судить в сопоставлении с максимальной скоростью вертикальных перемещений, которая в период активной стадии развития оползневых процессов (происходивших в 2010-2011 годах) на данной профильной линии превышала 10 мм/сут.

Осадки по остальным реперам (№№31а, 31б и 31в), расположенным на линии, имеют тенденцию к уменьшению сверху вниз (как и по всему откосу в целом), от 0,084 м до 0,033 м.

Горизонтальные смещения по всем вышеупомянутым реперам данной профильной линии составляют не более 0,055м, распределяясь по всей линии достаточно равномерно.

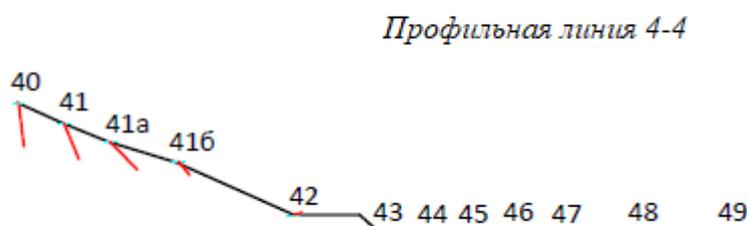
Характер развития оползневого процесса определяется в основном по реперу № 32, заложенному у нижней бровки откоса. Вертикальное поднятие репера №32 у нижней бровки откоса (высота вала выпирания) с 2010 по 2020 год достигло 2,009 м, а горизонтальное смещение, ориентированное в сторону от отвала, составило 1,851 м, что значительно выше, чем на реперных линиях 1-1 и 2-2 и говорит о более интенсивном проявлении здесь оползневых процессов в предыдущие годы.

За исследуемый период вертикальные перемещения репера №32 представляют собой весьма незначительное поднятие, количественно выраженную в значении близком к пределу погрешностей измерений – 0,01 м, при интенсивности 0,160 мм/сут. Значение горизонтального смещения репера весьма мало и составляет 0,039 м в сторону от отвала при скорости 0,158 мм/сут. В сопоставлении с максимальной скоростью горизонтальных смещений репера в период активной стадии развития оползня 2,72 мм/сут (2010-2011 гг) в настоящее время наблюдается затухание сдвиговых деформаций откоса на данном участке отвала.

Все значения деформаций по реперам, находящимся за репером №32 по направлению от отвала, находятся в пределах погрешности измерений.

Улучшению состояния устойчивости откоса отвала в профиле 3-3 способствует пригруз из фосфогипса, отсыпанный у нижней бровки в 2018 году.

По линии 4-4 оценка интенсивности развития осадок отвала, вызванных уплотнением фосфогипса, ведется по реперам №40 и № 41. За промежуток времени 14.05.2019 – 6.11.2019 осадка поверхности откоса отвала составила 0,134 м (по реперу №40) (рис.14). Скорость смещения репера №40 по вертикали за отчетный период составила 0,761 мм/сут. Осадка репера №41 за тот же период составляет 0,112 м при скорости 0,302 мм/сут.



Горизонтальный масштаб: 1:2000  
Вертикальный масштаб 1:2000  
Масштаб векторов 100:1

Рисунок. 14 Распределение деформаций за период наблюдений 14.05.2019 – 06.11.2019 в виде векторов результирующих смещений |R| по профильной линии 4-4.

За период времени 6.11.2019-10.07.20 осадка поверхности откоса отвала составила 0,173 м (по реперу №40). Скорость смещения репера №40 по вертикали составила 0,700 мм/сут. Общая осадка поверхности отвала за все время наблюдений (10 лет), оцениваемая по вертикальному смещению репера №41, составляет 8,586 м. Осадка репера №41 за отчетный период составляет 0,146 м при скорости 0,591 мм/сут. Из сопоставления с максимальной скоростью вертикальных смещений по верхнему реперу 8,04 мм/сут (01.11.2010–17.05.2011) следует, что интенсивность уплотнения отвального массива на данном участке постепенно снижается.

Осадки расположенных ниже по откосу реперов №№ 41а и 41б составляют 0,117 м и 0,069 м соответственно, подтверждая тенденцию уменьшения вертикальных деформаций сверху вниз. Скорости данных деформаций при этом остались практически неизменными по сравнению с прошлым этапом наблюдений 0,474 мм/сут для репера №41а и 0,279 мм/сут для репера 41б.

В распределении горизонтальных смещений для всех вышеупомянутых реперов данной профильной линии прослеживается увеличение их значений сверху вниз (репер 41б с максимальным значением перемещения 0,064 м в сторону от отвала).

Характер развития оползневого процесса определяется в основном по реперу № 42, заложенному у нижней бровки откоса. Поднятие нижней бровки откоса инструментально зафиксировано не было (по реперу № 42), горизонтальное смещение в сторону от отвала – 0,026 м. Соответственно интенсивность деформаций откоса по реперу №42 оценивается нулевой скоростью вертикальных смещений, горизонтальных смещений от отвала – 0,245 мм/сут. В период наиболее активной стадии развития деформационных процессов на отвале (2010–2011 гг) скорость горизонтальных смещений репера №42 составляла 3,66 мм/сут и была максимальной в сопоставлении со всеми наблюдательными линиями.

Горизонтальные деформации по реперу №43 характеризуются малыми значениями 0,032 м. На данном репере было зафиксировано незначительное поднятие 0,025 м.

Деформации реперов, расположенных за репером №43 в сторону от отвала, характеризуются значениями в рамках погрешности измерений.

По линиям 5-5 и 6-6 максимальные осадки за период 14.05.2019 – 6.11.2019 зарегистрированы по самым верхним реперам на откосах и составляют 0,143 м (№50 на линии 5-5) и 0,133 м (№60 на линии 6-6) (рис.15 и 16).

Скорость развития вертикальных смещений реперов в профилях 5-5 и 6-6, как и по всем другим профильным линиям, снижается сверху вниз по длине откоса.



Горизонтальный масштаб: 1:2000  
 Вертикальный масштаб 1:2000  
 Масштаб векторов 100:1

Рисунок. 15 Распределение деформаций за период наблюдений 14.05.2019 – 06.11.2019 в виде векторов результирующих смещений |R| по профильной линии 5-5.



Горизонтальный масштаб: 1:2000  
 Вертикальный масштаб 1:2000  
 Масштаб векторов 100:1

Рисунок. 15 Распределение деформаций за период наблюдений 14.05.2019 – 06.11.2019 в виде векторов результирующих смещений |R| по профильной линии 6-6.

Горизонтальные смещения верхних реперов существенно меньше вертикальных смещений, что говорит об отсутствии выраженных оползневых смещений. Значения всех горизонтальных смещений на обеих линиях по реперам находятся в пределах погрешности измерений.

Репера № 54 и № 64, установленные на нижних бровках откосов, в течение отчетного периода демонстрируют крайне низкие значения вертикальных и горизонтальных перемещений в пределах точности измерений.

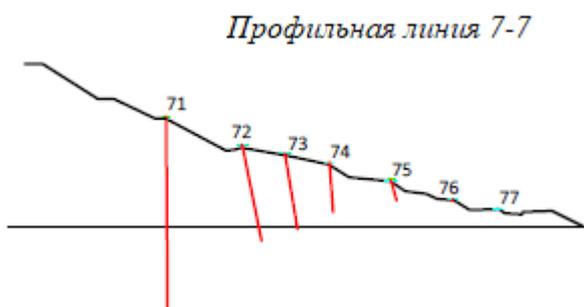
Аналогичные результаты поведения реперов № 54 и № 64 получены и в период наблюдений 6.11.2019-10.07.20. Соответственно, можно предположить, что оползневые процессы на данном участке перешли в стадию стабилизации. Однако под влиянием ряда

факторов (например, повышение уровня техногенного водоносного горизонта) смещения могут интенсифицироваться.

По линиям 7-7 и 8-8 (заложены в июле 2018 на поверхности откоса нового отвала) наблюдается активный процесс оседания откосов отвала, сопоставимый по характеру с деформациями на профилях 1-1 и 2-2 в начальный период наблюдений, когда велось активное отвалообразование на основной площади отвала.

За период наблюдений 26.07.2018-06.11.2019 новый отвал в районе профилей 7-7 и 8-8 осел за счет уплотнения фосфогипса на 2,108 м (по реперу №71) и 1,941 м (по реперу №81).

Максимальные скорости вертикальных перемещений на период 14.05.2019 – 06.11.2019 по рассматриваемым линиям зафиксированы по реперу №71 – 3,489 мм/сут, и по реперу №81 – 3,295 мм/сут (рис.17 и 18).



Горизонтальный масштаб: 1:2000  
Вертикальный масштаб 1:2000  
Масштаб векторов 100:1

Рисунок 17. Распределение деформаций за период наблюдений 14.05.2019 – 06.11.2019 в виде векторов результирующих смещений |R| по профильной линии 7-7.



Горизонтальный масштаб: 1:2000  
Вертикальный масштаб 1:2000  
Масштаб векторов 100:1

Рисунок 18. Распределение деформаций за период наблюдений 14.05.2019 – 06.11.2019 в виде векторов результирующих смещений |R| по профильной линии 8-8.

Горизонтальные смещения на рассматриваемых линиях направлены в сторону от отвала, за исключением репера №81, где смещение составило 0,046 м в сторону отвала. Наибольшие значения смещений по линии 7-7 характерны для средних частей откоса по реперу №72 (0,055 м), для линии 8-8 – в нижней части откоса по реперу 85 (0,067 м).

В период наблюдений 6.11.2019-10.07.20 Отмечается снижение скорости вертикальных деформаций по всем реперам обеих линий по сравнению с прошлым циклом наблюдений. Максимальные скорости по рассматриваемым линиям зафиксированы по реперу №71 – 2,692 мм/сут, и по реперу №81 – 2,591 мм/сут.

Горизонтальные смещения на рассматриваемых линиях направлены в сторону от отвала, за исключением репера №81, где смещение составило 0,051 м в сторону отвала. Наибольшие значения смещений по линии 7-7 характерны для средних частей откоса по реперу №72 (0,088 м), для линии 8-8 – в нижней части откоса по реперу 85 (0,057 м).

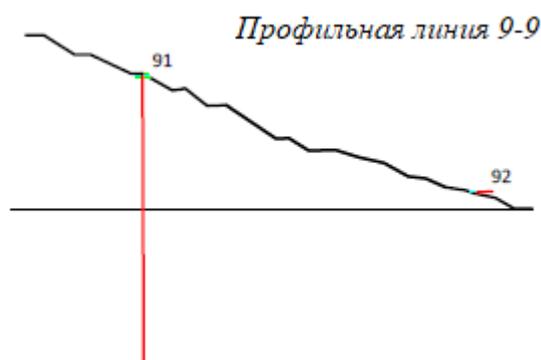
Наибольшие значения скоростей горизонтальных смещений характеризуются следующими величинами: 0,322 мм/сут – для линии 7-7 и 0,232 мм/сут – для линии 8-8. Скорости горизонтальных смещений по линии 7-7 по всем реперам, за исключением репера 77, увеличились по сравнению с предыдущим циклом наблюдений, причем количественно разница увеличивается снизу вверх по откосу для средней его части: для репера 72 скорость увеличилась с 0,315 до 0,332 мм/сут, для репера 75 – с 0,091 до 0,316 мм/сут. Репера 71 и 76 поменяли направление смещений в сторону от отвала и количественно составляют 0,312 и 0,044 мм/сут соответственно. На линии 8-8 в целом отмечается падение скоростей горизонтальных смещений за исключением репера 82, где скорость возросла незначительно с 0,040 до 0,092 мм/сут.

Горизонтальные смещения реперов на нижней бровке откоса, по которым ведется оценка вида развивающегося сдвигового процесса, показали весьма небольшие значения в пределах погрешности измерений, а их скорости значительно упали с 0,140 до 0,29 мм/сут для репера 77 и с 0,198 до 0,033 мм/сут для репера 88.

*Линии 9-9, 10-10, 11-11* были заложены в октябре 2018 года на территории расширения отвала.

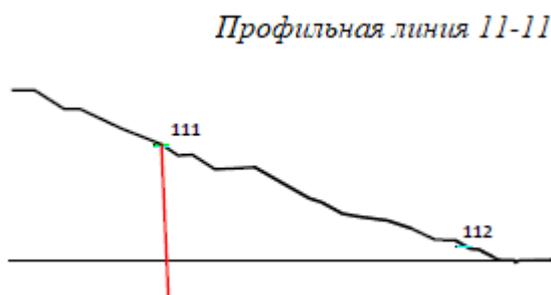
Значения осадок по верхним реперам по линиям 9-9 и 11-11 представляют значительные величины по сравнению с линиями на старой части отвала, составляя за период 14.05.2019 – 06.11.2019 0,924 м и 0,492 м, соответственно (рис.19 и 20). Скорости вертикальных деформаций составляют 5,250 (линия 9) и 2,795 мм/сут (линия 8), соответственно.

Горизонтальные смещения по верхней бровке обладают весьма малыми значениями – не более 0,023 м (за полгода) и направлены в сторону от отвала. По нижней бровке отвала значения смещений для линий 9-9, 10-10 и 11-11 составляют соответственно 0,048, 0,083 и 0,023 м в сторону от отвала. Максимальная скорость горизонтальных смещений составляет 0,470 мм/сут.



Горизонтальный масштаб: 1:2000  
Вертикальный масштаб 1:2000  
Масштаб векторов 100:1

Рисунок 19. Распределение деформаций за период наблюдений 14.05.2019 – 06.11.2019 в виде векторов результирующих смещений  $|R|$  по профильной линии 9-9.



Горизонтальный масштаб: 1:2000  
Вертикальный масштаб 1:2000  
Масштаб векторов 100:1

Рисунок 19. Распределение деформаций за период наблюдений 14.05.2019 – 06.11.2019 в виде векторов результирующих смещений  $|R|$  по профильной линии 10-10.

Скорости вертикальных деформаций в период наблюдений 6.11.2019-10.07.20 по реперам 91 и 11\_1 линий снизились, но остаются весьма большими. Так, скорость оседаний,

фиксируемая по верхним реперам, составляет 4,065 (линия 9-9) и 2,182 мм/сут (линия 11-11). Данные характеристики деформаций свидетельствуют об интенсивном уплотнении свежееотсыпанного фосфогипса в этой части отвала. Осадки по нижней бровке находятся в пределах погрешности измерений.

Скорость горизонтальных смещений за этот период весьма снизилась на линии 9-9 с 0,274 до 0,016 мм/сут, на остальных линиях скорости практически не изменились. Максимальная скорость смещений составляет 0,425 мм/сут по реперу 10\_2 (расположен в нижней части профильной линии 10-10).

*Линия 12-12* заложена в октябре 2018 года на территории расширения отвала между линиями 7-7 и 6-6 и в целом характеризуется схожими с линией 6-6 параметрами деформирования.

За период наблюдений 31.10.2018-06.11.2019 по линии 12-12 общая осадка отвала по верхнему реперу составила 0,357 м. Значение осадки нижней бровки находится в пределах погрешности измерений.

Горизонтальные перемещения по верхней бровке находятся в пределах погрешности измерений, по нижней составляют 0,052 м.

Через 2 года наблюдений по линии 12-12 общая осадка отвала по верхнему реперу составила 0,532 м. Значение осадки нижней бровки находится в пределах погрешности измерений.

Горизонтальные перемещения по верхней бровке составляют незначительные 0,045 м, по нижней – 0,058 м; при этом скорость смещений по верхней бровке увеличилась в 2 раза по сравнению с периодом 31.10.2018-06.11.2019, по нижней – осталась практически неизменной.

### 3.2. Оценка устойчивости откосов отвала на оползневом участке

Расчеты устойчивости отвала при проведении мониторинга безопасности необходимо проводить для определения тенденций в изменении состояния откосов во времени. Рассчитанные коэффициенты устойчивости по различным профилям позволяют проследить влияние на состояние откоса таких факторов, как увеличение высоты откосов в процессе отвалообразования, повышение депрессионной кривой техногенного водоносного горизонта, изменение свойств грунтов техногенного массива и естественного основания в результате развития разрушающих деформаций.

Расчеты устойчивости выполнялись в программе SLIDE. Программа позволяет выполнять расчет устойчивости горнотехнических сооружений и естественных откосов с неоднородными инженерно-геологическими и гидрологическими условиями.

Первоначальными данные для задания физико-механических свойств грунтов, необходимые для проведения расчетов, приведены в таблицах 2.1, 2.2 и 2.3.

Геометрические параметры для каждого профиля приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Геометрические параметры профилей 1-12.

№ Профиля	Результирующий угол ( $\alpha$ , град)	Высота (Н, метры)
1-1	19	35.22
2-2	25	34.14
3-3	20	36.42
4-4	20	39.87
5-5	18	42.03
6-6	19	42.95
7-7	17	54.56
8-8	21	50.70
9-9	20	55.36
10-10	21	54.77
11-11	19	54.43
12-12	21	48.40

Для построения депрессионной поверхности грунтовых вод были использованы данные гидрогеологических наблюдений по скважинам 115 и 114. Абсолютная отметка уровня воды в скважине 115 составляет 53.25. Скважина 114 была уничтожена в ноябре 2019 года. Для вычислений будем использовать последний произведенный в ней замер - 62.65 м.

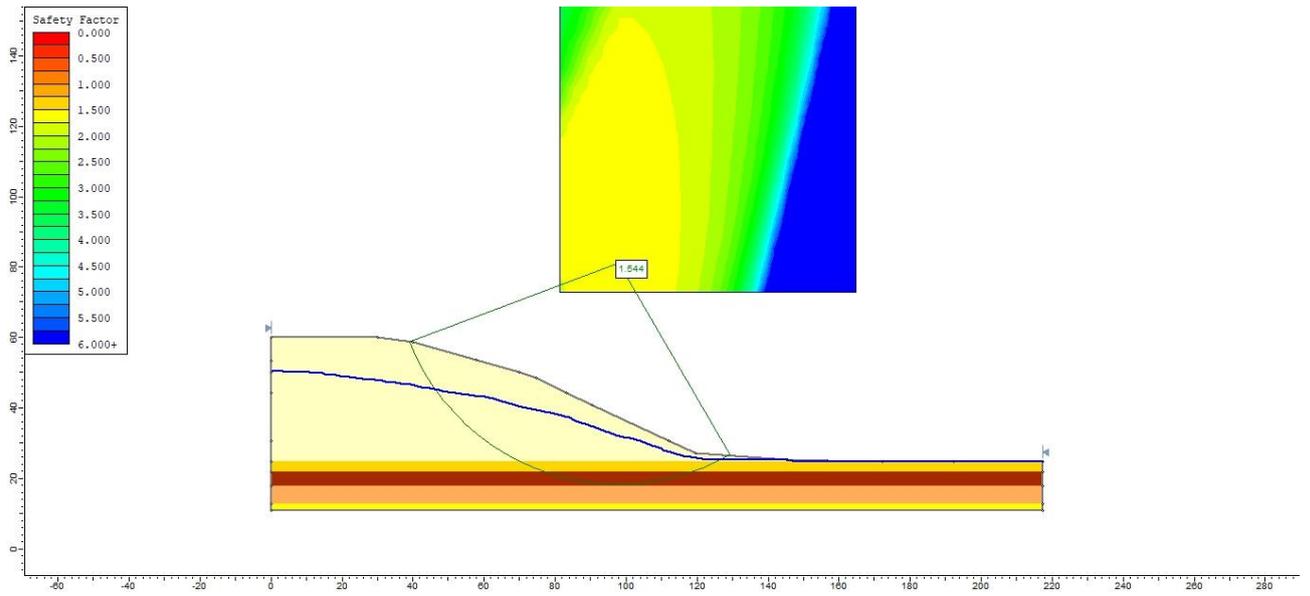


Рисунок 20. Расчетная схема к оценке устойчивости отвала по профилю 1-1. ( $k_{st} = 1.54$ )

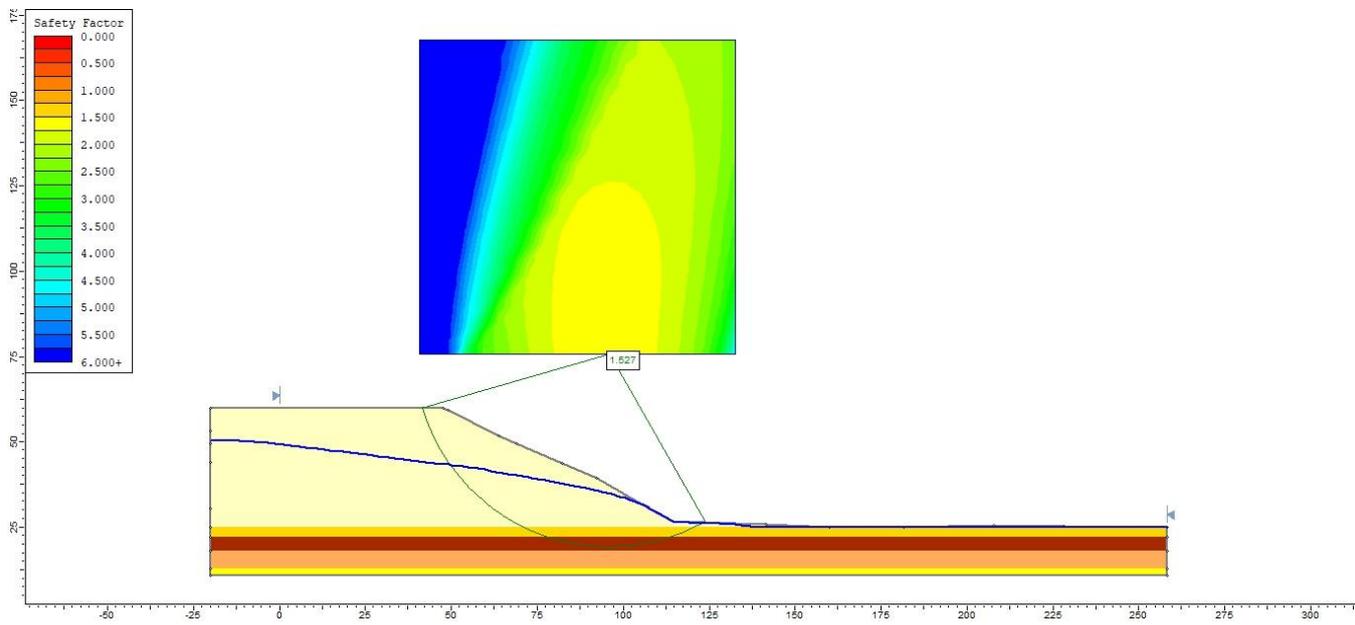


Рисунок 21. Расчетная схема к оценке устойчивости отвала по профилю 2-2. ( $k_{st} = 1.53$ )

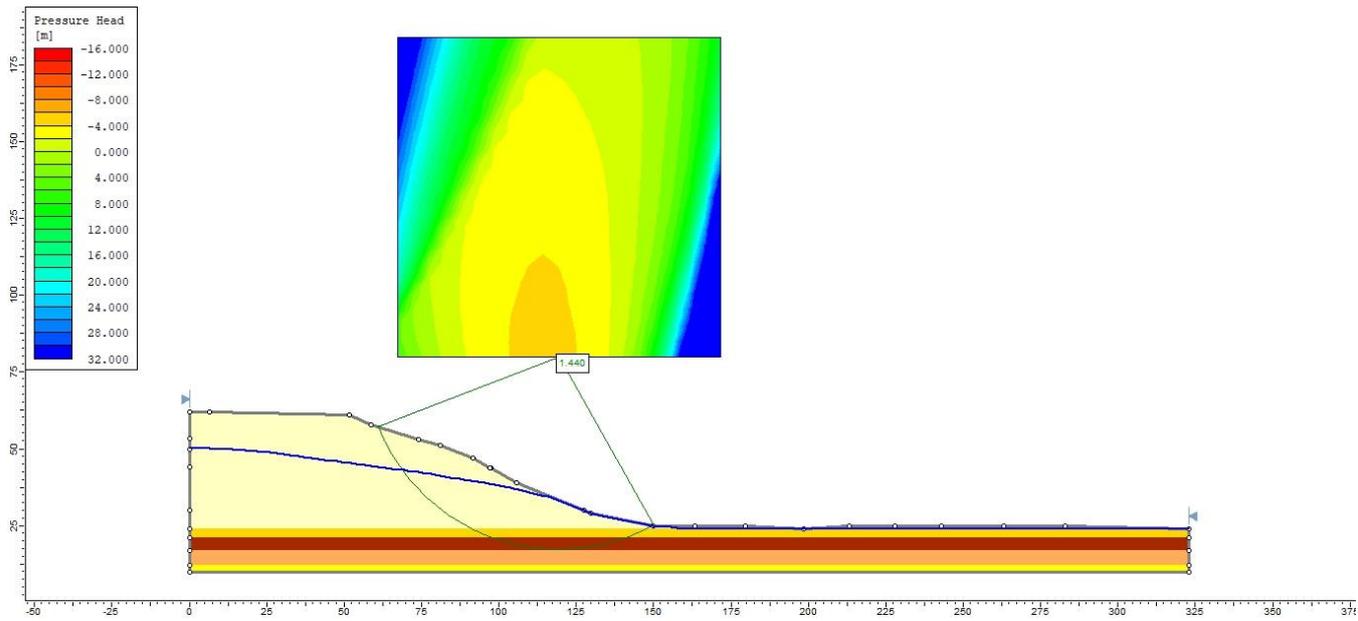


Рисунок 22. Расчетная схема к оценке устойчивости по профилю 3-3. ( $k_{st} = 1.44$ )

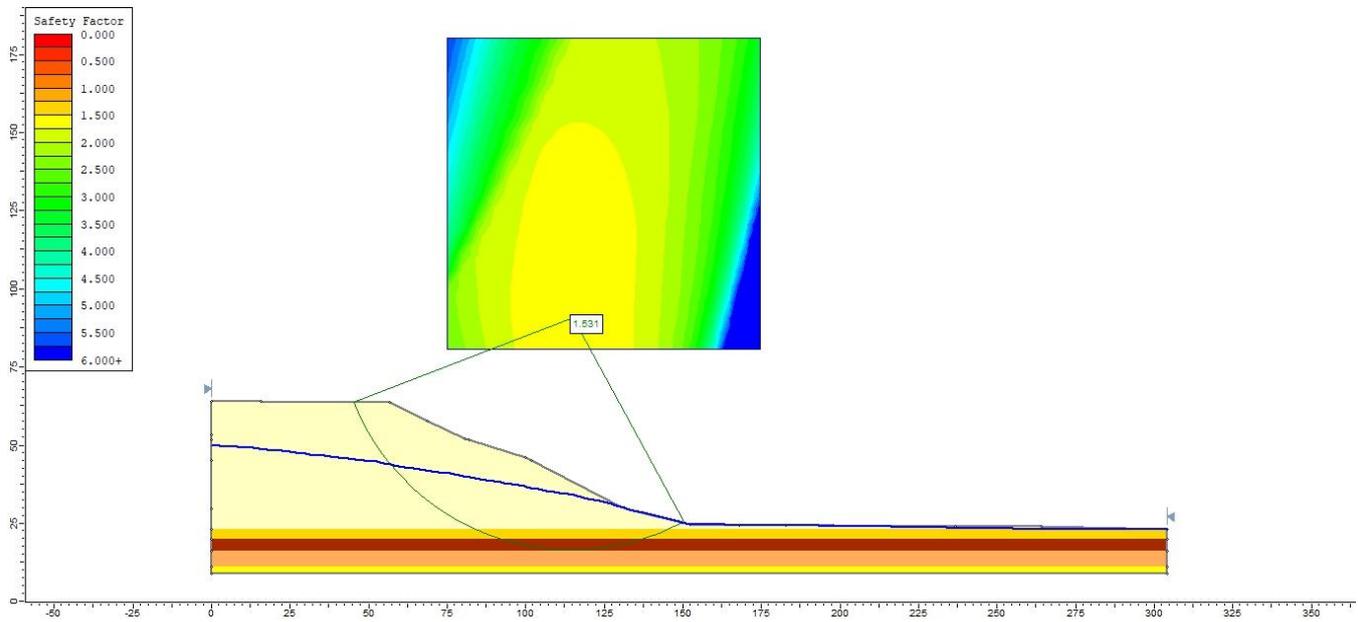


Рисунок 23. Расчетная схема к оценке устойчивости по профилю 4-4. ( $k_{st} = 1.53$ )

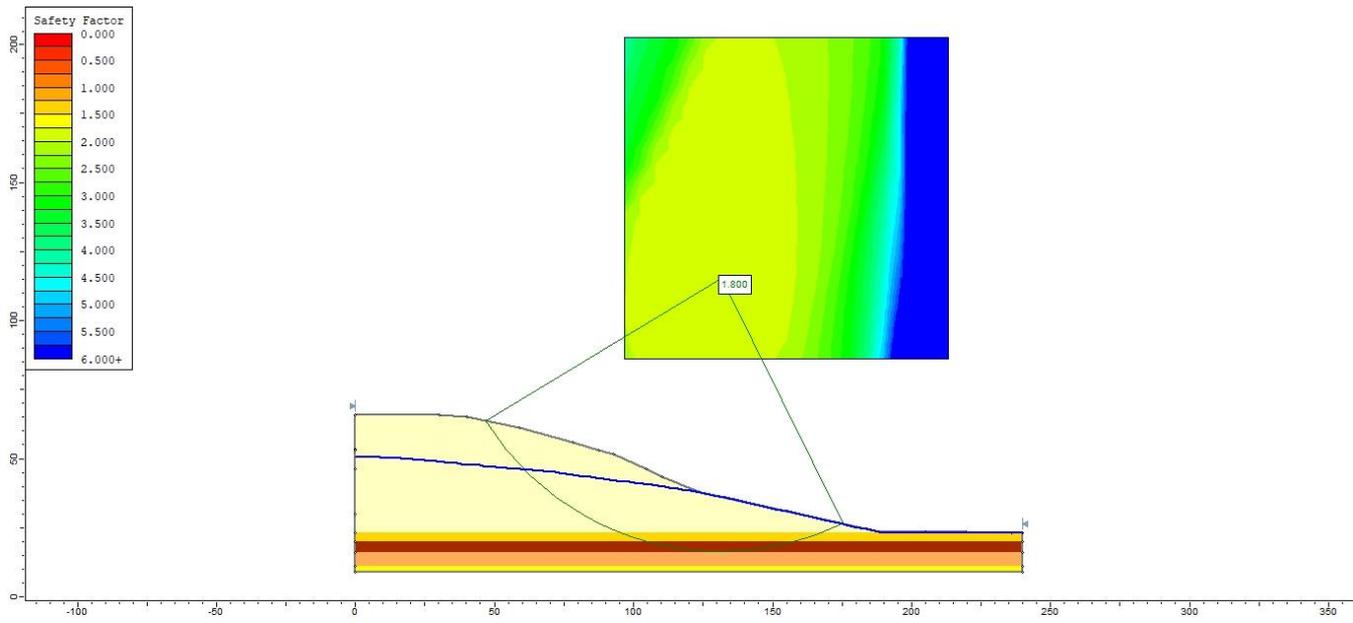


Рисунок 24. Расчетная схема к оценке устойчивости по профилю 5-5. ( $k_{st} = 1.80$ )

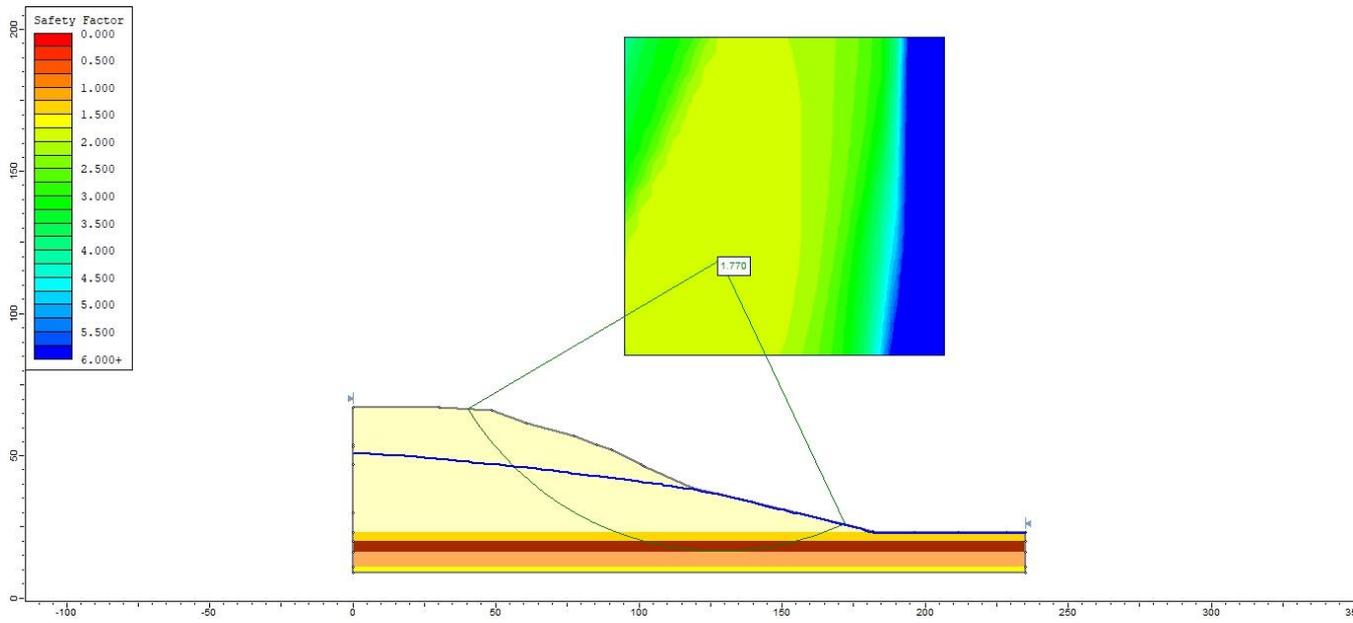


Рисунок 25. Расчетная схема к оценке устойчивости по профилю 6-6. ( $k_{st} = 1.78$ )

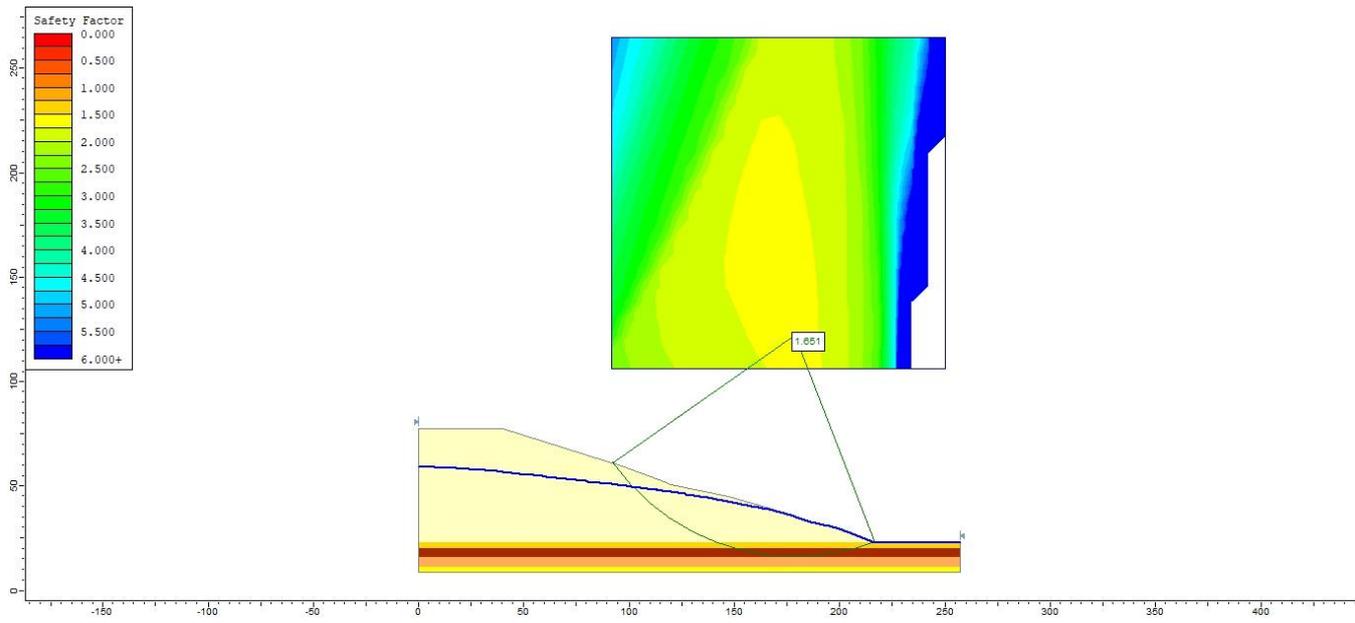


Рисунок 26. Расчетная схема к оценке устойчивости по профилю 7-7. ( $k_{st} = 1.65$ )

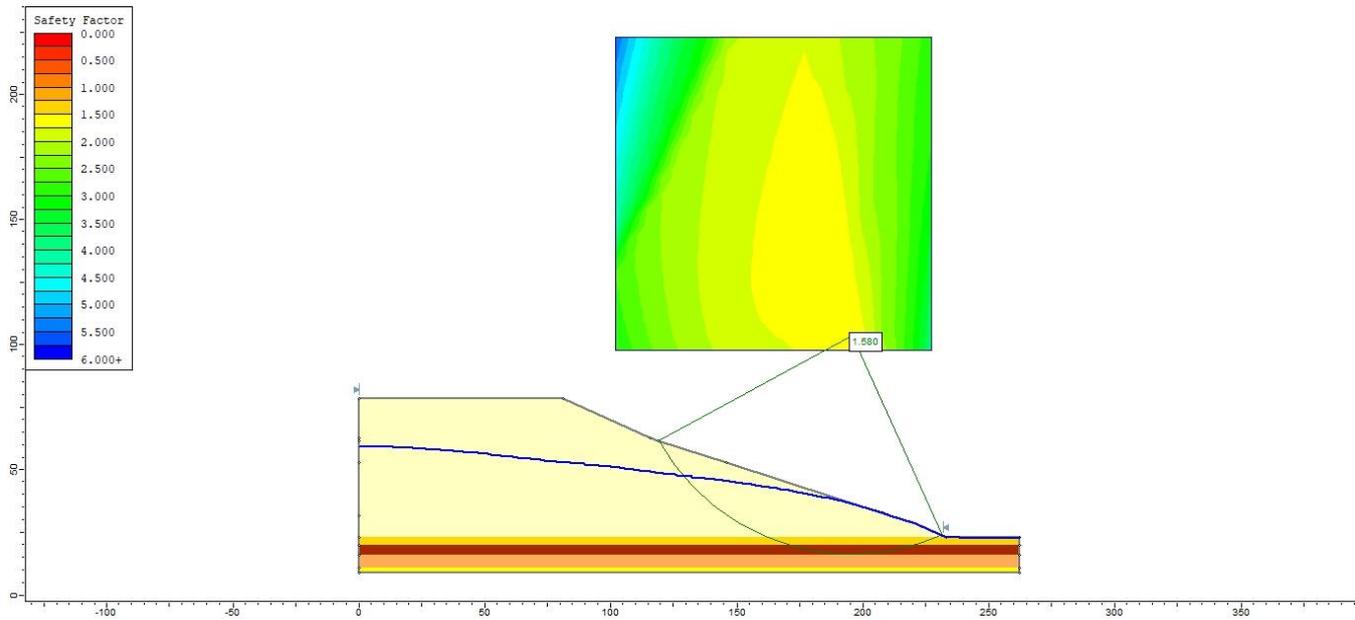


Рисунок 27. Расчетная схема к оценке устойчивости по профилю 8-8. ( $k_{st} = 1.58$ )

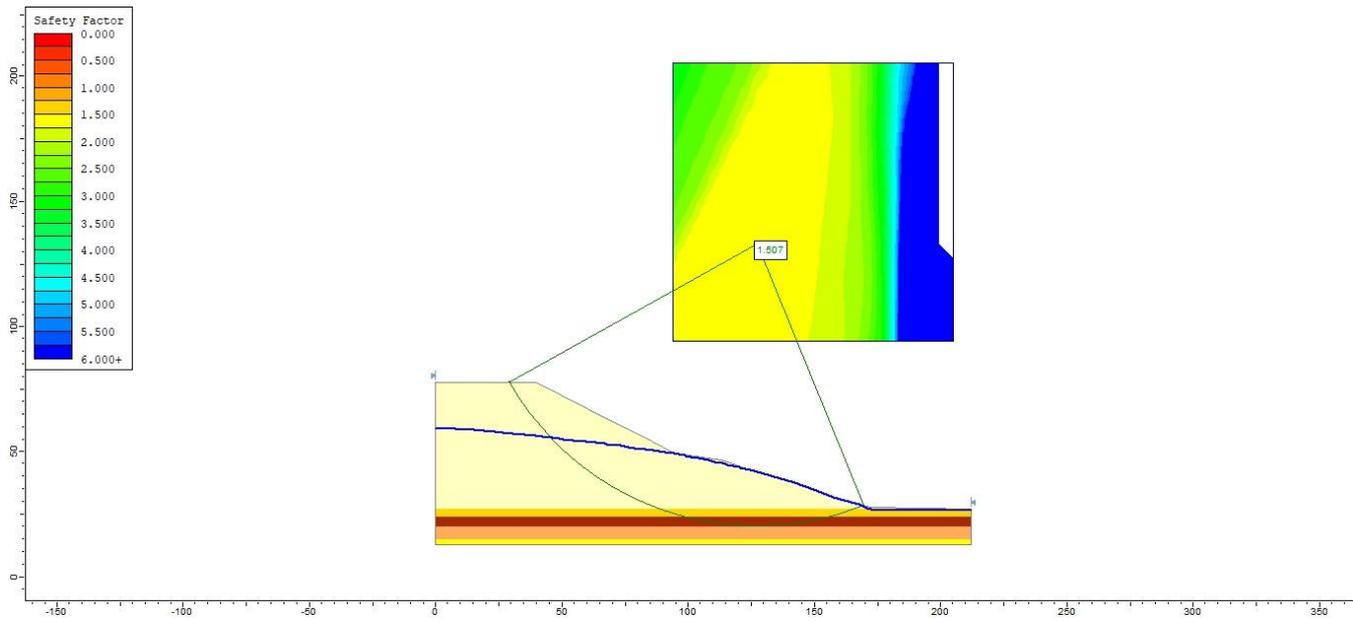


Рисунок 28. Расчетная схема к оценке устойчивости по профилю 9-9. ( $k_{st} = 1.51$ )

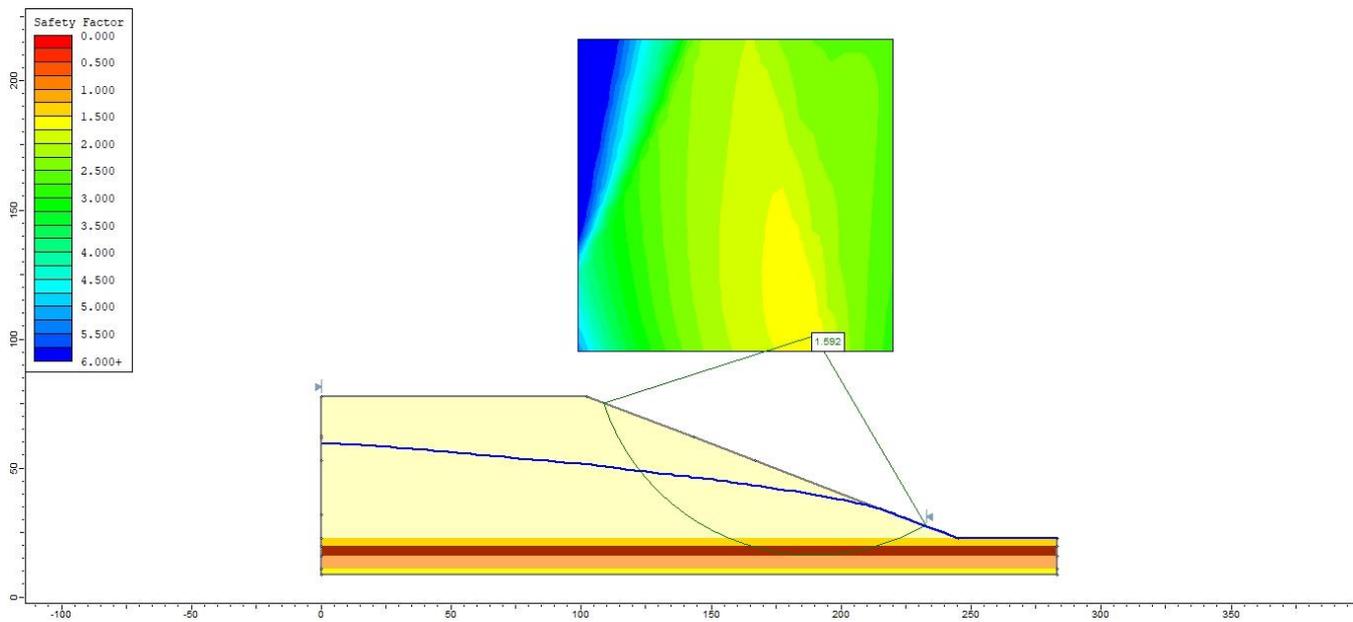


Рисунок 29. Расчетная схема к оценке устойчивости по профилю 10-10. ( $k_{st} = 1.59$ )

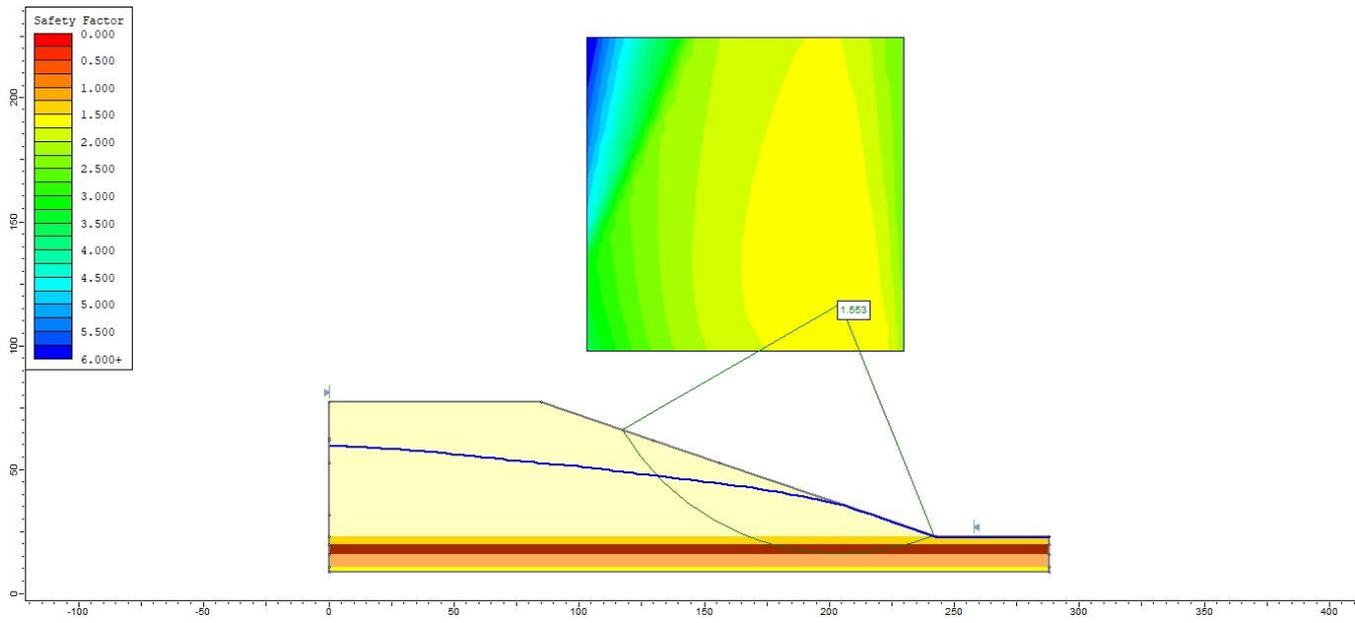


Рисунок 30. Расчетная схема к оценке устойчивости по профилю 11-11. ( $k_{st} = 1.55$ )

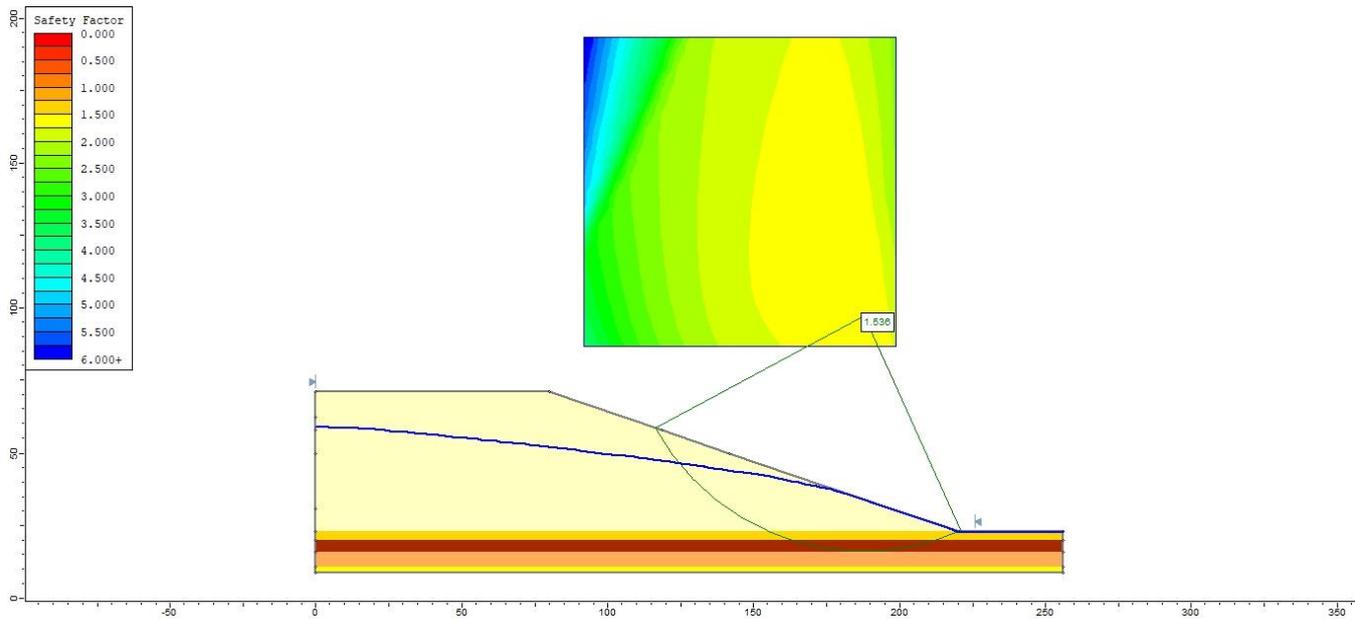


Рисунок 40. Расчетная схема к оценке устойчивости по профилю 12-12. ( $k_{st} = 1.54$ )

Результаты расчетов представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Результаты расчетов коэффициента устойчивости для каждого профиля.

№ Профиля	Значение коэффициента устойчивости ( $k_{st}$ )
1-1	1.54
2-2	1.53
3-3	1.44
4-4	1.53
5-5	1.8
6-6	1.78
7-7	1.65
8-8	1.58
9-9	1.51
10-10	1.59
11-11	1.55
12-12	1.54

Полученные значения коэффициента устойчивости значительно превышают нормативный коэффициент запаса  $k_n = 1.20$ , рекомендованный для отвалов, отсыпаемых из дисперсных грунтов на слабое слоистое основание. Обеспечение устойчивости откосных сооружений с коэффициентом запаса более 1.20 гарантирует отсутствие оползневых деформаций даже в случае, если какие-либо трудно прогнозируемые факторы не были учтены. Для оценки ситуации по расчетному значению коэффициента  $k_{st}$ , значение которого ниже нормативного, ориентиром служат следующие характерные значения:

1.  $k_{st} = 1$  (состояние предельного равновесия) (нарушение устойчивости откоса неизбежно или уже происходит в случае реализации вязкопластической модели разрушения грунтов)
2.  $1 < k_{st} < 1.10$  (нарушение устойчивости откоса возможно через некоторое время из-за недостаточной оценки устойчивости, требуется наблюдение за смещениями откосов для выявления момента нарастания сдвиговых деформаций)

Рассчитанные коэффициенты устойчивости, полученные для каждого из профилей, не только гарантируют стабильное состояние откосов техногенного массива, но и предусматривают возможность наращивания высоты отвала.

Однако, полученные результаты не вполне коррелируются с данными геодезического мониторинга. Имеет смысл проверить полученные значения методом обратного расчета, так как показатели физико-механических свойств естественного основания были определены при

испытании пород ненарушенного сложения, тогда как оползневые смещения происходят по сформировавшимся в результате длительного развития разрушающих деформаций зонам ослабления. Особенно важно произвести проверку для профилей, проходящих через старый отвал (профили 1-6).

Идея обратного расчета заключается в подборе параметров свойств грунтов (сцепление и угол внутреннего трения) для инженерно-геологического слоя, который является определяющим в развитии оползневого смещения и по которому проходит поверхность скольжения. При этом коэффициент устойчивости принимается равным 1. Для определения параметров были использованы геометрические параметры откоса по профилю 3-3 на 2010 год ( $\alpha = 28^\circ$ ).

Проведем дополнительные расчеты. Рассчитаем коэффициент устойчивости для профилей 1-6 со следующими исходными данными, полученными в результате обратного расчета, представленными в таблице 3.3.

Таблица 3.3. Начальные данные для проведения дополнительных расчетов.

Наименование ИГЭ	$\rho$ , т/м <sup>3</sup>	$c$ , кПа	$\phi$ , град
ИГЭ 2 - суглинок делювиальный, измененный в зоне сдвигов	1,91	15	14
ИГЭ 3 - глина шоколадная, измененная в зоне сдвигов	1,86	30	0
ИГЭ 4 – глины и суглинки аллювиальные, ненарушенные	1,81	37	17
ИГЭ 5 - песок	1,70	3	27

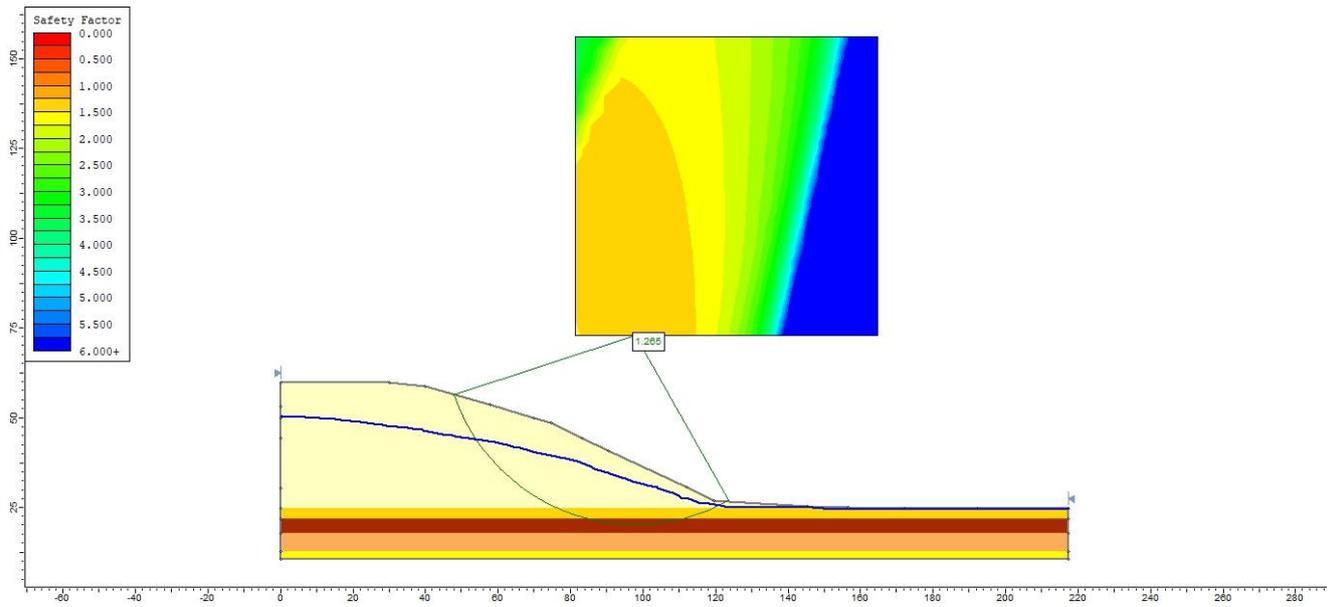


Рисунок 41. Дополнительная расчетная схема к оценке устойчивости профиля 1-1. ( $k_{st} = 1.26$ )

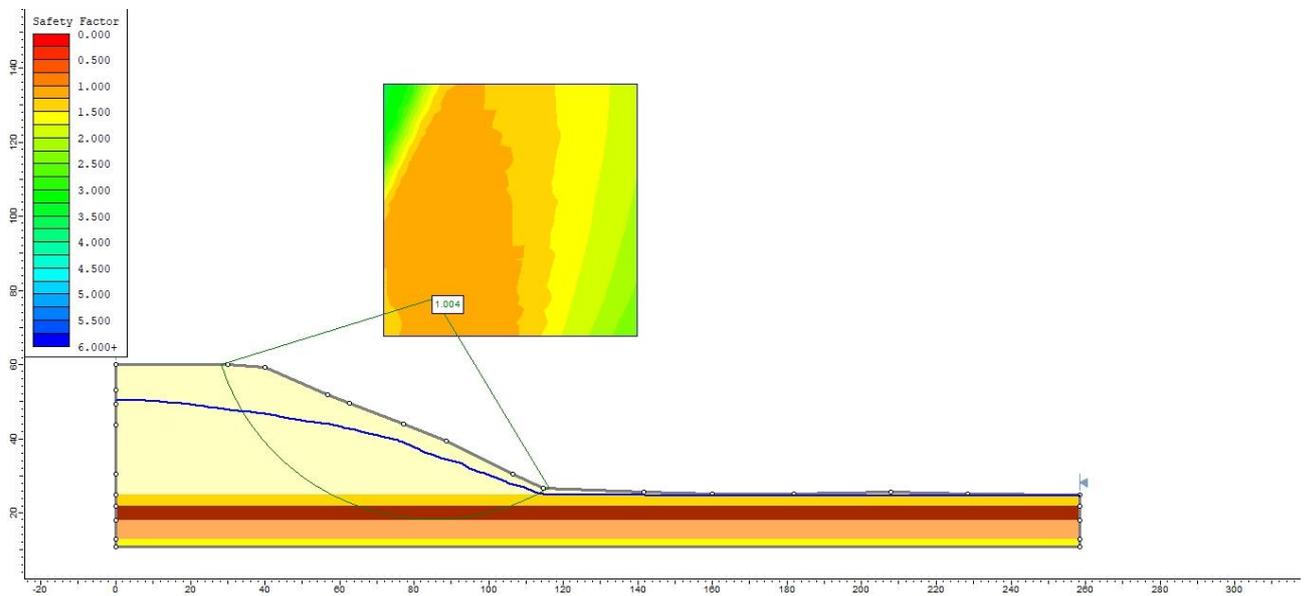


Рисунок 42. Дополнительная расчетная схема к оценке устойчивости профиля 2-2. ( $k_{st} = 1.00$ )

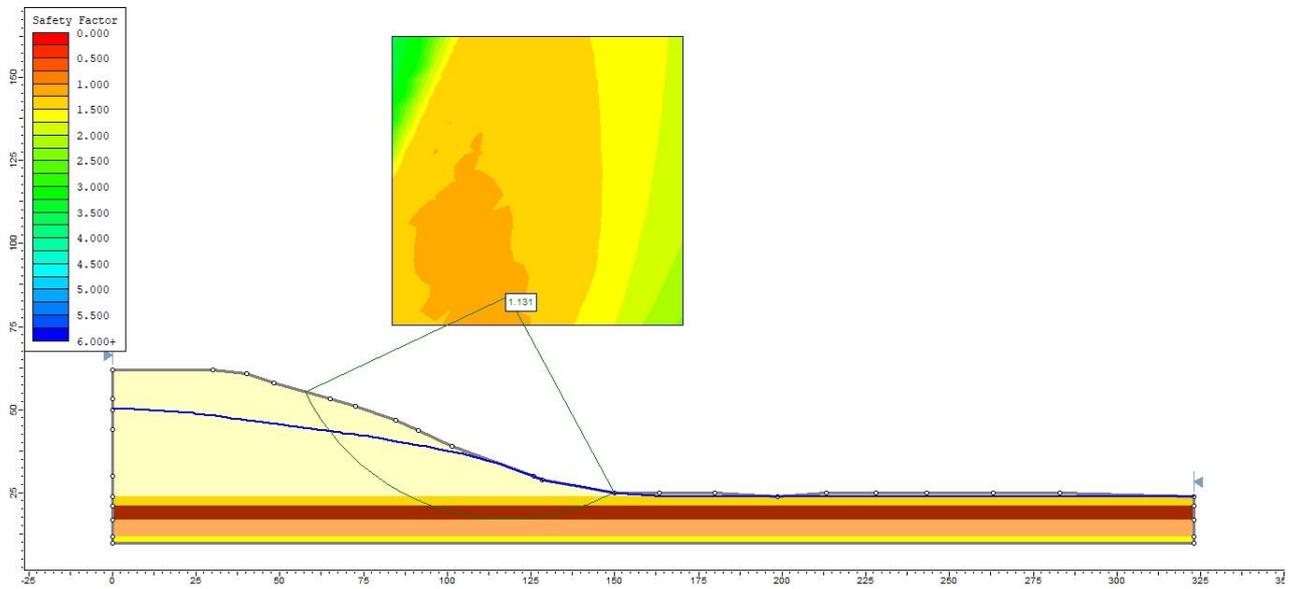


Рисунок 42. Дополнительная расчетная схема к оценке устойчивости профиля 3-3 ( $k_{st} = 1.13$ ).

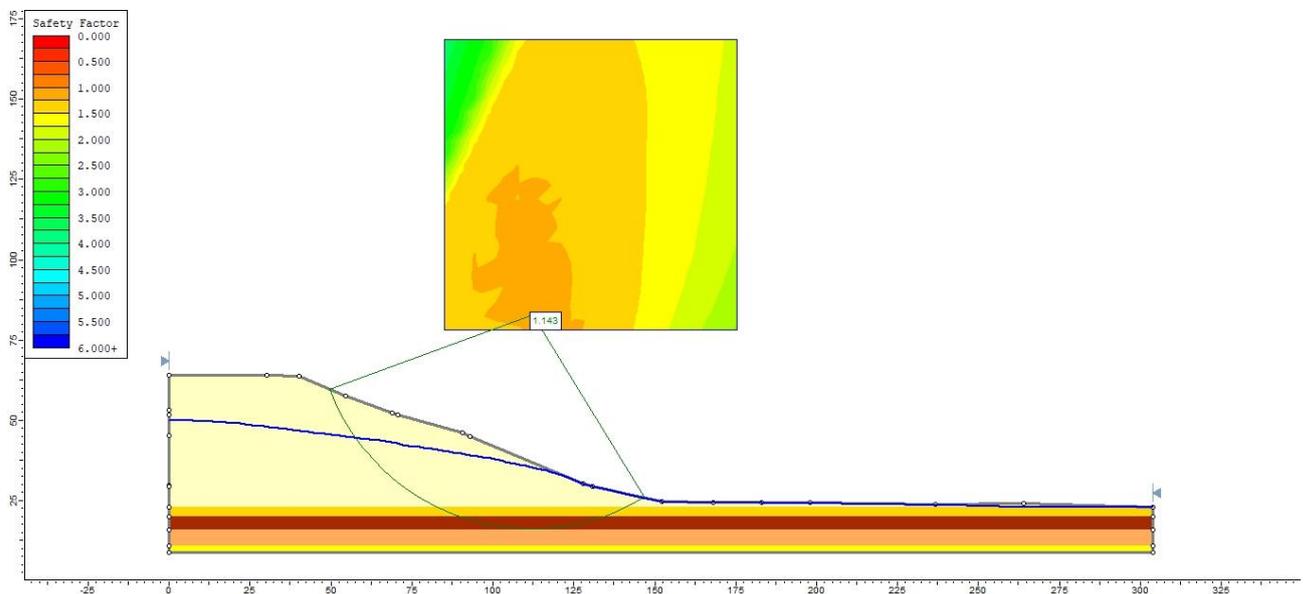


Рисунок 43. Дополнительная расчетная схема к оценке устойчивости профиля 4-4  $k_{st} = 1.14$ ).

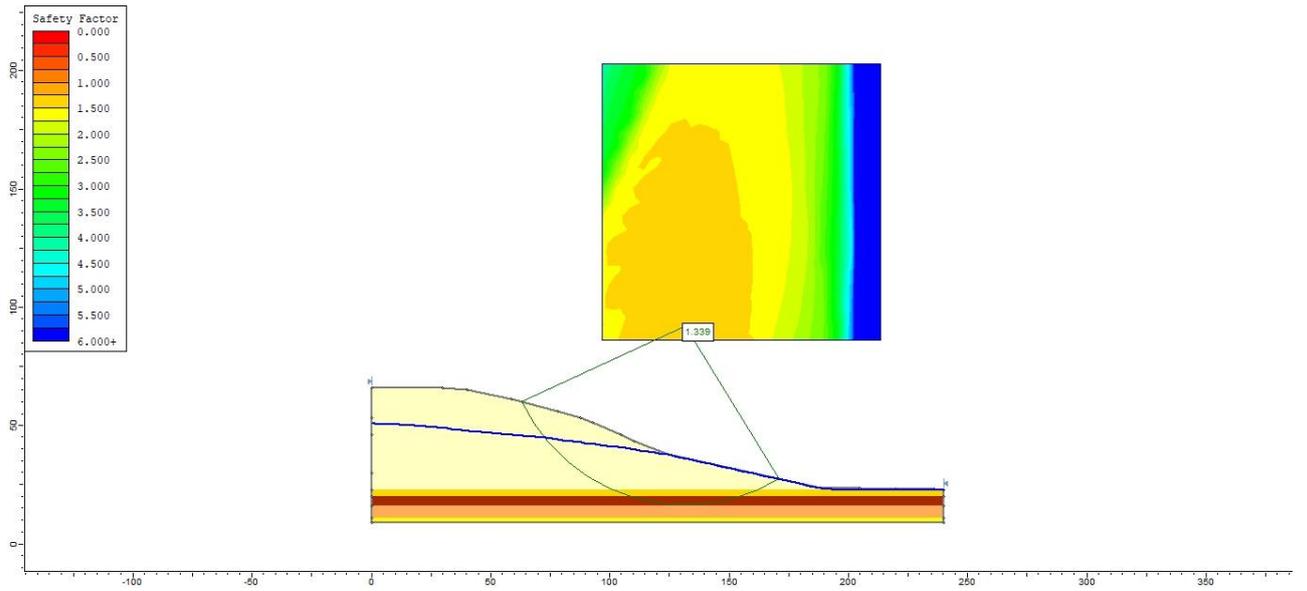


Рисунок 43. Дополнительная расчетная схема к оценке устойчивости профиля 5-5 ( $k_{st} = 1.34$ ).

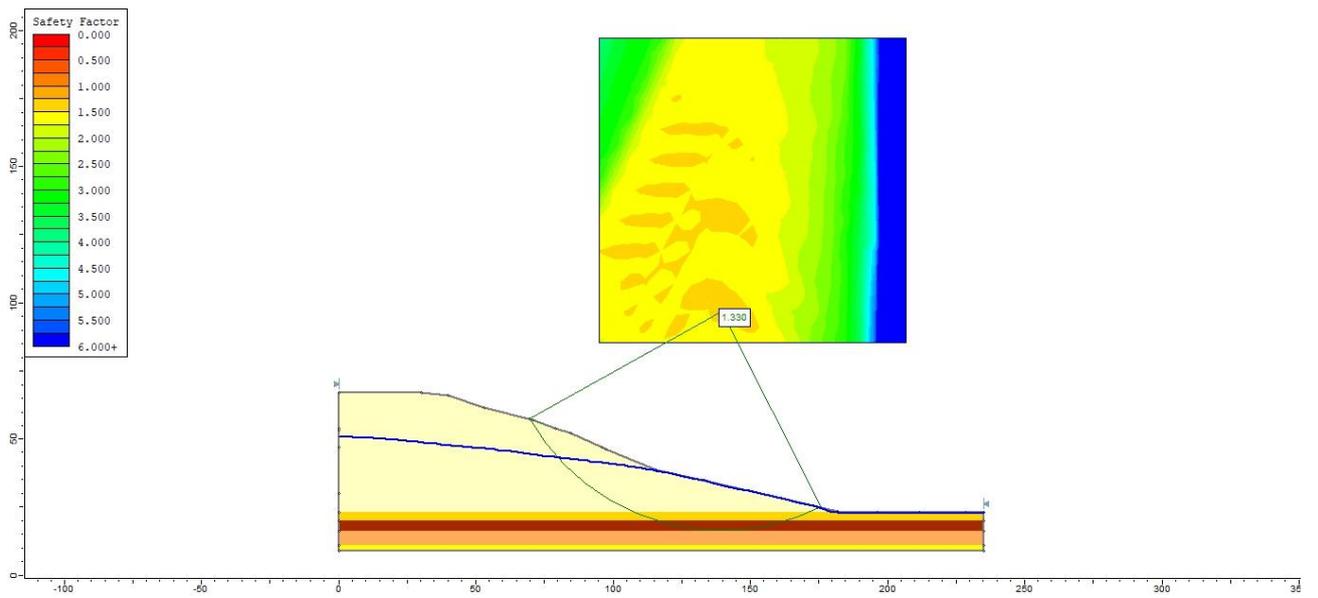


Рисунок 44. Дополнительная расчетная схема к оценке устойчивости профиля 6-6 ( $k_{st} = 1.33$ ).

Формирование отвала на площади расширения (профили 7-12) на данный момент ведется без оползневых деформаций. Грунты естественного основания не подвергались разрушающему воздействию, которое могло бы существенно снизить их прочность. Соответственно, для текущих оценок устойчивости справедливо использовать характеристики ненарушенных пород. Однако, имеет смысл провести дополнительные расчеты, предусматривающие возможность развития деструктивных нарушений естественного основания при дальнейшей эксплуатации отвального сооружения.

Сделаем необходимые вычисления для профилей 7, 8, 9, 10, 11 и 12.

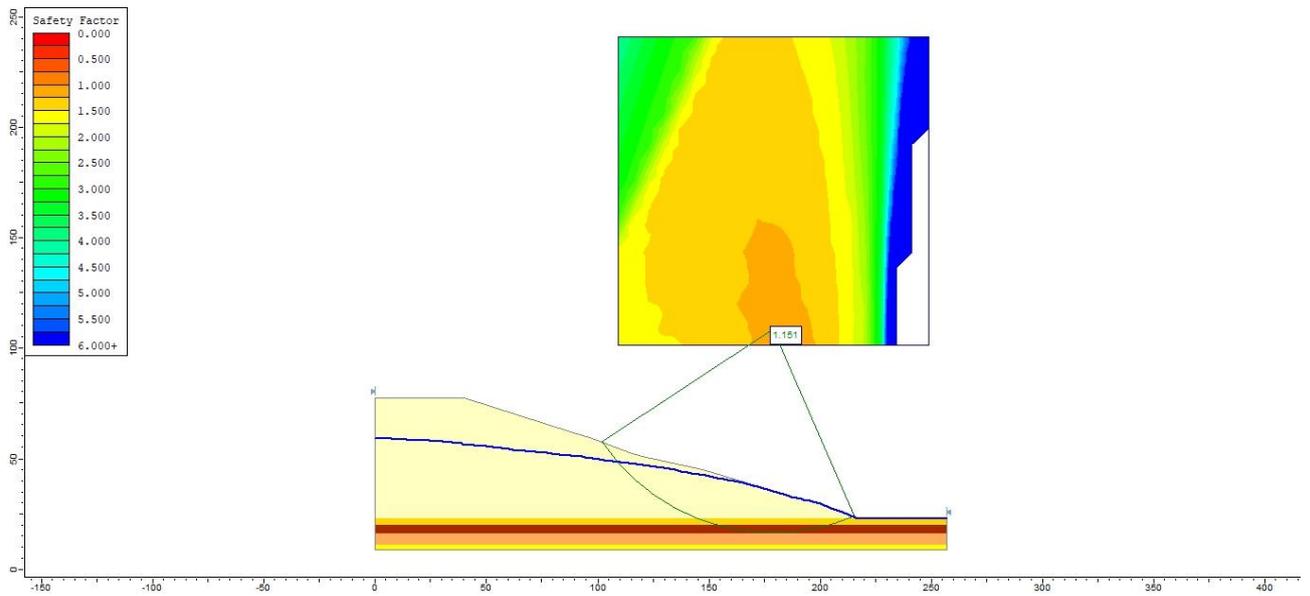


Рисунок 45. Дополнительная расчетная схема к оценке устойчивости профиля 7-7 ( $k_{st} = 1.15$ )

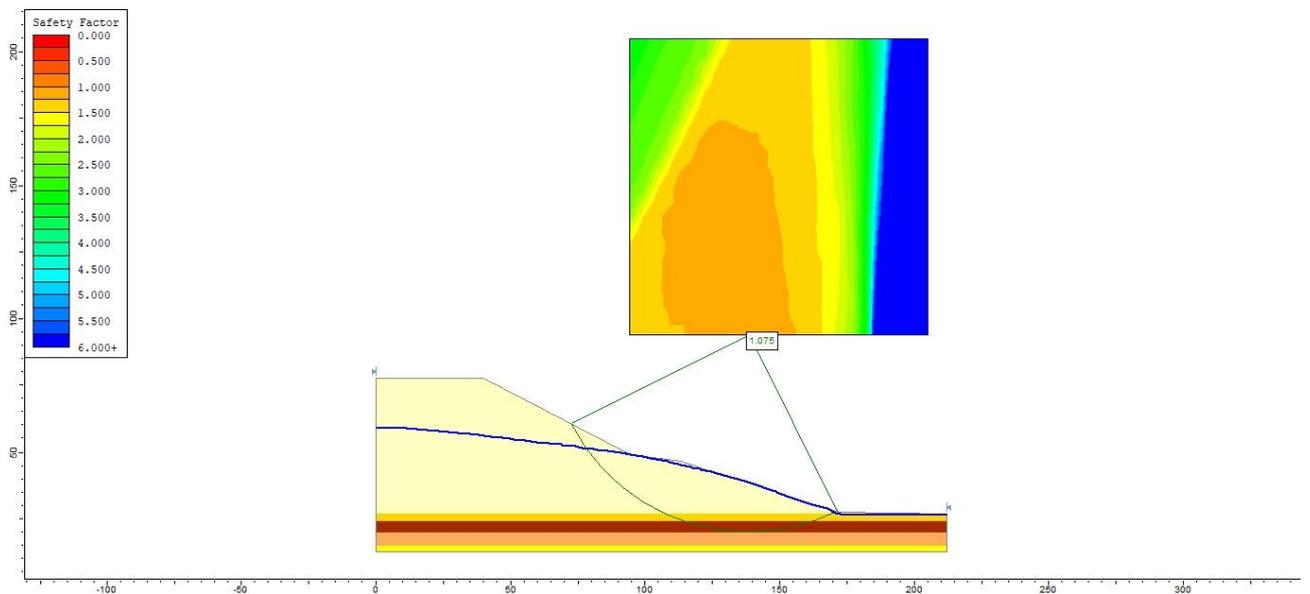


Рисунок 46. Дополнительная расчетная схема к оценке устойчивости профиля 8-8 ( $k_{st} = 1.07$ )

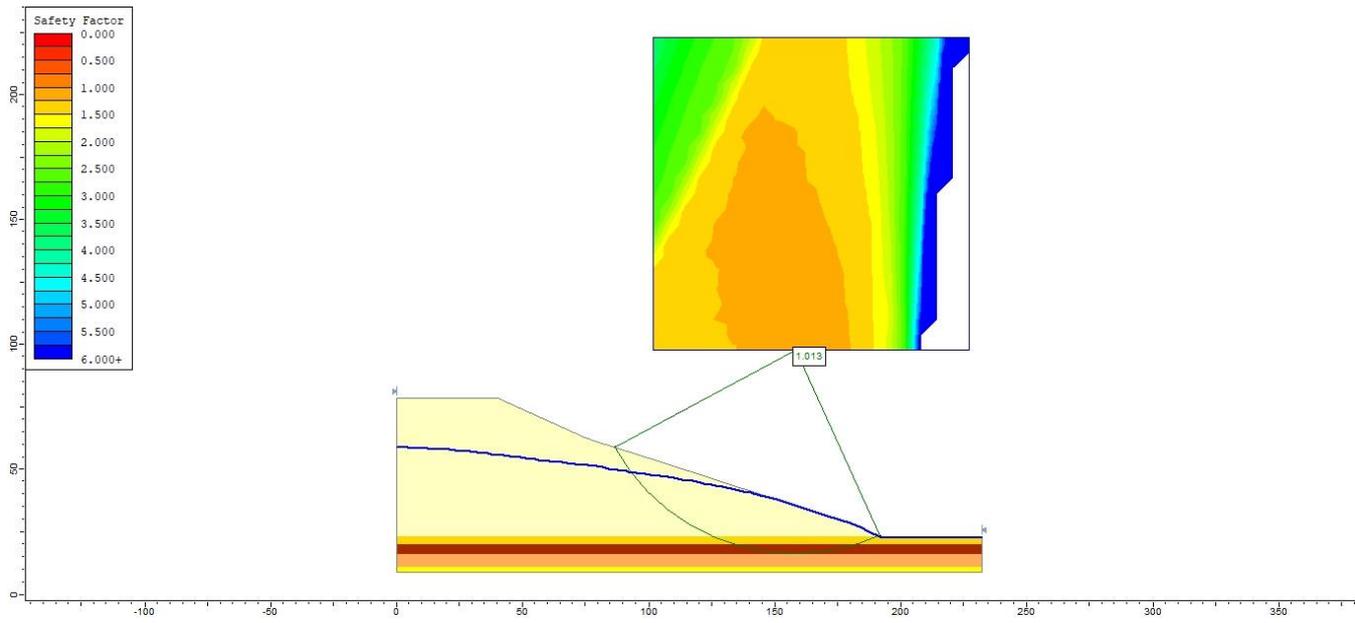


Рисунок 47. Дополнительная расчетная схема к оценке устойчивости профиля 9-9 ( $k_{st} = 1.01$ )

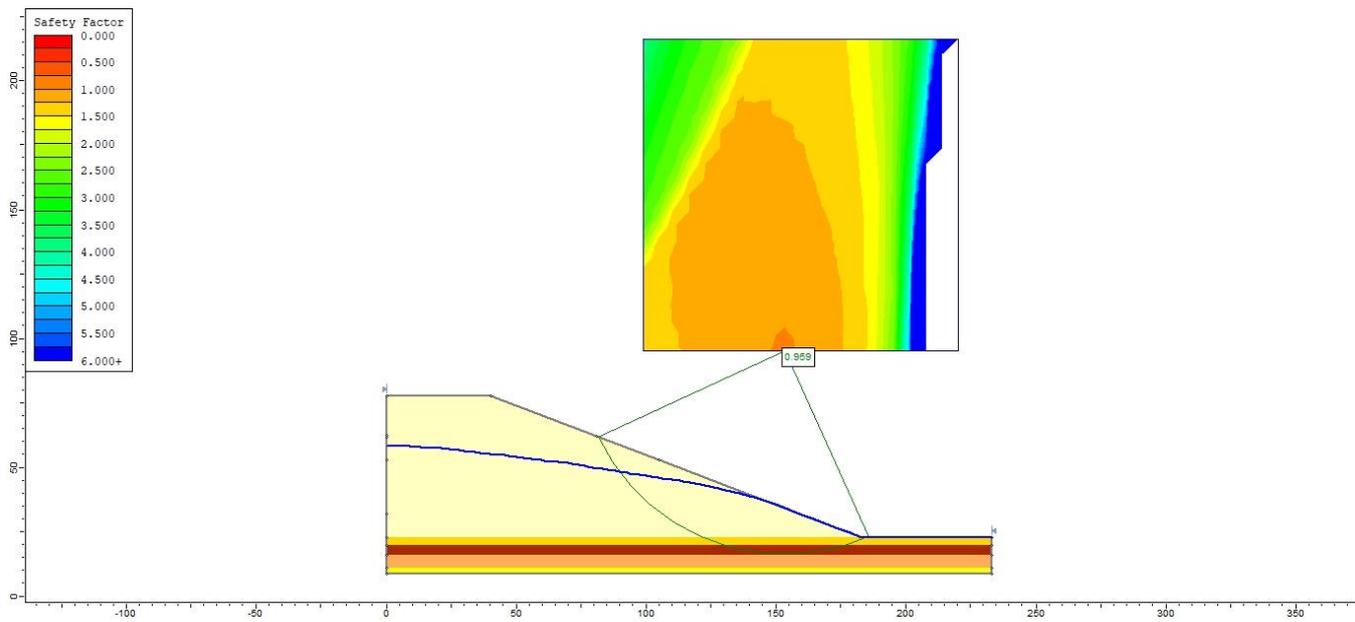


Рисунок 48. Дополнительная расчетная схема к оценке устойчивости профиля 10-10  
( $k_{st} = 0.96$ )

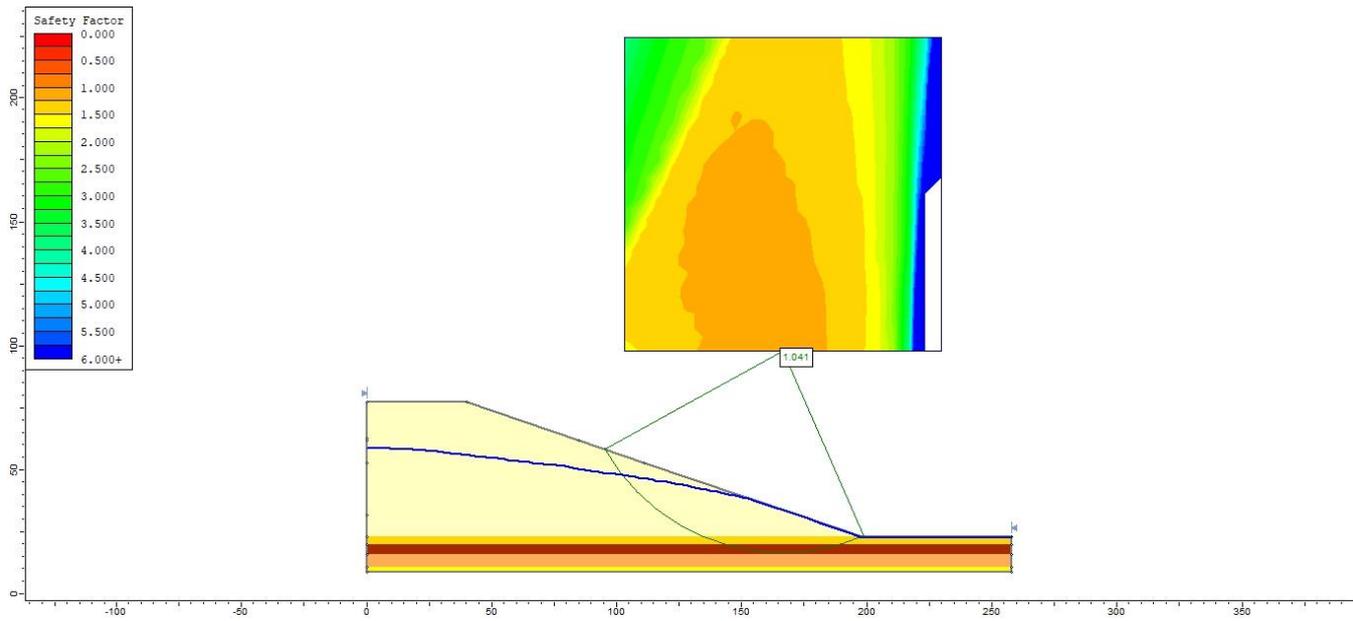


Рисунок 49. Дополнительная расчетная схема к оценке устойчивости профиля 11-11

( $k_{st} = 1.04$ )

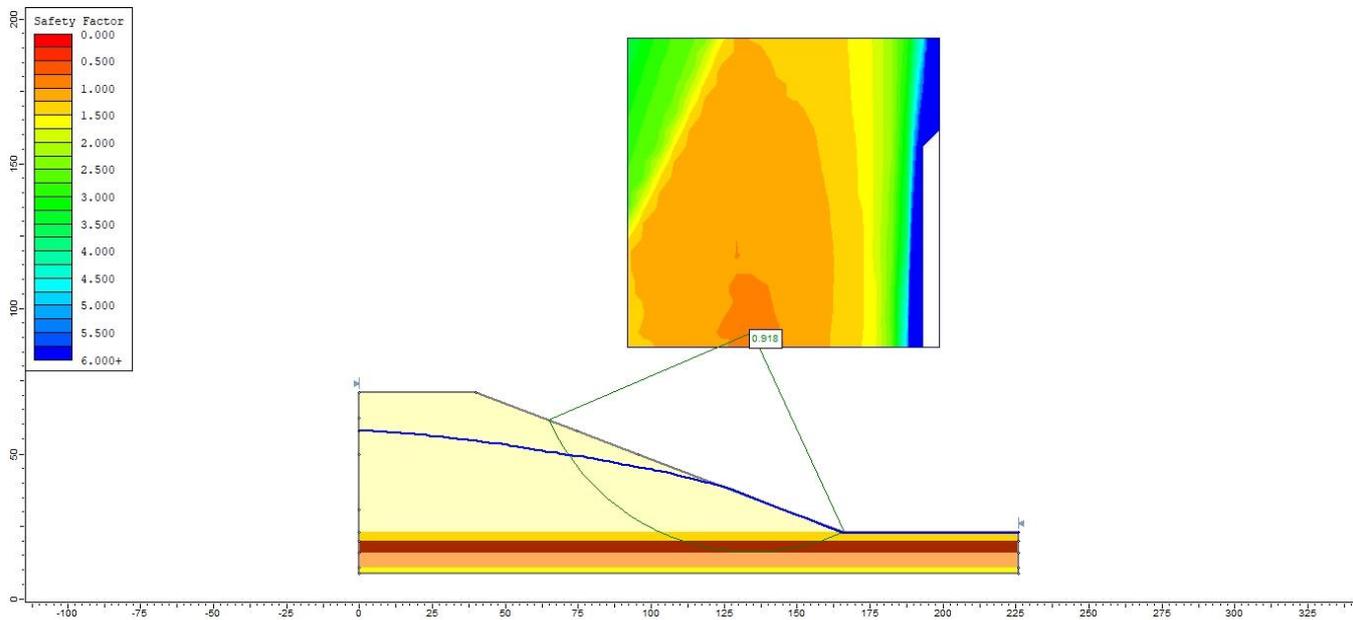


Рисунок 50. Дополнительная расчетная схема к оценке профиля 12-12 ( $k_{st} = 0.92$ )

Сравним полученные результаты с первоначальными вычислениями (таблица 3.4.)

Таблица 3.4. Результаты проведенных расчетов для профилей 1-12.

№ Профиля	Значение коэффициента устойчивости ( $k_{st}$ )	
	Первоначальные расчеты	Дополнительные расчеты
1-1	1.54	1.26
2-2	1.53	1.00
3-3	1.44	1.13
4-4	1.53	1.14
5-5	1.8	1.40
6-6	1.78	1.33
7-7	1.65	1.15
8-8	1.58	1.07
9-9	1.51	1.01
10-10	1.59	0.96
11-11	1.55	1.04
12-12	1.54	0.92

Согласно результатам, некоторые коэффициенты устойчивости, полученные при дополнительных расчетах, ниже нормативных, а для профилей 10 и 12 они оказались меньше 1, то есть не отвечают даже состоянию предельного равновесия.

Увеличить устойчивость склона к оползневым деформациям можно путем уменьшения их угла наклона. Определим углы наклона для профилей 3, 9, 10, 11 и 12, при которых значение коэффициента устойчивости будет не менее 1.20 (гарантия отсутствия возникновения оползневых деформаций).

Полученные результаты представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5. Значения результирующих углов профилей 2, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 11 и 12 ( $k_{st}$  не ниже 1.20).

№ Профиля	Результирующий угол ( $\alpha$ , град)
2-2	18
3-3	17
4-4	18
7-7	17
8-8	16
9-9	15

10-10	15
11-11	15
12-12	15

Так как отвал является расположен на территории действующего предприятия, разумно будет сделать расчеты углов, позволяющих увеличить высоту отвала. Для большей надежности расчеты будем производить с учетом возможности развития деструктивных нарушений в естественном основании.

Произведем расчеты для высоты отвала, равной 70 метрам.

Полученные результаты представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6. Значения коэффициента устойчивости откосов отвала при соответствующих углах наклона для высоты отвала, равной 70 метров.

Результирующий угол ( $\alpha$ , град)	Коэффициент устойчивости ( $k_{st}$ )
20	0.89
16	1.03
14	1.18
13	1.31

### 3.3. Рекомендации по обеспечению устойчивости откосов отвала

Для предотвращения развития оползневых деформаций можно предложить следующий комплекс мероприятий:

1. Предотвращение подтопления территории у подножия отвала
2. Остановка проведения отвальных работ на участке при обнаружении признаков развития оползневых деформаций
3. Корректировка параметров откосов отвала (изменение результирующих углов)
4. Организация дренажа для понижения уровня техногенного горизонта
5. Отсыпка пригрузов в нижних частях склонов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были изучены инженерно-геологические и гидрогеологические условия техногенного отвального сооружения Балаковского Филиала АО «Апатит» и проинтерпретированы результаты геодезического мониторинга. На основании полученных данных при помощи численного моделирования в программе SLIDE были рассчитаны максимальные и минимальные значения параметров устойчивости откосов отвала. По результатам расчетов были определены вероятности возникновения оползневых процессов. Также был произведен расчет необходимых геометрических параметров откоса для повышения высоты отвала примерно на 20 метров по сравнению с текущим положением. Кроме того, были составлены рекомендации по обеспечению устойчивости откосов отвала.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астахов В.И. Начала четвертичной геологии: Учеб.пособие. – СПб.: Изд-во С.-Петербург.ун-та - 2008. – 224 с.
2. Бискэ, Г.С. Геология России: курс лекций. – СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та. – 2019. – 228 с.
3. Болтамирович С.Ф., Жиров А.И., Ласточкин А.Н. Геоморфология: Учеб.пособие. – СПб.: Изд-во Academia – 2005. – 528 с.
4. Иванов И.П., Тржцинский Ю.Б. Инженерная геодинамика. – СПб.: Наука – 2001. – 416 с.
5. Мироненко В.А. Динамика подземных вод – М.: Горная книга – 2009. -519 с.
6. Орлова Т.Б. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Серия 1.Средневожская. Лист N-39-XXXI. Объяснительная записка. – М.: МФ ВСЕГЕИ - 2013. – 161 с.
7. Отчет о НИР по договору № 10 007 ХД от 01.03.2010г «Выполнить изучение инженерно-геологических условий и разработать рекомендации по оптимизации параметров отвалов ООО «Балаковские минеральные удобрения» (заключительный). Разработчик СПГГИ (ТУ). – г. Санкт-Петербург, 2010 г.
8. Отчет о НИР по договору №14009 ХД от 04.02.2019 г. «Проведение мониторинга устойчивости существующего отвала фосфогипса ЗАО «БМУ». Разработчик НМСУ «Горный». – г. Санкт-Петербург, 2019 г.
9. Петров Б.В., Кириков В.П. Геология и полезные ископаемые России. В шести томах. Т.1. Запад России и Урал. Кн. 1. Запад России. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ – 2006. – 528 с.
10. Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах. – СПб: Межотраслевой научный центр ВНИМИ - 1998. - 208 с.
11. Староверов В.Н., Гужиков А.Ю., Рихтер Я.А., Варламова Р.Г., Ефремов В.А. Учебное пособие для полевой практики по общей геологии. Саратовский полигон. – Саратов: Изд-во «Наука» - 2009. – 194 с.
12. Фёдоров П. В. История земной коры. Атлас иллюстраций к курсу исторической геологии: Учебное пособие – СПб.: ВСЕГЕИ – 2006 - 16 с.
13. Шеин В.С., Фортунатова Н.К., Алференок А.В. Геодинамическая эволюция и тектоническое районирование Восточно-Европейской платформы
14. Topographic-map [Электронный ресурс], данные для перехода: <https://ru-ru.topographic-map.com>

15. CLIMATE-DATA [Электронный ресурс], данные для перехода на сайт:  
<https://ru.climate-data.org>
16. Вода России [Электронный ресурс], данные для перехода на сайт: <https://water-rg.ru>
17. Государственная геологическая карта России [Электронный ресурс], данные для перехода на сайт: <http://www.geokarta.ru>
18. Большая саратовская энциклопедия [Электронный ресурс], данные для перехода на сайт: <http://saratovregion.ucoz.ru>
19. Муниципальное образование. Город Балаково [Электронный ресурс], данные для перехода на сайт: <https://www.mo-balakovo.ru>
20. Администрация муниципального Балаковского района [Электронный ресурс], данные для перехода на сайт: <http://www.admbal.ru>