

Санкт-Петербургский государственный университет

Гавриленко Владислав Васильевич

Выпускная квалификационная работа

*Анализ инженерно-геологических условий для проектирования наращивания дамб
хвостохранилища на предприятии по обогащению железной руды (Республика Карелия)*

Уровень образования: магистратура

Направление 05.04.01 «Геология»

Основная образовательная программа ВМ.5515.2018 «Геология»

Профиль «Инженерная геология»

Научный руководитель:

ст. преп. каф. гидрогеологии СПбГУ
к. т. н., Страупник И. А.

Рецензент:

доцент
каф. гидрогеологии и инженерной геологии СПбГУ

к. г.-м. н., Поспехов Г. Б.

Санкт-Петербург

2020 г.

Аннотация

УДК 624.131

Гавриленко В. В. Анализ инженерно-геологических условий для проектирования наращивания дамб хвостохранилища на предприятии по обогащению железной руды (Республика Карелия): магистерская диссертация // Науч. рук. - ст. преп. каф. гидрогеологии СПбГУ, к.т.н. Страупник И. А. // 2020 г. - 4 главы, 32 рис., 48 табл., общий объем 166 стр., 61 источник, 2 граф. прил.

Объект исследования: ограждающая плотина, хвостохранилище.

Цель работы – обеспечение безопасной эксплуатации хвостового хозяйства Костомукшского горно-обогатительного комбината (АО «Карельский окатыш») ПАО «Северсталь», включающее прогноз устойчивости плотины хвостохранилища при изменении различных инженерно-геологических факторов, оказывающих влияние на устойчивость техногенного массива.

В данной дипломной работе изложены результаты инженерно-геологических исследований и расчета устойчивости ограждающей плотины хвостохранилища АО «Карельский окатыш».

В первой главе диссертации приводится обзор физико-географического, экономического и геологического очерков района работ.

Во второй главе дана характеристика месторождений железных руд, месторождений продуктов их обогащения, а также технология обогащения и изученность отходов производства окатышей из железных руд.

В третьей главе приведена инженерно-геологическая характеристика плотины и характеристика техногенных гидротехнических сооружений хвостохранилища.

Четвертая глава посвящена оценке устойчивости плотины, включая анализ текущего положения по различным данным, общие принципы выполнения расчетов устойчивости, обоснование расчетных геомеханических схем для техногенных массивов, а также результатов расчета устойчивости и рекомендаций по оптимальным параметрам отвалов.

В процессе работы проведены: статистическая обработка данных физико-механических свойств грунтов; расчет вертикальных и горизонтальных напряжений, действующих на плотину, включающий построение эпюр напряжений; расчет устойчивости плотины.

Основой для выполнения работы послужили нормативные документы, научные и методические материалы в области инженерной геологии, а также собственные данные, полученные в ходе производственной практики и технические отчеты АО «МеханОбрИнжиниринг», АО «Карельский окатыш».

Результатом работы является достижение поставленной цели, а именно выполнение прогноза устойчивости плотины хвостохранилища при изменении инженерно-геологических условий. Плотина устойчива по фактическим данным (т.е. на данный момент), а также устойчива и при проектном наращивании на 10 м. Результаты представлены в виде различных схем и графиков.

Ключевые слова: хвостохранилище, хвосты обогащения, первичные и вторичные плотины, система складирования хвостов, устойчивость откосов.

Annotation

Gavrilenko V. V. Analysis of engineering and geological conditions for designing of tailings dump dam extension at iron ore processing plant (Republic of Karelia): Master's thesis // Proc. of Sci. - Saint-Petersburg State University, Candidate of Technical Sciences Straupnik I.A. // 2020. - 4 chapters, 32 pics., 48 table, total volume 166 pp, 60 sources, 2 graphs. adj.

Object of investigation: fencing dam, tailing dump.

The purpose of the work is to ensure safe operation of the tailing facilities of the Kostomuksha Mining and Processing Integrated Works (JSC "Karelsky Okatysh") of PJSC "Severstal", which includes a forecast of the tailing dump dam stability at changes in various engineering and geological factors affecting the stability of the man-made massif.

This diploma thesis presents the results of engineering-geological research and stability calculation of the embankment dam of the JSC "Karelsky Okatysh" tailings dump.

The first chapter of the dissertation provides an overview of physical, geographical, economic and geological sketches of the area of work.

The second chapter describes iron ore deposits, deposits of their concentration products, as well as the technology of concentration and study of pellet production wastes from iron ores.

The third chapter presents the engineering and geological characteristics of the dam and the characteristics of man-made hydrotechnical structures of the tailings dump.

The fourth chapter is devoted to the assessment of the dam stability, including the analysis of the current position according to various data, general principles of stability calculations, justification of the calculated geomechanical schemes for the man-made massifs, as well as the results of stability calculation and recommendations on the optimal parameters of the dumps.

In the process of work were carried out: statistical processing of data of physical and mechanical properties of soils; calculation of vertical and horizontal stresses acting on the dam, including construction of stress epurases; calculation of dam stability.

The work was based on regulatory documents, scientific and methodological materials in the field of engineering geology, as well as own data obtained in the course of industrial practice and technical reports of JSC "MekhanObrEngineering", JSC "Karelsky Okatysh".

The result of the work is the achievement of the set goal, namely the fulfillment of the forecast of the stability of the tailing dump dam at the change of engineering and geological conditions. The dam is

stable according to the actual data (i.e. at the moment), as well as at the design increase by 10 m. The results are presented in the form of various schemes and diagrams.

Keywords: tailing dump, tailings, primary and secondary dams, tailings storage system, slope stability.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	8
ГЛАВА 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАЙОНЕ РАБОТ	11
1.1. Физико-географический и экономический очерк района работ	11
1.2. Геологический очерк района работ	26
ГЛАВА 2. ИЗУЧЕНИЕ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА ЖЕЛЕЗНЫХ РУД	38
2.1. Краткая характеристика месторождений продуктов обогащения	38
2.2. Общие сведения о месторождениях железных руд	41
2.2.1. Общие сведения о Костомукшском месторождении	41
2.2.2. Общие сведения о Корпангском месторождении	45
2.3. Технология обогащения железных руд	49
2.4. Изучение отходов производства окатышей из различных железных руд	51
2.5. Выводы по главе 2	54
ГЛАВА 3. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ХВОСТОХРАНИЛИЩА АО «КАРЕЛЬСКИЙ ОКАТЫШ»	57
3.1. Инженерно-геологические исследования	57
3.2. Характеристика техногенных сооружений	65
3.3. Изучение формирования состава, строения, состояния и свойств техногенных массивов	74
3.4. Изучение физико-механических свойств пород	82
3.5. Гидрогеологические условия	99
3.6. Геологические и инженерно-геологические процессы	102
3.7. Выводы по главе 3	104
ГЛАВА 4. ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ТЕХНОГЕННЫХ МАССИВОВ ПРИ СКЛАДИРОВАНИИ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД	107
4.1. Оценка устойчивости отвалов	107

4.1.1. Общие принципы выполнения расчетов устойчивости горнотехнических сооружений	114
4.1.2. Обоснование расчетных геомеханических схем (гидрогеомеханических моделей) для техногенных массивов	130
4.1.3. Методика выполнения расчетов устойчивости	140
4.1.4. Результаты расчетов устойчивости и рекомендации по оптимальным параметрам отвалов.....	152
4.2. Выводы по главе 4	154
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	157
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	161
ПРИЛОЖЕНИЯ	167

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во всем мире особенно остро стоит проблема обеспечения безопасности хвостохранилищ и удерживающих их дамб на горнодобывающих и горно-обогатительных предприятиях.

Хвостохранилище — это комплекс сооружений, предназначенный для хранения отходов (хвостов) производства, остающихся при добыче и обогащении полезных ископаемых. Хвосты выглядят как измельченная горная масса, которая по гранулометрическому составу близка к мелкозернистым или пылеватым пескам, зачастую токсична.

При изменении различных инженерно-геологических условий существует риск разрушения дамб и загрязнения природной среды (поверхностных и подземных вод, почв, биоты) токсичными веществами, опасности нанесения вреда животному миру.

В мире практически каждый год происходят аварии на хвостохранилищах, последствия которых свидетельствуют о серьезной опасности подобных объектов для людей, имущества и окружающей среды (рис. 1) [59].

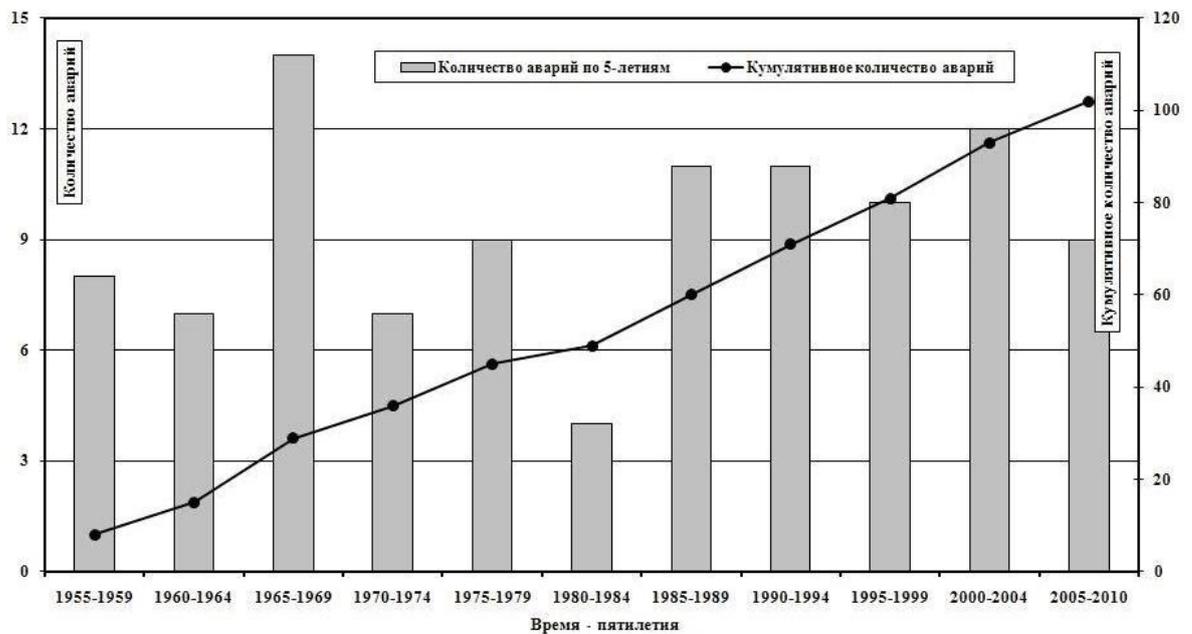


Рис. 1. Абсолютное и кумулятивное количество катастрофических аварий на хвостохранилищах в мире по пятилетиям [57].

Серьезные аварии на хвостохранилищах чаще всего происходят из-за прорыва или полного разрушения удерживающих их дамб с поступлением огромного количества токсичных отходов в окружающую среду.

АО «Карельский окатыш» - ведущий комбинат по добыче и переработке железной руды в России. Предприятие расположено в Республике Карелия и производит 20% всех российских железорудных окатышей, с содержанием железа 65-66,5%, являющиеся продукцией с высокой добавленной стоимостью. Входит в горнодобывающий дивизион крупнейшей в мире сталелитейной и горнодобывающей компании ПАО «Северсталь».

Комбинат производит 11,1 млн тонн окатышей в год. Объемы вывезенной горной массы составляет 47,8 млн куб. м, а годовые объемы концентрата - 11,97 млн тонн. Горные работы ведутся с 1982 г. на базе Костомукшского месторождения, которое включает железистые кварциты, кристаллические сланцы различного состава и геллефлинты. В 2007 г. начата добыча и переработка железной руды Корпангского месторождения.

Основной потребитель продукции «Карельского окатыша» - Череповецкий металлургический комбинат. Именно для того, чтобы обеспечивать этот комбинат сырьем, и был построен Костомукшский ГОК. Кроме того, крупные объемы продукции поставляются в «ЕВРАЗ», на Челябинский и Магнитогорский металлургические комбинаты. Среди зарубежных потребителей – LKAB (Финляндия-Швеция), Tata Steel UK Ltd, (Великобритания, Нидерланды), ArcelorMittal Sourcing (Германия), а также индийские и китайские компании [53].

На предприятии планируется развитие сооружений хвостового хозяйства в связи с увеличением объемов сброса пульпы через пульпопроводы. Для этого требуется изучение существующих дамб хвостохранилища с целью рассчитать их устойчивость при изменении различных инженерно-геологических условий, т.к. любое изменение физико-механических свойств грунта при тех или иных изменениях условий может привести к различным авариям, например, обрушение дамбы, и вследствие этого, сильное загрязнение окружающей среды. Серьезные аварии на хвостохранилищах чаще всего происходят из-за прорыва или полного разрушения удерживающих их дамб с поступлением огромного количества токсичных отходов в окружающую среду.

Вследствие этого, обоснование расчетных прочностных характеристик грунтов и прогноз устойчивости с учетом их изменчивости является актуальной научной и важной практической задачей в части обеспечения безопасности накопителей жидких отходов и снижения риска негативного воздействия их на окружающую среду.

Целью работы является обеспечение безопасной эксплуатации хвостового хозяйства Костомукшского горно-обогатительного комбината (АО «Карельский окатыш») ПАО «Северсталь», включающее прогноз устойчивости плотины «Пионерная» хвостохранилища

при изменении различных инженерно-геологических факторов, оказывающих влияние на устойчивость техногенного массива.

Задачами работы являются:

- анализ текущей эксплуатации хвостового хозяйства;
- изучение инженерно-геологических условий складирования техногенных грунтов, и их физико-механических свойств;
- изучение технологии транспортировки и складирования техногенных грунтов;
- рекогносцировка и оценка потенциальных опасных геологических и инженерно-геологических процессов;
- изучение факторов, оказывающих влияние на устойчивость техногенного массива;
- обоснование методики выполнения и расчет устойчивости горнотехнических сооружений (плотины Пионерная);
- обоснование расчетной геомеханической схемы для техногенных массивов (плотины Пионерная).

ГЛАВА 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАЙОНЕ РАБОТ

1.1. Физико-географический и экономический очерк района работ

Территория работ расположена на северо-западе Республики Карелия – расстояние до Белого моря 200 км, до столицы республики г. Петрозаводска 360 км, до границы с Финляндией 35 км.

В административном отношении – это территория Костомукшского городского округа. Расстояние от промышленной площадки АО «Карельский окатыш» до г. Костомукша составляет 7,5 км. В состав Костомукшского городского округа входят несколько населенных пунктов – Вокнаволок, Заречный, Ладвозеро, Поньгагуба, Суднозеро и Толлорека, ближайшим к территории изысканий является пос. Заречный (около 10 км) [44].

Рельеф

Территория расположена на покатой всхолмленной равнине с общим понижением местности с запада на восток, имеет сложный, сильно расчлененный среднехолмистый рельеф, образованный моренными грядами и отдельными возвышенностями до 30-50 м высотой. В центральной и южной части сильно пересеченная местность, расчлененная вытянутыми параллельными грядами, сложенными из гранита, абсолютные отметки которых достигают 250-300 м над уровнем моря. Между отдельными цепочками озера, расположено большое число озер, особенно в северной части, и заболоченных участков. Много болот.

Преобладающий тип рельефа денудационно-тектонический, для которого характерны приподнятые массивы, разделение линейными понижениями. Коренные породы (гнейсо-граниты, гнейсо-гранодиориты) на поверхностях рельефа частично перекрываются тонким слоем четвертичных отложений, а местами выходят на поверхность, образуя скальные комплексы. Понижения между приподнятыми массивами кристаллических пород приурочены к древним разломам. В этих понижениях находятся заболоченные низины, озерные котловины и долины рек. Весь район носит следы тектонических воздействий, в результате которых образовались основные линии простираения форм рельефа.

Реки относятся к бассейну Белого моря. Они сравнительно небольшие по протяженности, но многоводные, часто встречаются пороги и водопады. Наиболее крупные реки, впадающие в Белое море – Кемь, Выг, Кереть [44].

Для территории характерно обилие поверхностных вод, связанное, во-первых, с особенностями климата – значительным количеством осадков и относительно малым испарением, и во-вторых, с существенным влиянием рельефа – наличием впадин при общей равнинности территории, сток с которой замедлен.

Тип питания рек относится к смешанному типу (снеговое, грунтовое и за счет болотных вод). Продолжительность ледостава на реках до 170 дней. Вода рек далеко не однородна по химическому составу. Общими свойствами вод является – повышенное содержание кислорода, отсутствие всякого запаха, слабая минерализация, малая жесткость.

В границы территории работ входят следующие водные объекты природного и техногенного происхождения: оз. Костомукшское (хвостохранилище АО «Карельский окатыш» с отстойным прудом); р. Костомукша, включая отстойник ливневых и карьерных вод; Северо-Западный водоотводной канал, включая р. Суриоя и р. Ронтаоя; Юго-Восточный водоотводной канал, включая озеро Окуневое.

Климат

Костомукша относится к районам Крайнего Севера и находится на границе подзон средней и северной тайги. На климат влияет множество факторов, среди которых частые циклоны с Атлантического океана и Баренцева моря, которые приносят зимой оттепели и снегопады, а летом — дождливую и прохладную погоду. По совокупности этих факторов климат Костомукши представляет нечто среднее между климатом Санкт-Петербурга и Мурманска. Зима умеренно холодная, с частой переменной погоды, при вторжении холодного сибирского антициклона возможны сильные морозы. Лето короткое и холодное и, как правило, дождливое [44].

Климат района работ умеренно-континентальный с элементами морского. Разница между средней температурой самого теплого (июль) и холодного (январь) месяца составляет 28,0°С. Абсолютный минимум температуры воздуха, зарегистрированный станцией Юшкозеро – минус 44,5°С, абсолютный максимум – 33,6°С. Зима продолжительная, многоснежная, относительно мягкая, со значительным количеством оттепелей. Средняя продолжительность периода со среднесуточной температурой ниже 0°С – 174 дня. Весна продолжительная, с частыми возвратами холодов. Лето также короткое, умеренно теплое. Осень затяжная, с ранними заморозками. Среднегодовая сумма осадков – 588 мм, более половины из них выпадает в период с мая по сентябрь. Максимальное количество осадков выпадает в июле – 85 мм. В течение всего года преобладают ветра южного направления. Среднегодовая скорость ветра – 2,5 м/с.

Общие черты климата определяются характером циркуляции атмосферы. В целом, сказывается близость территории от североатлантического погодообразующего региона. В течение всего года отмечается преобладание интенсивного западно-восточного переноса воздушных масс. Регион регулярно попадает под действие циклонов, смещающихся по западно-восточной траектории, в результате чего регулярно выпадают осадки различной интенсивности, а погодные условия отличаются большой неустойчивостью. В большей

степени этот процесс выражен в зимний период при интенсификации исландского барического минимума. Относительно редко случаются арктические вторжения воздуха, в результате чего на не продолжительный период устанавливается морозная малооблачная погода без осадков. При смещении глубоких циклонов с высокой скоростью с северной Атлантики морской воздух достигает рассматриваемой территории без существенной трансформации, в результате чего на фоне выпадения смешанных осадков температура повышается до оттепели.

Летом интенсивность западно-восточного переноса снижается, чаще развиваются меридиональные процессы. В результате увеличивается частота вторжения холодных воздушных масс с Баренцева моря, в тоже время возрастает вероятность блокирования западного переноса высотным и теплым антициклоном над Скандинавией, обеспечивающим теплую и сухую погоду. Осадки в летний период носят, в основном, кратковременный характер, при этом выпадает достаточно большое их количество: в период с июня по август около 37% годовой нормы.

По ГОСТ 16350-80 [7] климат района классифицируется как умеренный. Согласно СП 131.13330.2012 [26] территория относится к строительно-климатическому подрайону II В и характеризуется как ограниченно благоприятная для строительства зданий и сооружений.

Для характеристики климатических условий использованы данные многолетних наблюдений на М-2 Юшкозеро, которая по СП 11-103-97 [16] наиболее удовлетворяет условиям, позволяющим характеризовать территорию как изученную. Станция расположена на расстоянии около 71 км к востоку - северо-востоку от территории изысканий. Для более полного описания климатических условий использовались также данные по отдельным характеристикам (среднемесячной температуре) метеостанции Реболы (85 км к югу от территории изысканий, СП 131.13330.2012) [26].

Способы измерения и расчетов метеорологических параметров

Температура воздуха. На метеорологических станциях температура воздуха измеряется термометром, установленным на высоте 2 м над поверхностью почвы в психрометрической будке, вдали от жилых помещений, защищенной от действия прямой солнечной радиации и хорошо вентилируемой [26].

Даты перехода средней суточной температуры через заданные значения определялись по суточным данным для каждого года. В соответствии с «Методическими указаниям по составлению Научно-прикладного справочника по агроклиматическим ресурсам СССР» [27] за дату устойчивого перехода температуры воздуха через 0°С осенью принимается первый день периода, сумма отрицательных отклонений от нормы которого превышает сумму положительных отклонений любого из последующих периодов с положительными

отклонениями. За дату устойчивого перехода температуры воздуха через 0°C весной принимается первый день периода, сумма положительных отклонений которого превышает сумму отрицательных отклонений любого из последующих периодов с отрицательными отклонениями.

Продолжительность периода с температурой ниже 0°C вычислялась путем подсчета числа дней от перехода через 0°C осенью до перехода через 0°C весной. При подсчете дата перехода температуры осенью учитывается, а дата перехода весной в подсчет не входит.

За продолжительность отопительного периода принимается число дней со средней суточной температурой воздуха ниже $+8^{\circ}\text{C}$. Расчетная зимняя вентиляционная температура – это средняя температура воздуха наиболее холодной части отопительного периода, составляющей 15 % всего отопительного периода.

Осадки. Количество осадков определяется толщиной (в миллиметрах) слоя выпавшей воды. Поправки на смачивание внесены в соответствии с «Наставлением гидрометеорологическим станциям и постам» [28].

Характеристики ветрового режима. Ветер представляет собой движение воздуха относительно земной поверхности и характеризуется скоростью и направлением перемещения. За направление ветра принимается то направление, откуда перемещается воздух. Для обозначения направления указывают либо румб (по 16-румбовой системе), либо угол, который горизонтальный вектор скорости ветра образует с меридианом, причем север принимается за 360° или 0° . Измерения скорости и направления ветра на метеостанциях производятся на высоте 10-12 м над поверхностью земли. Вследствие турбулентного состояния атмосферы скорость и направление ветра в каждый момент времени существенно колеблются около среднего значения, поэтому измеряются средняя скорость ветра за промежуток времени 2 минуты или 10 минут (в зависимости от технических возможностей прибора, который используется при измерениях), максимальное значение мгновенной скорости ветра за тот же промежуток времени (скорость ветра при порывах) и определяется среднее направление ветра за 2 минуты.

Снежный покров – это слой снега, лежащий на поверхности почвы или льда, образовавшийся в результате снегопадов в зимнее время. Высота снежного покрова определяется по трем постоянным рейкам, установленным на открытых и защищенных участках. Один раз в декаду проводятся снегомерные съемки по различным маршрутам (лес, поле), которые более точно отражают характер залегания снежного покрова в данной местности. Данные измерений высоты снежного покрова по постоянным рейкам на станции широко используют в практике, т.к. позволяют проследить ежедневную динамику изменения снежного покрова.

В климатологии днем со снежным покровом считается день, в котором отмечена степень покрытия снегом видимой окрестности метеостанции не менее 6 баллов (60 % покрытия). За 10 баллов принимается полное покрытие снегом видимой окрестности метеостанции. При расчете количества дней со снежным покровом принимались во внимание все дни, удовлетворяющие указанному критерию, с сентября по май включительно. Первый такой день в начале указанного периода считался датой первого появления снежного покрова, а последний такой день определял дату схода снежного покрова.

Устойчивым снежный покров считается в тех случаях, когда он лежит непрерывно в течение всей зимы или с перерывами не более 3 дней в течение каждых 30 дней залегания снега. Если весной, не более чем через 3 дня после схода покрова, вновь образуется покров и лежит не менее 10 дней, то считается, что залегание непрерывно. Даже если таких перерывов было несколько, все они включаются в устойчивый покров.

На метеорологической станции Березники снегомерные съемки проводятся по лесному и полевому маршруту.

Гололедно-изморозевые явления. К гололедно-изморозевым образованиям относятся гололед, изморозь, налипание мокрого снега и отложения замерзшего снега.

Гололед – это слой плотного льда (матового или прозрачного), нарастающего на поверхности земли и на предметах преимущественно с наветренной стороны, от намерзания капель переохлажденного дождя или мороси. Обычно наблюдается при температурах воздуха от 0°С до минус 3°С, реже при более низких.

Изморозь – отложение льда на деревьях, проводах и т.п. при тумане в результате сублимации водяного пара (кристаллическая) или намерзания капель переохлажденного тумана (зернистая).

Днем с обледенением считается такой день, в который это явление наблюдалось в любой его стадии не менее 0,5 часа. При этом за начало метеорологических суток принималось 19 часов (с 1966 г. – 18 часов) предыдущего дня, а за конец – 19 часов (18 часов) данного дня. Согласно «Наставлению гидрометеорологическим станциям и постам» [28] наблюдения за гололедно-изморозевыми образованиями производят по московскому (зимнему) времени.

Отложения на проводах редко имеют правильную геометрическую форму, поэтому размеры отложения характеризуют диаметром и толщиной. *Диаметром* отложения называется длина наибольшей по величине оси поперечного сечения отложения за вычетом диаметра провода. Под *толщиной* отложения понимается расстояние между двумя наиболее удаленными точками поперечного сечения отложения в направлении, перпендикулярном линии диаметра, за вычетом диаметра провода.

Климатические характеристики исследуемого района рассчитаны по многолетним наблюдениями Росгидромета на метеостанции Юшкозеро за период с 1966 г. по 2017 г., с использованием данных СП 131.13330.2012 [26], СП 20.13330.2011 [19] и [31].

Температурный режим

Самым теплым месяцем в районе обследования является июль со средней месячной температурой плюс 16,1°С, самым холодным – январь с температурой минус 11,9° С. Годовая амплитуда среднемесячной температуры составляет 28,0° С. Среднегодовое значение температуры воздуха – плюс 1,5° С (таблица 1, рисунок 2). Отрицательные среднемесячные температуры воздуха удерживаются с ноября по март, включительно.

Таблица 1 - Средняя месячная и годовая температура воздуха, °С

Месяц												Год
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
-11,9	-11,5	-5,7	0,0	6,9	13,3	16,1	13,5	8,0	1,9	-4,0	-8,8	1,5

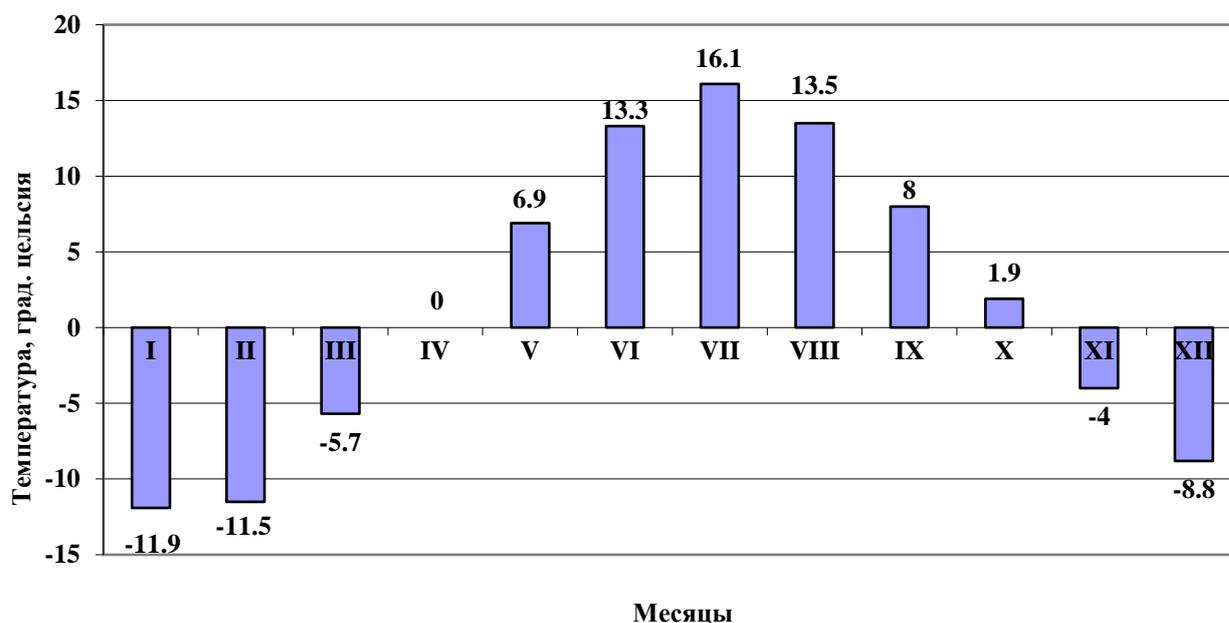


Рис. 2. Годовой ход среднемесячной температуры воздуха.

Абсолютный минимум температуры воздуха составляет минус 44,5°С. Такая температура была зафиксирована в 1966 г. Абсолютный максимум температуры воздуха составляет 33,6°С (1972 г.). Амплитуда температуры между абсолютным максимумом и минимумом составляет 78,1°С.

Продолжительность периода со среднесуточной температурой выше 0°C превышает продолжительность периода с отрицательными температурами и составляет 191 день (таблица 2). Средняя дата перехода среднесуточной температуры через 0°C в сторону повышения 11 апреля. Как правило, вслед за этим переходом начинается активное снеготаяние и развитие паводка. Переход температуры через 0°C в сторону понижения происходит на стыке октября и ноября.

Таблица 2 - Характеристика сезона со среднесуточной температурой выше 0°C

Начало			Окончание			Продолжительность (дни)		
средняя	самая ранняя	самая поздняя	средняя	самая ранняя	самая поздняя	средняя	мини-мальная	макси-мальная
11 IV	22 III (1968)	5 V (1969)	31 XI	8 X (1973)	2 XII (1986)	191	173 (1971)	236 (1996)

Переход температуры в сторону повышения через +5°C происходит обычно в конце второй декады мая и продолжается 148 дней, заканчиваясь в начале октября (таблица 3).

Таблица 3 - Характеристика сезона со среднесуточной температурой выше +5°C

Начало			Окончание			Продолжительность (дни)		
средняя	самая ранняя	самая поздняя	средняя	самая ранняя	самая поздняя	средняя	мини-мальная	макси-мальная
9 V	22 IV (1990)	26 V (1985)	3 X	9 IX (1993)	19 X (1988)	148	123 (1973)	167 (2006)

Период с температурой ниже -5°C начинается в среднем многолетнем разрезе 25 ноября и заканчивается в середине марта. Средняя продолжительность данного периода составляет 109 дней (таблица 4).

Таблица 4 - Характеристика сезона со среднесуточной температурой ниже -5°C

Начало			Окончание			Продолжительность (дни)		
средняя	самая ранняя	самая поздняя	средняя	самая ранняя	самая поздняя	средняя	мини-мальная	макси-мальная
25 XI	23 X (1993)	29 XII (1975)	13 III	21 I (1989)	18 IV (1998)	109	60 (1995)	142 (1971)

Средняя температура отопительного периода (со среднесуточной температурой $\leq 8^\circ\text{C}$): - 4,3°C.

Средняя максимальная температура самого теплого месяца: +21,5°C.

Средняя минимальная температура самого холодного месяца: $-12,0^{\circ}\text{C}$.

Расчетная температура наиболее холодной пятидневки: $-31,6^{\circ}\text{C}$.

Атмосферные осадки

Осадки в течение года выпадают неравномерно. Средняя многолетняя величина осадков за год составляет 588 мм. Большая часть осадков приходится на теплый период года: с мая по сентябрь (за 5 месяцев) выпадает в среднем 55 % годовой нормы. Минимальное среднемесячное количество осадков выпадает в марте и составляет 27 мм, максимальное – в июле – 85 мм (таблица 5, рисунок 3).

Таблица 5 - Среднемесячное количество осадков, мм

Месяц												Год
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
36	29	27	33	48	60	85	72	58	50	48	42	588

Среднее количество осадков за период с ноября по март составляет 182 мм.

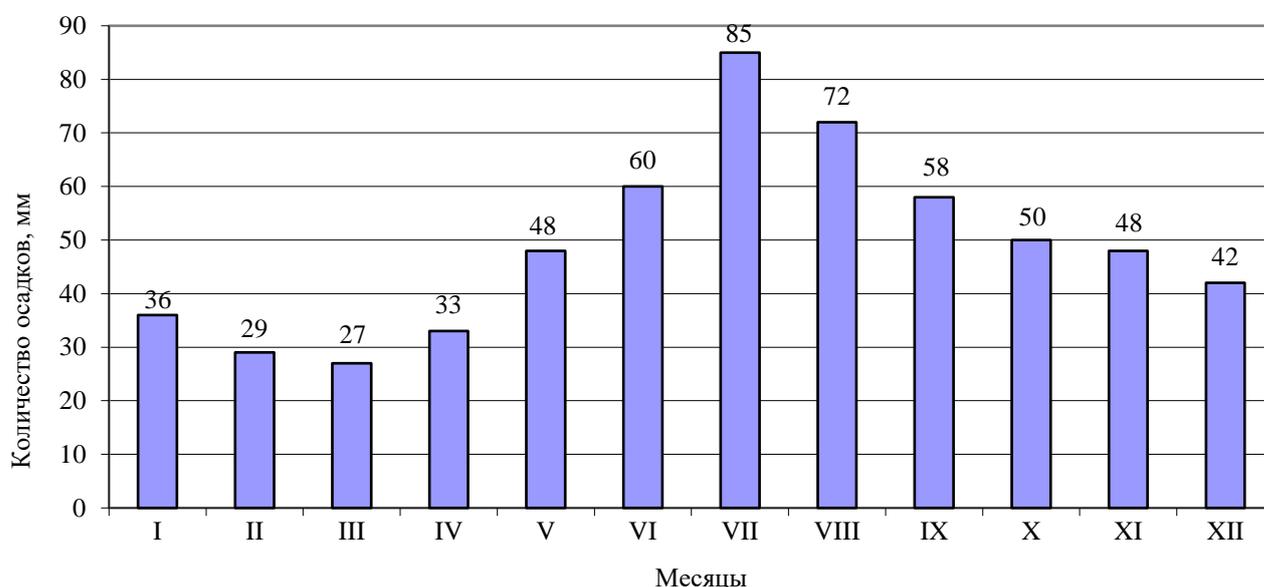


Рис. 3. Среднемесячное количество осадков, мм.

Таблица 6 - Число дней с твердыми, жидкими и смешанными осадками

Вид осадков	Месяц												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII I	IX	X	XI	XII	
Т	23	20	17	10	4	1	0	0	1	7	18	23	124
Ж	2	2	3	8	13	16	17	17	18	15	9	4	124
С	2	2	5	7	4	1	0	0	1	6	6	4	38

Таблица 7 - Максимальное суточное количество осадков различной обеспеченности за месяц и за год, мм

Месяц	Обеспеченность, %						Наблюденный максимум			
	63	20	10	5	2	1	мм	число	месяц	год
I	6	9	12	13	17	17	17	31	1	2005
II	5	8	9	13	14	14	14	7	2	1987
III	5	8	10	12	20	20	20	14	3	1978
IV	7	13	14	20	26	26	26	28	4	1970
V	11	21	24	34	49	49	49	30	5	1983
VI	13	20	27	30	41	41	41	23	6	2004
VII	16	27	30	36	118	118	118	23	7	1991
VIII	15	24	27	32	48	48	48	15	8	2002
IX	12	23	27	37	41	41	41	19	9	2007
X	9	15	17	21	24	24	24	1	10	1973
XI	8	15	17	19	25	25	25	24	11	1994
XII	6	11	12	14	18	18	18	21	12	2002
год	24	33	41	49	118	118	118	23	7	1991

Абсолютный суточный максимум атмосферных осадков составляет 118 мм (23 июля 1991).

Таблица 8 - Среднее максимальное количество осадков за сутки, мм

Месяц												Год
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
7	6	7	9	14	16	23	20	16	12	10	8	31

Таблица 9 - Среднее месячное и годовое количество твердых осадков с поправками на смачивание, мм

Месяц												Год
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
30	23	18	13	9	4	0	0	3	12	26	32	170

Таблица 10 - Среднее месячное и годовое количество жидких осадков с поправками на смачивание, мм

Месяц												Год
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
3	3	4	10	30	52	85	72	52	26	13	5	355

Таблица 11 - Среднее месячное и годовое количество смешанных осадков с поправками на смачивание, мм

Месяц												Год
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
3	3	5	10	9	4	0	0	3	12	9	5	63

Таблица 12 - Продолжительность осадков различной обеспеченности

Месяц	Обеспеченность, %						Наблюденный максимум			
	63	20	10	5	2	1	мм	число	месяц	год
I	4	8	10	11	13	15	13	26	1	1960
II	4	7	8	9	11	12	12	22	2	1960
III	4	7	10	12	16	19	20	14	3	1978
IV	4	10	15	19	25	29	26	28	4	1970
V	7	16	20	25	32	36	49	30	5	1983
VI	11	19	23	27	31	34	33	10	6	1950
VII	13	24	32	39	50	58	58	17	7	1938
VIII	13	23	28	32	38	41	38	-	8	1925
IX	12	20	25	29	35	39	37	13	9	1969
X	8	15	19	22	26	29	24	1	10	1973

XI	6	10	11	13	15	16	18	29	11	1982
XII	4	8	11	1	16	19	18	7	12	1957
год	22	23	37	43	53	62	58	17	7	1938

Таблица 13 - Повторяемость случаев выпадения осадков более 20 мм за сутки в зимний период

ноябрь	декабрь	январь	февраль	март
0,1	-	-	-	-

Таблица 14 - Повторяемость случаев выпадения осадков более 20 мм за сутки в летний период

апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь
0,2	0,9	1,0	2,6	1,6	1,0	0,3

Характеристика снежного покрова

Снежный покров является одним из важнейших факторов, влияющих на формирование климата. В результате излучения воздух над снежным покровом сильно охлаждается, а весной большое количество тепла затрачивается на таяние снега. Снежный покров предохраняет почву от глубокого промерзания, регулируя тепловое состояние верхних слоев почвы.

Устойчивый снежный покров образуется в конце октября – начале ноября. Разрушение покрова отмечается во 2-3 декадах апреля.

Таблица 15 - Запас воды в снежном покрове по снегосъемкам в поле на последний день декады, мм

Месяц																				
Октябрь			Ноябрь			Декабрь			Январь			Февраль			Март			Апрель		
1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	16		22	26	37	37	46	55	59	70	74	89	92	99	103	104	106	97	77	51

Таблица 16 - Запас воды в снежном покрове по снегосъемкам в лесу на последний день декады, мм

Месяц																				
Октябрь			Ноябрь			Декабрь			Январь			Февраль			Март			Апрель		
1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	31			55			85	95	107	115	121	132	131	139	139	124	109	84	81	

Максимальные запасы воды в снежном покрове обычно формируются в марте.

Снеготаяние начинается при установлении положительных температур воздуха в дневное время еще до устойчивого перехода средних суточных значений через 0° С. Обычно, оно начинается в третьей декаде марта, продолжаясь 25-30 дней.

В соответствии с СП 20.13330.2011 [19] территория изысканий относится к снеговому району IV. Вес снегового покрова на 1 м² поверхности составляет 2,4 кПа.

Гололедно-изморозевые явления

К гололедно-изморозевым явлениям относятся гололед и изморозь, фиксируемые наблюдателями как атмосферные явления. В соответствии с СП 20.13330.2011 [19] изучаемая территория относится к гололедному району II. В данном районе расчетная толщина стенки гололеда на элементах кругового сечения диаметром 10 мм, расположенных на высоте 10 м над поверхностью земли, возможная 1 раз в 5 лет, составляет 5 мм.

Промерзание почвы

Средняя максимальная глубина промерзания почвы за зимний период составляет 94 см, наибольшая – 206 см, наименьшая – 35 см (таблица 17).

Таблица 17 - Средняя глубина промерзания почвы, см

Месяц							Из максимальных за зиму		
X	XI	XII	I	II	III	IV	Средняя	Наибольшая	Наименьшая
0	27	53	65	68	67	49	94	206	35

Ветровой режим

Господствующим направлением ветров в течение года является южное (рисунок 4). Преобладание ветров указанных направлений обусловлено особенностями общей циркуляции атмосферы.

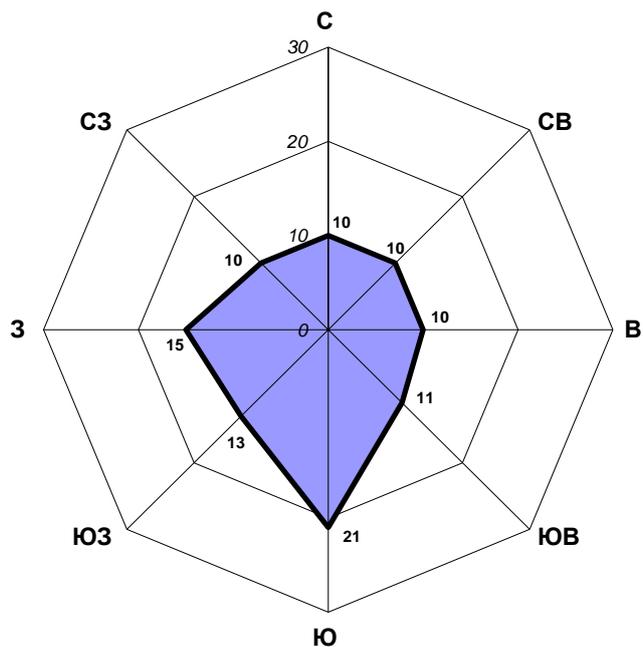


Рис. 4. Роза ветров, год.

Среднегодовая скорость ветра составляет 2,5 м/с. В течение года средняя скорость ветра изменяется незначительно: в пределах от 2,4 до 2,8 м/с (таблица 18, рисунок 5). Более сильные ветры отмечаются в мае и октябре (2,8 м/с), слабые ветры – в январе, феврале, июле и августе (2,4 м/с).

Малая изменчивость скорости ветра в течение года обусловлена относительной устойчивостью атмосферной циркуляции с выраженным преобладанием западно-восточного переноса.

Таблица 18 - Средняя месячная и годовая скорость ветра, м/с

Месяц												Год
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
2,4	2,4	2,6	2,6	2,8	2,6	2,4	2,4	2,5	2,8	2,6	2,5	2,5

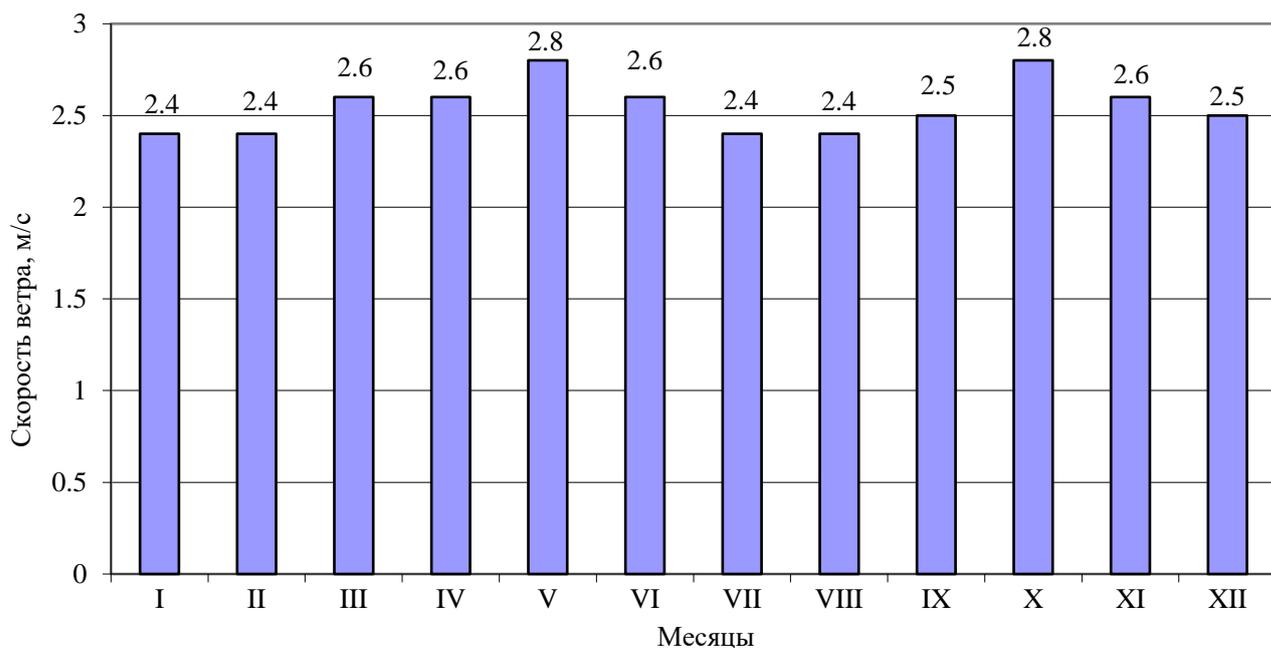


Рис. 5. Средняя скорость ветра, м/с.

Таблица 19 - Абсолютный максимум скорости ветра, м/с

Месяц												Год
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
22	22	21	18	25	22	24	19	20	26	20	28	28

Таблица 20 - Среднее число дней со штилем

Месяц												Год
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
11,0	9,8	9,6	11,2	9,4	10,6	11,4	12,2	10,0	6,1	7,2	10,2	118,7

Таблица 21 - Наибольшее число дней со штилем

Месяц												Год
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
23	17	19	23	22	19	21	22	18	15	15	19	170

Таблица 22 - Скоростной напор ветра

Месяц												Год
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
24,6	26,4	29,1	21,4	41,2	42,1	26,4	23,8	26,4	34,9	26,4	31,9	24,6

По карте, прилагаемой к СП 20.13330.2011 [19], территория изысканий находится в I ветровом районе с давлением ветра 0,23 кПа.

Инфраструктура

Транспорт - осуществляется железнодорожное и автобусное сообщение с Санкт-Петербургом, Петрозаводском, а также с Финляндией. Вблизи города имеется аэропорт местных воздушных линий.

Промышленность - градообразующим предприятием является ОАО «Карельский окатыш» (до 1993 года Костомукшский горно-обогатительный комбинат). Так же в окрестностях города присутствуют такие отрасли, как: деревообработка («Карелиан Вуд Кампани» (PinArctic)), хлебозавод, форелевое хозяйство. Примером успешного предпринимательства в приграничной зоне стало совместное российско-финское предприятие «АЕК», поставляющее электротехнические изделия мировому автогиганту «Volvo» и другим европейским фирмам («Scania», «Sisu», «Timberjack», «BRP») [53].

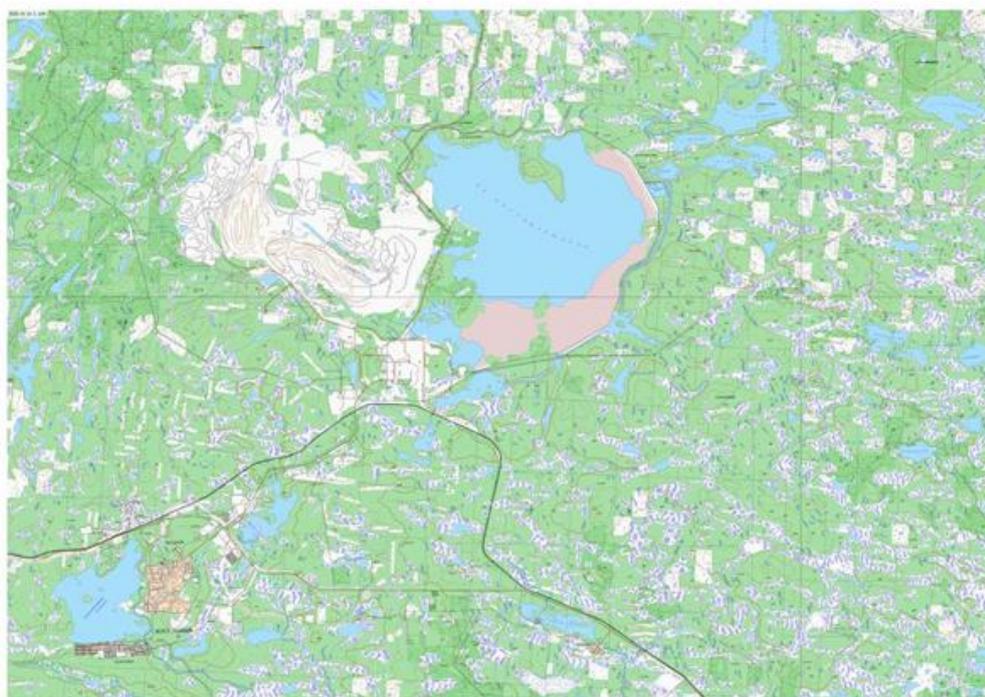


Рис. 6. Обзорная карта территории.

1.2. Геологический очерк района работ

Геологическое изучение Костомукшского железорудного района проводится с 1946 г. (открытие месторождения) по настоящее время различными геологическими организациями, комплексом методов:

- геологическая съемка масштабов 1:200000, 1:100000, 1:50000;
- гидрогеологическая съемка масштаба 1:200000;
- аэромагнитная съемка масштабов 1: 200000, 1:100000, 1:50000, 1:25000;
- гравиметрическая съемка масштабов 1:200000, 1:50000;
- наземная магниторазведка масштабов 1:50000, 1:25000, 1:5000.

Кроме того, последовательно проведены работы по поискам, оценке и разведке Костомукшского и Корпангского месторождений, запасы по которым утверждены ГКЗ СССР соответственно в 1980 г. и в 1983 г. Костомукшское месторождение разрабатывается с 1982 г., Корпангское с 2007 г. На остальных рудопроявлениях района проведены поисковые работы в основном в масштабе 1:10000.

Собственно геология и стратиграфия образований Костомукшского комплекса освещена во множестве отчетов и опубликованной литературы [32], [33], [34], [35], [48]. Последние разведочные работы не изменили существовавших ранее представлений о геологии района.

В геологическом строении района принимают участие докембрийские кристаллические образования и отложения четвертичной системы, перекрывающие их на более 90% площади. Железисто-кремнистые формации докембрия – часть разреза верхнеархейского лопийского комплекса, образующего прерывистый ряд локальных сложнопостроенных синклиналичных структур среди обширных полей гнейсо-гранитов ранне- и позднеархейского возраста. В качестве комплекса долопийского фундамента рассматривается саамский комплекс гнейсов, гранито- гнейсов и мигматитов.

В настоящее время принята единая схема стратиграфического расчленения [32], [33]. Стратиграфический разрез толщ лопия этого района, по данным В.Я. Горьковца и др. [33], имеет трехчленное строение. Нижняя – нюкозерская – серия сложена метатерригенными отложениями аркозового типа – биотитовыми, гранат-биотитовыми и двуслюдяными гнейсами, иногда с высокоглиноземными минералами, редкими прослоями кварцитов. Средняя – контокская – серия представлена осадочно-вулканогенными и вулканогенными образованиями – metabазальтами в нижней части разреза (ниемиярвинская свита, мощностью до 1300 м), метавулканитами риодацитового состава в средней (шурловаарская свита мощностью 0-600 м) и metabазальтами и метакоматиитами в верхней (рувинваарская свита мощностью до 1100 м).

С вулканитами ассоциируют магнетитовые кварциты и углеродсодержащие сланцы. В основании верхнегимольской серии залегают метаморфизованные полимиктовые конгломераты, гравелиты и граувакки (суккозерская свита, мощностью до 450 м), которые выше по разрезу сменяются породами продуктивной костомукшской свиты (мощностью 80-100 м), представленной разнообразными железистыми кварцитами, а также углеродсодержащими и слюдистыми сланцами. Разрез гимольской серии завершают ритмично-слоистые сланцы флишевого типа (сурлампинская свита). Мощность свиты составляет 100-1200 м. Суммарная мощность гимольской серии 180-2340 м.

Среди магматических и ультраметаморфических комплексов верхнеархейского возраста в районе выделяются:

- амфиболиты и габбро-амфиболиты, являющиеся дайковой фацией основных эффузивов лопия;
- метаморфизованные пластово-секущие тела ультраосновных пород, серпентиниты, тальк-хлоритовые, тальк-карбонатные, тремолитовые, актинолитовые сланцы;
- геллефлинты, плагиопорфиры и их метаморфические аналоги лептитовые гнейсы;
- микроклин-плагиоклазовые граниты и пегматиты; - амфиболитизированные габбро.

Кислые магматические образования (геллефлинты), являющиеся межпластовым силлом, ранее включались в состав гимольской серии.

Схема стратиграфического расчленения кристаллических пород района Костомукшского железорудного месторождения приведена в табл. 23, геологическая карта – на рис. 7.

Таблица 23 - Схема стратиграфического расчленения кристаллических пород Костомукшского железорудного месторождения [38].

Возраст		Отдел	Серия	Свита	Подсвита	Литолого-петрографический состав	Мощность, м		
Группа	Подгруппа								
Архейская	Верхняя	Лопийский	Гимольская	Сурлампинская	AR ₂ sr	Кварц-биотитовые и биотит-кварцевые сланцы, гнейсо-сланцы с гранатом, ставролитом, андалузитом, с редкими прослоями магнезиально-железисто-кремнистых пород	100-1300		
				Костомукшская	Верхнекостомукшская	AR ₂ kst ₂	Кварц-биотитовые и биотит-кварцевые сланцы и гнейсо-сланцы с гранатом и ставролитом, биотит-магнетитовые, грюнеритмагнетитовые, магнетит-роговообманково-грюнеритовые и биотитгрюнеритовые кварциты; углеродсодержащие сланцы	50-720	
					Нижнекостомукшская	AR ₂ kst ₁	Рибекит-магнетитовые, актинолит-магнетитовые, кросситмагнетитовые, магнетит-биотитовые, магнетит-грюнеритовые, грюнерит-роговообманково-биотитовые и др. кварциты; углеродсодержащие сланцы; кварц-биотитовые и биотит-кварцевые сланцы и гнейсо-сланцы; базальные полимиктовые конгломераты	30-420	
			перерыв						
			Контокская	Рувинваарская	AR ₂ rv	Амфиболовые сланцы, амфиболиты, углеродсодержащие сланцы	50-1100		
				Шурловаарская	AR ₂ schr	Порфиroidы (агломератовые, слоистые туфы и туффиты), магнетитовые сланцы и кварциты углеродсодержащие сланцы	0-600		
				Ниemiaрвинская	AR ₂ nj	Амфиболитовые сланцы и амфиболиты, магнетитовые сланцы и кварциты	50-130		
			перерыв						
				Гнейсовая толща	AR ₂ gn	Биотитовые, гранат-биотитовые, биотит-амфиболитовые, мусковитовые и двуслюдяные гнейсы и гранито-гнейсы и мигматиты	Более 1000		
								AR	Плагиигнейсо-граниты и гнейсо-гранодиориты

Нижняя часть разреза лопийского комплекса представлена отложениями Гнейсовой толщи, развитой на крыльях Костомукшской ЗКС (в западном борту структуры и в бортах широтной ветви Костомукшской синклинали). Верхний контакт толщи с перекрывающими вулканитами основного состава Контоксской серии чаще всего тектонизирован (по ослабленным зонам внедрились жилы гранитов, пегматитов, кварца) или интенсивно мигматизирован (мигматизация по гнейсам и основным породам). Нижняя часть разреза толщи “тонет” в полях мигматитов.

Контокская серия широко распространена в Западной железорудной полосе и представлена тремя вулканогенно-осадочными свитами: ниemiaрвинской метабазит и коматиитовой; шурловарской метариолит-дацитовый и углеродисто-сланцевой и рувинварской, по составу сходной с ниemiaрвинской. Мощность свит крайне изменчива и достигает 1300 м.

Гимольская серия представлена костомукшской свитой, сложенной кварц-полевошпатовыми, углеродистыми и слюдястыми сланцами, магнетитовыми кварцитами, с которыми связаны промышленные оруденения, и, перекрывающей ее сурлампинской свитой. Сурлампинская свита, сложена глиноземистыми сланцами единичными линзами магнетитовых кварцитов. Ее образования встречаются лишь на Северо-Костомукшском участке. Железные руды контролируются структурно-стратиграфическими уровнями, главным образом, костомукшской и шурловарской свит.

Магматические образования проявлены в широком временном диапазоне – от раннего архея до позднего протерозоя в последовательности: раннеархейские тоналит-плагиограниты Вокнаволоцкого комплекса-приразломные базиты-гинербазиты лопия-мигматит-онатектиты лопия-лопийские гранитоиды Головейского и Кургелампинского комплексов-дайковый базитовый Корпангский комплекс раннего протерозоя-позднепротерозойские алмазоносные лампроиты и кимберлиты.

Четвертичные отложения занимают ~95% поверхности. Они представлены рыхлыми обломочными и торфяно-болотными образованиями мощностью 5-7 м. и 0,5-2 м. соответственно. Рыхлые осадки – аллювиальные, ледниковые, моренные (с большим содержанием валунно-галечного материала); флювиогляциальные и озерно-ледниковые.

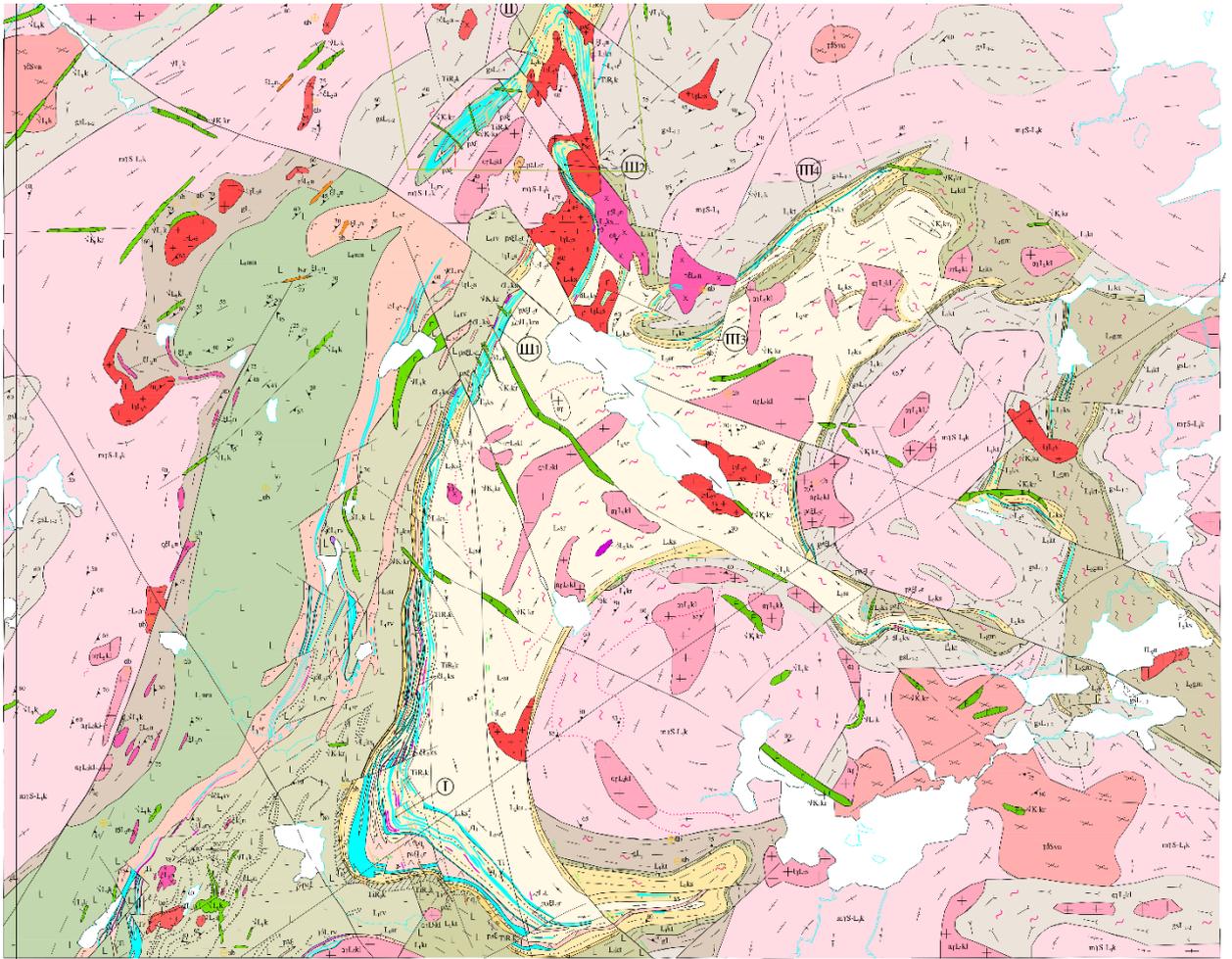


Рис. 7. Геологическая карта докембрийских образований Костомукшского железорудного района [52].

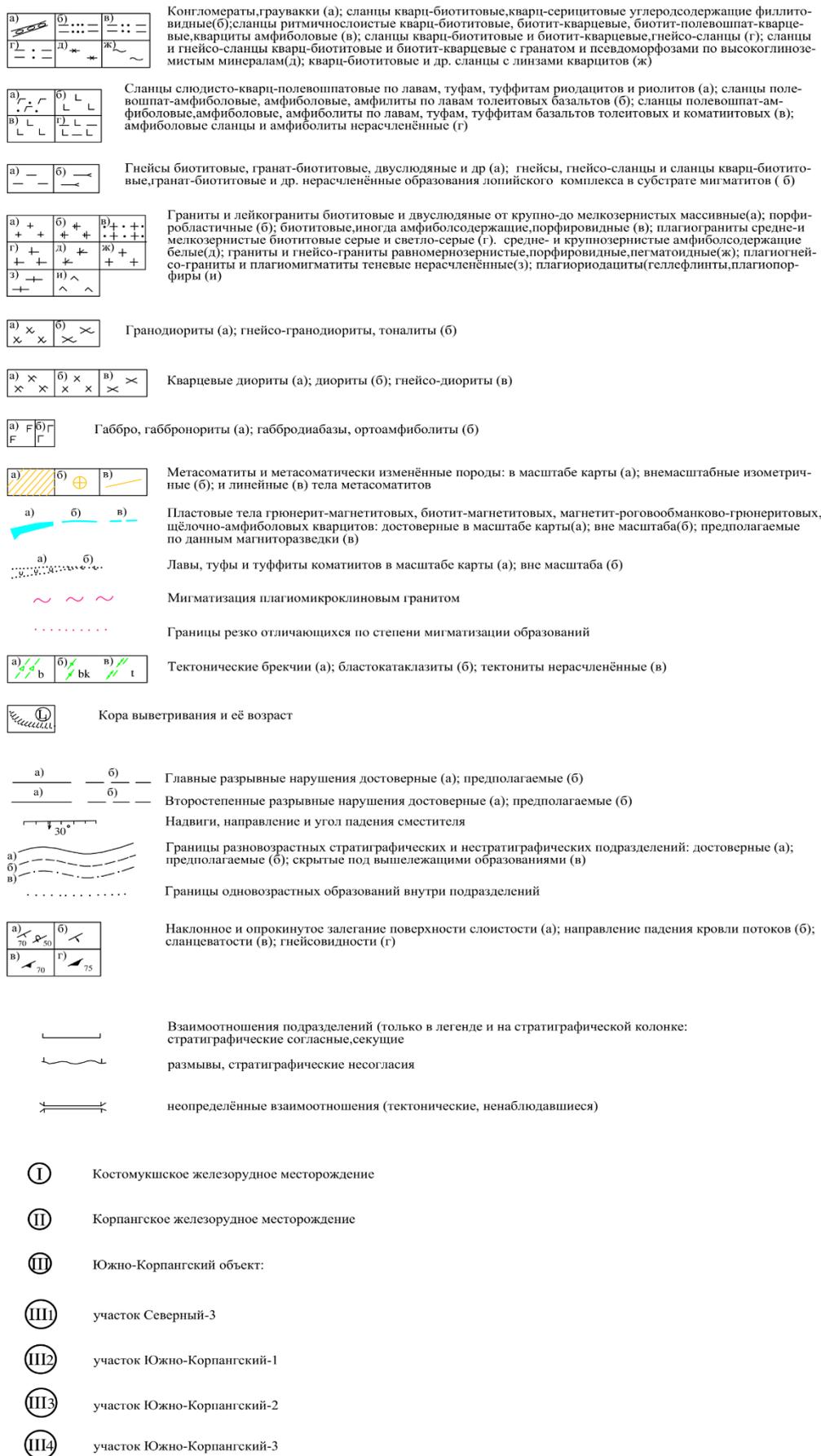


Рис. 7.2. Продолжение условных обозначений к геологической карте докембрийских образований Костомукшского железорудного района.

Гидрогеология

На месторождении по характеру циркуляции, распространения и условиям обводнения подземные воды выделяются в два комплекса:

- водоносный комплекс четвертичных отложений, содержащий поровые воды;
- водоносный комплекс кристаллических пород верхнего архея, содержащий трещинные и трещинно-жильные воды.

Комплексы взаимосвязаны и имеют общий уровень подземных вод. Водоносный комплекс четвертичных отложений развит почти повсеместно и включает в себя воды ледниковых песчано-гравийных отложений и воды торфяно-болотистых образований, приуроченные к слабодренированным впадинам.

Ледниковые отложения представлены мореной супесчаного состава, сильно пылеватые, с неравномерным содержанием гравийно-галечного материала и валунов. Подземные воды в них не образуют сплошного горизонта, он отсутствует в повышенных частях рельефа. Мощность ледниковых отложений изменяется от 3-4 до 20 м. Средняя мощность торфяников в районе карьеров составляет 2-3 м. Подземные воды четвертичных отложений безнапорные, глубина залегания уровня от дневной поверхности до 1 м., реже 4-5 м. Подземные воды торфяников формируются в периоды весенних и осенних паводков. Торфяники сильно влагоемки, обладают слабой водоотдачей. Водопроницаемость и водообильность ледниковых отложений низкая – коэффициент фильтрации 0,04-2,6 м./сутки. Питание водоносного комплекса четвертичных отложений осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков с территории, прилегающей к карьерам.

Водоносный комплекс кристаллических пород распространен повсеместно и играет основную роль в обводненности карьеров.

Подземные воды приурочены к рудно-кристаллической толще и к вмещающим породам – гнейсам, кристаллическим сланцам, амфиболитам, кварцитам. Подземные воды связаны с трещинами отдельностей, зонами выветривания, зонами тектонических трещин.

Наиболее водоносными являются породы верхних горизонтов до глубины 40-50 м от поверхности, где развита наиболее интенсивная трещиноватость, к которой приурочены зоны дезинтеграции среди более плотных пород. Трещинные подземные воды различных видов пород гидравлически связаны между собой и образуют единый водоносный горизонт. Нижняя границ, по данным геологоразведочных работ, принята на глубине 200 м [42].

Водоносный комплекс характеризуется слабой водообильностью и низкой водопроницаемостью, что определяется степенью трещиноватости кристаллических пород. Коэффициенты фильтрации колеблются от 0,002 м/сутки до 2,5 м./сутки, причем

наибольшие величины связаны с зоной дезинтеграции и тектоническими трещинами. Удельный дебит скважин от 0,07 до 5,9 л/сутки.

Согласно проекту «первого этапа реконструкции Костомукшского рудника на базе новых технологий, АО "Гипроруда", 1995 г.» [43], гидрогеологические условия отработки месторождения открытым способом - простые, специальных мероприятий по осушению не требуется; обводнение карьеров происходит за счет атмосферных осадков и трещинных вод водоносного комплекса кристаллических пород.

Водоотлив карьера производится в два этапа:

- первый этап - отвод поверхностных паводковых вод в действующие части нагорной канавы Центрального участка, при этом нагорная канава является накопителем паводковых вод, а дальнейший сброс выполняется поверхностными напорными водоводами с применением высокопроизводительных насосов с небольшим напором;
- второй этап - центральные напорные карьерные водоотливы – расположенные на дне обоих участков карьера с насосными станциями оборудованные насосами ЦНС-500/320 (ВВО 2201 подкачивающие насосы) и ЦН-530/240, магистральными трубопроводами d_{y-530} , d_{y-325} мм и периферийные, расположенные в "малых" рудных телах оборудованные насосными станциями, которые включают в себя насосные установки типа «Иртыш 450, 185», ЭЦВ-12 и магистральный напорный трубопровод d_{y-325} мм и ПЭ d_{y-250} мм.

Напорный карьерный водоотлив, выполненный генеральным проектировщиком АО "Гипроруда", по Центральному участку осуществляется при помощи передвижных насосных станций, смонтированных на металлических саях. Для откачки воды применяют центробежные насосы типа ЦНС-500/320 и ЦН-500/240, а для напорного магистрального трубопровода - стальные трубы $d-325$ мм и $d-530$ мм с толщиной стенки от 6 до 10 мм, а также полиэтиленовые трубы ПЭ100 диаметром 450 и 250 мм.

Главные водоотливные установки Центрального и Южного участков на 2007 год укомплектованы трубопроводной арматурой на рабочее давление от 1,6 до 4,0 МПа, локальные установки на давление от 1 до 2,5 МПа.

Тектоника

Изучаемая территория находится в пределах Западно-Карельской структурно-фациальной зоны. Основной структурный план Западно-Карельской зоны определен формированием в позднеархейском возрасте гранито-гнейсовых куполов и последующими подвижками купольно-блоковых структур [30].

Наиболее ранний период тектонических движений по нижнелопийским супракрустальным образованиям – лоухский (AR) – характеризуется формированием складчатых структур субширотного простирания с пологими шарнирами.

После формирования терригенных, хемогенно-осадочных и, в меньшей мере, вулканогенно-осадочных толщ верхней части разреза лопийские комплексы были подвержены многократным интенсивным тектоническим деформациям, известным как ребольский период тектогенеза. В ходе этих фаз складчатости была сформирована система субмеридиональных, северо-восточных и северо-западных складчатых структур.

В центральных частях лопийских структур в породах гимольской серии преимущественно развиты зеленосланцевая и эпидот-амфиболитовая фации, сменяющиеся на периферии амфиболитовой. На заключительном этапе развития района в центральных частях синклинальных структур внедрялись реоморфизованные граниты с повышенным содержанием щелочей.

Структурно-тектонические формы, выделяемые на площади, являются фрагментами сооружений двух структурных этажей: саамского - выступы регенерированного фундамента лопид, и лопийского - зеленокаменные (синформные) и купольно-блоковые (антиформные) структуры.

Саамский структурный этаж. В пределах Костомукшского железорудного района к саамидам относятся фрагменты Вокнаволоцкого (Войницкого) и Кимасозерского (Лексозерского) блоков. Степень сохранности первичных структурных элементов внутри этих блоков не позволяет достоверно установить для них тип складчатых структур. Однако, наиболее вероятным представляется купольно-блоковый характер раннеархейских складчатых сооружений. Такой характер складчатости обусловлен весьма активной магматической деятельностью в саамскую тектоническую эпоху.

В строении саамских структур принимают участие породы среднего состава – гнейсогранодиориты, гнейсодиориты первично магматической природы. Реликты саамских стратифицированных толщ на площади достоверно не установлены. Гнейсо-сланцевые образования, имеющие полосовидное распространение в пределах блоков, по ряду признаков отнесены к более молодым – лопийским породам. Гнейсоплагиограниты и плагиомигматиты, сменяющие по периферии породы среднего состава и образующиеся в

результате диафтореза и реоморфизма за счет этих пород в настоящее время не имеют четких критериев отличия от гранитизированных лопийских образований, поэтому рассматриваются совместно как нерасчлененные саамско-нижнелопийские.

Краевые части Вокнаволоцкого и Кимасозерского блоков, как правило, разбиты на более мелкие фрагменты, контуры которых довольно отчетливо устанавливаются в магнитном поле по цепочкам прерывистых аномалий, нарушающих однородность спокойного положительного магнитного поля над тоналит-плагиогранитами. В краевых фрагментах выступов фундамента интенсивно проявлены процессы гранитизации, в результате чего эти структурные элементы практически утрачивают признаки принадлежности к саамидам.

Лопийский структурный этаж. К структурным элементам второго структурного этажа относятся структуры линейного и полукольцевого характера, образовавшиеся при раздвижении блоков фундамента: Костомукшская и Контокская зеленокаменные структуры - синклинии. У восточной рамки листов отмечены фрагменты Койвасозерской зеленокаменной структуры, получившей основное развитие на соседней площади. Они отнесены к структурам третьего порядка.

Разрывные нарушения. Положение района в пределах гранитзеленокаменного пояса обусловило напряженный режим разрывной тектоники, проявившийся в разномасштабной блокировке земной коры. Территория может быть разделена на два крупных блока, отличающихся по направлению и форме структурных элементов: на северо-западе – Костомукшский, на юго-востоке – Контокский. Граница между этими крупными тектоническими элементами проходит по Северо-Контокскому валообразному выступу фундамента и сопровождающей его зоне наибольших тектонических напряжений северо-восточного направления.

К наиболее древним (саамским) разрывным нарушениям относятся глубинные блокоразделяющие разломы северо-восточного и северо-западного направления, которые определили заложение троговых структур. Геологически они проявлены зонами мигматизации, щелочного метасоматоза, указывающими на унаследованность глубинных разломов этим процессам. По этим разломам на протяжении длительной геологической истории происходило неоднократное внедрение кислых, основных и ультраосновных интрузивных пород. Кроме Северо-Контокской тектонической зоны, к этой категории тектонических нарушений могут быть отнесены разрывные нарушения по р. Ливо и по границе Вокнаволоцкого блока с Костомукшским.

К позднеархейским, следующим по времени заложения, относятся субсогласные с простиранием складчатых и купольно-блоковых структур взбросовые и надвиговые зоны, с которыми, в частности, связано внедрение плагиопорфиров на Костомукшском

месторождении и размещение интрузий суккозерского гранит-лейкогранитового комплекса. Геологически эти нарушения сопровождались образованием зон катаклаза и милонитизации по контактам купольно-блоковых структур, опрокидыванием ранних складчатых структур и срывом одного из крыльев в синклиналиях. Надвиговая зона прослежена от Кондокской синформы в субмеридиональном направлении до западного контакта Костомукшской куполовидной структуры. Плоскость надвига в районе Кондокского участка полого (под углом 30°) наклонена на северо-восток, в районе Костомукшского месторождения она с поверхности крутая (до 80°), но с глубиной выполаживается до 40° на восток.

На ранние структуры явно наложена система нарушений северозападного до субширотного направления, относящихся к разряду внутриблоковых, обусловивших поперечные смещения синформных структур, в результате чего на современном эрозионном срезе выступают разные глубинные уровни. Вертикальные перемещения блоков достигают 2 км. Примером подобных нарушений служит Корпангский разлом северозападного направления с приподнятым северным блоком и Кургелампинский разлом с приподнятым южным блоком. По морфологии среди них выявлены сбросы, взбросы, шарнирные сбросо-взбросы и другие. По этим разломам внедрялись лопийские гранитоиды, позднее – более молодые карельские интрузии габброидов.

К самым молодым отнесены расколы субмеридионального направления типа сбросов, заложенные в лопии, активизированные в рифее, с которыми связаны дайки лампроитов. В геофизических полях подобная зона хорошо выражена в Кургелампинской синформе нарушением корреляции магнитного поля. Зоны изучены и выявлены фрагментарно (протяженностью до 5-7 км), в основном, по наличию в них даек лампроитов. Предварительно можно отметить следующее: ширина зон составляет 2-4 км; кусты даек размещены в узлах пересечения разломов нескольких направлений; ориентировка даек в кустах преимущественно согласна с направлением рифейских разломов, но может быть и развернутой; падение разломов в зонах крутое ($70-85^\circ$) на северо-восток, иногда на юго-запад. Эти разрывные нарушения не оказывают влияния на складчатые структуры, но сопровождаются интенсивным катаклазом, кварцевыми жилами, процессами диафтореза, развитием линейных кор химического выветривания.

Палеозойская тектоно-магматическая активизация выражена на площади зоной разломов северо-восточного простирания [46]. Пространственное расположение тектонических разломов приведено на геологической карте рис. 7.

ГЛАВА 2. ИЗУЧЕНИЕ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА ЖЕЛЕЗНЫХ РУД

2.1. Краткая характеристика месторождений продуктов обогащения

Основная продукция АО «Карельский окатыш» – высококачественные железорудные офлюсованные и неофлюсованные окатыши для металлургической промышленности.

Содержание железа в окатышах:

- неофлюсованных - 65,2 - 67,0%
- офлюсованных - 63,6 - 66,5%, основность офлюсованных 0,5 - 0,8.

Основной потребитель продукции «Карельского окатыша» - Череповецкий металлургический комбинат. Именно для того, чтобы обеспечивать этот комбинат сырьем, и был построен Костомукшский ГОК.

Окатыши используются главным образом в чёрной металлургии для доменной плавки или электрометаллургической переработки. При использовании окатышей исключается раздельная загрузка в доменную печь руды и флюсов, значительно сокращается количество шлака при переработке руд с низким содержанием железа. Кроме того, повышается производительность плавки чугуна в доменной печи. Окатыши применяют при плавке сталей в индукционных и электродуговых печах, и они могут использоваться в случае удаленности горнодобывающих производств от потребителей [52].

Для производства неофлюсованного окатыша используется бентонитовая глина месторождения «10-Хутор», находящегося в Усть-Абаканском районе Республики Хакасия.

При взаимодействии с водой бентонитовая глина увеличивается в объеме и становится клейкой. Это свойство позволяет эффективно использовать ее в качестве связующего для производства окатышей из железорудного концентрата (влажной измельченной железной руды, прошедшей стадию обогащения). Бентонит выступает не только в роли склеивающего компонента, но создает прочные межзерновые контакты, способствующие уменьшению образования трещин под воздействием высоких температур, придавая окатышам прочность [51].

ООО «Бентонит Хакасии» производит добычу бентонитовой глины в карьере открытым способом. Практически весь добытый бентонит во влажном состоянии активируется кальцинированной содой и сушится. Бентопорошок производится помолом в ролико-маятниковых мельницах.

Производственные мощности предприятия обеспечивают переработку 438 тысяч тонн бентонита в год в следующие виды продукции:

- активированная глина — до 335 тыс. т./год;
- бентонитовый глинопорошок — до 103 тыс. т./год.

Это месторождение относится к наиболее высококачественным в России. Благодаря высокому качеству основного порообразующего минерала — монтмориллонита, бентонит месторождения «10-й Хутор» имеет широкий спектр применения в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства. Особо следует выделить высокую термостойкость этого бентонита, что обеспечивает существенное повышение эффективности его использования во многих областях применения, особенно в формовочных смесях для производства отливок. Минеральный состав бентонита: монтмориллонит, каолинит, гидрослюда, кварц, щелочной полевой шпат, слюда, кальцит [51].

Таблица 24 - Средний химический состав бентонита в %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	FeO	TiO ₂	SO ₃	P ₂ O ₅	MnO	ппп
59,68	18,63	3,93	2,76	2,43	1,62	0,98	0,67	0,59	0,16	0,12	0,05	8,38

Для производства офлюсованного окатыша используют в качестве добавок известняк Белоруческого месторождения, находящийся в Вытегорском районе Вологодской области.

Введение флюсов в состав агломерата или в доменную печь необходимо для понижения температуры плавления пустой породы железной руды или агломерата и золы кокса, а также для перевода их в легкоплавкий жидкий шлак, который легко выходит из печи.

Наиболее распространенным флюсом для доменного и агломерационного производства является известняк. Основную массу известняка составляет кальцит CaCO₃. При нагревании известняк разлагается с образованием извести и углекислого газа: CaCO₃=CaO+CO₂. Образовавшаяся известь и является шлакообразующим компонентом [57].

Белоручейское месторождение открыто в 1949 г. Его запасы составляют 9% всех запасов флюсовых известняков в России. Белоручейское рудоуправление добывает в год 1,5 млн. тонн известняка, закрывая 1/3 потребностей ПАО «Северсталь». Основная деятельность Белоручейского рудоуправления - добыча флюсовых известняков на Ковжинском участке Белоручейского месторождения и их переработка. Запасы месторождения могут обеспечить металлургическое производство на сотню лет.

Белоручейское месторождение флюсовых известняков состоит из двух участков: Белоручейского и Ковжинского. Белоручейский участок не намечается к освоению, его запасы составляют 257 млн. т. Ковжинский участок подготавливается к освоению ОАО «Северсталь», с 1980 г. на нем действует Белоручейский рудник и ведется опытно-промышленная добыча. Участок расположен на водоразделе рек Шима и Ковжа в 45 км к востоку от г. Вытегры и в 4 км к северу от пристани Анненский Мост Волго-Балтийского водного пути. В 2008 г. добыто 1385 тыс. т. известняка, складировано 402 тыс. т. Запасы на 01.01.2009 г. по категории А+В+С1 388 млн. т. (8,1% от запасов РФ), по категории С2 - 747 млн. т. В 2005 г. завершены работы по геологическому до изучению Ковжинского участка.

В состав Белоручейского рудоуправления входят следующие производственные подразделения:

- карьер добычи известняка;
- дробильно-сортировочная фабрика;
- транспортный участок;
- участок тяжелой механизации;
- ремонтно-механические мастерские;
- ремонтно-строительный участок;
- две котельные;
- коммунальные очистные сооружения.

2.2. Общие сведения о месторождениях железных руд

2.2.1. Общие сведения о Костомукшском месторождении

Костомукшское месторождение открыто в 1946 г. при помощи аэромагнитной съёмки, разведочные работы были проведены в 1946-1954 годах, разрабатывается с 1982 г.

Геологические условия. Костомукшское месторождение расположено в центральной части одноименного рудного поля и приурочено к западному и южному крыльям асимметричной Костомукшской синформы. По простиранию на север месторождение естественно переходит в Южно-Корпангское месторождение с условной границей по разлому СЗ направления. Крылья складки сложены образованиями костомукшской свиты гимольской серии (верхний лопий), залегающими на вулканитах основного-ультраосновного состава контоксской серии (нижний лопий), ядро - осадочными породами сурлампинской свиты.

Мощность костомукшской свиты в пределах месторождения от 70 до 1000 м. В основании разреза свиты залегают конгломераты, граувакки и аркозоподобные сланцы нижней подсвиты (не более 80 м), выше - непосредственно рудовмещающие образования верхней подсвиты (слюдистые и углеродсодержащие слюдистые сланцы, железистые и безрудные кварциты).

По соотношению безрудных и рудных пластов выделены две пачки: нижняя - существенно железорудная и верхняя – пачка переслаивания, в которой несколько преобладают безрудные породы. Пласты железистых кварцитов слагают верхние части ритмов разного порядка. Наиболее богатый пласт приурочен к верхнему осадочному циклу нижней пачки.

Рудная зона месторождения протягивается с изгибом на 8 км в северной части и на 5 км - в южной, при ширине 100-1950 м. Месторождение в плане условно делится на три участка: Северный (меридиональное простирание крыла складки), Центральный (дугообразный изгиб) и Южный (широтное простирание крыла) [47].

Рудная зона состоит из двух залежей: Основной и Залежи переслаивания, соответствующих выделенным пачкам верхнекостомукшской подсвиты. Залегание рудной зоны (и рудных тел) месторождения согласное с вмещающими породами костомукшской свиты: крутое, с глубиной более пологое (85° - 55°).

Рудные тела месторождения имеют сложное внутреннее строение. Сложены тремя природными типами руд: I тип – щелочно-амфибол-магнетитовые кварциты (около 40% руд). Магнетит (40-60%) преобладает над кварцем (30-50%), щелочной амфибол сопровождается гематитом, более крупным магнетитом. Руды этого типа характеризуются

наилучшей обогатимостью; II тип - биотит-магнетитовые кварциты (около 20% руд); III тип - двуамфиболовые (грюнерит-роговообманково-магнетитовые) и грюнерит-магнетитовые кварциты (около 40% руд). Преобладает кварц (35-50%) над магнетитом (20- 35%), отмечается повышенное содержание сульфидов.

Гидрогеологические условия. На месторождении выделяют два водоносных комплекса:

1. четвертичных рыхлых отложений, содержащий поровые воды;
2. кристаллических пород верхнего архея, содержащий трещинные и трещинно-жильные воды.

Оба комплекса гидравлически взаимосвязаны и имеют общий уровень подземных вод.

Водоносный комплекс четвертичных отложений развит почти повсеместно. Водовмещающими породами являются ледниковые песчано-гравийные отложения и торфяно-болотные образования. Мощность ледниковых отложений изменяется от 3-4 до 20 м. Средняя мощность торфяников в районе карьеров составляет 2-3 м.

Подземные воды четвертичных отложений безнапорные, глубина залегания уровня от дневной поверхности 0-3 м, реже 4-5 м. Подземные воды торфяников формируются в периоды весенних и осенних паводков. Торфяники сильно влагоемки, обладают слабой водоотдачей. Подземные воды ледниковых отложений сплошного водоносного горизонта не образуют. Водопроницаемость и водообильность ледниковых отложений низкая – коэффициент фильтрации 0,04-2,6 м/сутки.

Питание водоносного комплекса четвертичных отложений осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков с территории, прилегающей к карьерам. Водоносный комплекс кристаллических пород распространен повсеместно и играет огромную роль в обводненности карьеров. Подземные воды приурочены к рудно-кристаллической толще и к вмещающим породам – гнейсам, кристаллическим сланцам, амфиболитам, кварцитам. Подземные воды связаны с трещинами отдельностей, зонами выветривания, зонами тектонических трещин.

Наиболее водоносными являются породы верхних горизонтов до глубины 40-50 м от поверхности, где развита наиболее интенсивная трещиноватость, к которой приурочены зоны дезинтеграции среди более плотных пород. Трещинные подземные воды различных видов пород гидравлически связаны между собой и образуют единый водоносный горизонт. Нижняя граница относительного, по данным геологоразведочных работ, принята на глубине 200 м [47].

Водоносный комплекс характеризуется слабой водообильностью и низкой водопроницаемостью, что определяется степенью трещиноватости кристаллических пород. Коэффициенты фильтрации колеблются от 0,002 м/сутки до 2,5 м/сутки, причем наибольшие величины связаны с зоной дезинтеграции и тектоническими трещинами.

Рельеф района. Костомукшское месторождение расположено в пределах Западно-Карельской возвышенности, представляющей собой всхолмленную равнину с абсолютными отметками 160-280,3 м и относительными превышениями от 10 до 80 м.

Местные возвышенности разделены пониженными заболоченными участками, к которым приурочены практически все проявления железных руд в Костомукшском железорудном районе. Костомукшское месторождение приурочено к местному понижению в рельефе и занимает обширную (около 20 км²) заболоченную равнину (ныне дренированную) с абсолютными отметками 200-230 м. Рельеф района изысканий расчлененный, абсолютные отметки территории лежат в диапазоне от 190 до 240 м. В понижениях между сельгами расположено много болот с внутриболотными озерами

Гидрографическая сеть. По режиму водотоки района относится к рекам с весенним половодьем, что характерно для рек с преимущественно снеговым питанием.

Главной особенностью водотоков является сезонность стока, с достаточно выраженным весенним половодьем, летне-осенней и зимней меженью, нарушаемой дождевыми паводками и оттепелями. Весеннее половодье образуется в результате таяния снега. Оно проходит двумя пиками, обусловленными неравномерным таянием снега или дождями. Реки обычно вскрываются в первой - начале второй декады апреля. Интенсивность подъема воды впервые 3-4 дня небольшая и составляет 10-15 см в сутки. В дальнейшем подъем воды увеличивается, достигая 30-50 см в сутки. Средняя продолжительность весеннего половодья в среднем составляет 50-70 дней, наибольшая продолжительность около 90 дней, наименьшая 40 дней.

Ледоход в отдельные годы отсутствует. Поверхностный сток рек, определяется всем комплексом природных условий: геологическим строением, рельефом, климатом, растительностью. Особенно большое влияние на сток оказывает климат. На величину коэффициента стока благоприятно влияет увеличение количества осадков, относительной влажности воздуха, интенсивности выпадения дождей и снеготаяния. С увеличением проницаемости почв и густоты растительного покрова связано уменьшение коэффициента стока.

Для рек Карелии характерно наличие двух периодов низкого стока в году – летне-осеннего и зимнего. Летне-осенняя межень обычно наступает в конце июня и заканчивается в конце сентября, на реках зарегулированными озерами ее выделить трудно. Летне-осенняя межень часто нарушается дождевыми паводками. Зимняя межень устанавливается в конце ноября – начале декабря [47].

Продолжительность зимней межени зависит от климатических условий и составляет в среднем 100-130 дней в году. Замерзают реки в первой декаде декабря. Зимой водотоки питаются подземными водами и поверхностным стоком при прохождении оттепелей.

Ближайшими водными объектами к участку работ являются: озера Сурлампи и Кургелампи, реки Суриоя и Леппяоя.

2.2.2. Общие сведения о Корпангском месторождении

Корпангское месторождение железистых кварцитов расположено в северной части Костомукшского железорудного района. Оно представляет собой узкую, дугообразную синклиналичную структуру шириной до 500 м и длиной до 7 км, состоящую из 2-х ветвей - Западной и Восточной (соответственно Западный и Восточный участки).

Западная ветвь представляет собой опрокинутую на юго-восток изоклинальную складку протяженностью до 4 км и шириной до 500 м. Простирается северо-восточное, падение крыльев на северо-запад под углом 30° - 45° .

Восточная ветвь ориентирована в субмеридиональном направлении с более крутым, чем у Западной, падением на восток, от 80° до вертикального, а в некоторых случаях и западным падением. Протяженность ветви около 3 км, ширина до 200 м.

На Корпангском месторождении костомукшская свита не расчленяется на подсвиты и характеризуется сложным строением, представленным часто перемежающимися телами железистых кварцитов и вмещающих их пород: кварц-биотитовых, биотито-кварцевых, кварц-амфиболовых и других сланцев, безрудных кварцитов, лептитовых гнейсов, плагиопорфиров и серицитовых плагиосланцев. Все эти породы образуют пластообразные и линзовидные тела различной мощности (до 60 м) и протяженности, с частыми фациальными взаимопереходами по простиранию и по падению.

Наиболее богатыми рудными пластами является южная часть западной ветви и северная часть восточной ветви, где железистые кварциты составляют около 60% разреза рудоносной толщи. Магнетитовые кварциты слагают пласты, нередко с пережимами и раздувами, а также кулисообразно расположенные линзовидные тела длиной по простиранию от 100-200 м до 2500 м. Средняя мощность рудных тел от 6 до 40 м. В одном разрезе отмечается от 1 до 6 рудных тел. Суммарная мощность рудных тел Западной ветви до 160 м, Восточной – от 30 до 125 м, а общая мощность составляет от 20-30 до 220-250 м. Кроме кондиционных рудных тел, учтенных при подсчете запасов, имеются многочисленные рудные пласты (мощность до 3-5 м) протяженностью до 100 м. Контакты рудных тел с вмещающими породами согласные, как правило, четко выраженные. Всего на месторождении выделено 18 рудных тел, внутри которых присутствуют прослои пустых пород мощностью от нескольких сантиметров до 5 м, составляя менее 1% объема рудных тел.

Все породы месторождения перекрыты рыхлыми четвертичными образованиями, которые представлены мореной мощностью до 20 м, в среднем 4-7 м, и торфяниками мощностью редко более 1 м.

Разрывные нарушения на месторождении двух типов – со смещением и без смещения блоков. К зонам разломов приурочены дайки пород различного состава длиной от 100 до 900 м, горизонтальной мощностью от 3 до 30 м.

Геологическое строение выглядит следующим образом:

- верхнеархейские образования контоксской толщи залегают на интенсивно измененных породах лопийского отдела преобразованные в мигматиты;
- для всех пород характерны высокая степень метаморфизма и повсеместный прорыв более поздними интрузиями основного, ультраосновного и кислого состава;
- гимольская серия представлена образованиями рувинварской и костомукшской свит;
- рувинварская свита сложена основными эффузиями, превращенными в результате метаморфизма в зеленые сланцы (плагиоклаз-биотит-амфиболовые, эпидот-хлорит-амфибол-плагиоклазовые), амфиболиты и метадиабазы, а так же ультраосновными эффузивами, преобразованными в тальк-хлоритовые, серпентин-тальковые и кристаллические сланцы, которые в основном подстилают породы Костомукшской свиты, но встречаются и в переслаивании с ними в приконтактных частях (макроскопически – это мелкозернистые зеленовато-серые породы с отчетливой сланцеватой текстурой).

Гидрогеологические условия месторождения изучались в периоды 1974-1976 гг. на стадии предварительной разведки и 1977–1981 гг. на стадии детальной разведки. Проведенные исследования выявили, что подземные воды распространены повсеместно.

Водоносность зависит от трещиноватости пород, в целом она слабая и весьма слабая, большинство трещин являются закрытыми. Зоны тектонических нарушений на общем фоне полученных результатов не выделяются. Трещиноватость пород в разрезе неоднородна. Верхняя граница относительно водоупорных пород, монолитность которых нарушена лишь отдельными трещинами, отмечается преимущественно на глубине 100 – 200 м. Выше этой границы кристаллические породы слабо трещиноватые. Только самая верхняя часть разреза относительно более трещиновата, разрушена или выветрена и имеет распространение до глубины 40 – 50 м). Это своего рода зона активного водообмена, где водоносные горизонты объединяются в единый водоносный комплекс.

Подземные воды трещиноватых кристаллических пород образуют единый безнапорный водоносный горизонт, уровень которого снижается от более высоких участков рельефа к более низким.

Водообильность и водопроницаемость пород соответствует их слабой и весьма слабой трещиноватости.

Таблица 25 - Коэффициент фильтрации на Корпангском месторождении

Глубина, м	0-100	100-200	340-1060
Коэффициент фильтрации (средний), м/сутки	0,08-0,7 (0,3)	0,002-0,1 (0,05)	0,0002

Сравнение расчетных водопритоков с фактическими позволяет сделать вывод о том, что расчетные значения притоков завышаются над фактическими. Поскольку основная доля водопритоков приходится на атмосферную составляющую, а составляющая за счет подземных вод в большей степени зависит от притоков из интервала 0 – 100 м, по мере углубления карьера, ниже глубины 100 м, величина водопритока за счет подземных вод будет увеличиваться незначительно. Опыт эксплуатации месторождения показывает, что гидрогеологическая обстановка на карьерах является простой и не усложняет горных работ.

Для естественных гидрогеологических условий месторождения характерна тесная гидравлическая связь грунтовых вод с водоносным комплексом руднокристаллической толщи и вмещающих пород. В соответствии с геологическим строением на месторождении выделяются три инженерно-геологических комплекса:

1. Комплекс рыхлых несвязных пород, представленный моренными валуно-галечниковыми отложениями с супесчано-суглинистым заполнителем. Комплекс имеет локальное распространение. Мощность рыхлых отложений от 0 до 20 м, средняя: 4-7 м.
2. Комплекс пород средней крепости, приуроченный к зоне дезинтеграции коренных осадочно-метаморфических пород, мощностью до 40- 100м. Породы сильнотрещиноватые, местами разрушенные до дресвы ($\sigma_{сж} < 800 \text{ кг/см}^2$).
3. Комплекс крепких пород, трещиноватых, слаботрещиноватых, невыветрелых. Имеет повсеместное распространение ($\sigma_{сж} > 800 \text{ кг/см}^2$).

Наиболее крупные тектонические нарушения приурочены к Восточной ветви, представленный взбросом меридионального простирания с крутым падением на северо-восток и субширотным разломом с крутым падением на юг. В районе нарушений породы и обладают низкой прочностью и раздроблены.

Крепкие и средней крепости породы представлены лептитовыми гнейсами, кварц-амфибол-биотитовыми сланцами, железистыми кварцитами. Сланцеватость в лежащем боку залежи направлена в сторону выемки и оказывает влияние на устойчивость уступов и бортов карьера. При угле падения 40-65° заоткоска уступов в лежащем боку производится по наслоению.

На карьерах Корпангского месторождения принята система разработки углубочная, продольная двух бортовая с применением автомобильного и железнодорожного транспорта. Вскрышные породы вывозятся во внешние отвалы автомобильным транспортом, руда на ДОФ - комбинированным автомобильно-железнодорожным. Принят валовый способ выемки полезного ископаемого.

Рельеф района месторождения представлен чередованием грядовых возвышенностей и удлиненных пологих депрессий, ориентированных преимущественно в северо-западном и северном направлениях. Наибольшая высота - 257,9 м, при этом относительные превышения достигают 50, редко 70 м.

Гидрографическая сеть района относится к бассейну Белого моря и богата многочисленными озерами, реками и ручьями, что обуславливается избыточно влажным климатом.

Небольшие реки или короткие протоки соединяют между собой многочисленные озера, образуя отдельные озерно-речные системы. Выделяются два основных типа озер по происхождению их котловин: тектонические и моренные. Тектонические котловины развиты в трещинах и сбросах, и состоят из длинного плеса и большого числа узких вытянутых заливов. Котловины озер носят ярко выраженные следы эрозионной деятельности ледника. Котловины мореного типа приурочены, главным образом, к понижениям между моренными грядами и холмами или образованы в результате подпруживания речных долин ледниковыми отложениями.

2.3. Технология обогащения железных руд

Основная масса пород разрабатываемых месторождений требует рыхления с помощью буровзрывных работ. В карьере используются буровые станки для бурения взрывных скважин. Рудная масса из забоя доставляется самосвалами на перегрузочные склады, откуда электрифицированным железнодорожным транспортом подается на дробильно-обоганительную фабрику (ДОФ). Конечным продуктом дробильно-обоганительной фабрики является железорудный концентрат. Руда поступает в главный корпус обогащения, где измельчается в три стадии с классификацией в гидроциклоне, затем обогащается в три стадии сепарации и дешламации. Готовый продукт перекачивается в цех производства окатышей.

На предприятии применяется технология отдельной переработки легкообогатимых и труднообогатимых руд. Вскрышные породы самосвалами вывозятся во внешние вскрышные отвалы [56].

Дробление руды в дробильном отделении фабрики обогащения ведется в три стадии с предварительным грохочением во второй и поверочным грохочением в третьей стадиях дробления.

1. Дробление до крупности 350-0 мм;
2. Дробление с грохочением до крупности 100-0 мм;
3. Дробление в замкнутом цикле с грохотами до крупности 15-0 мм.

Технологическая схема обогащения руд состоит из трех стадий измельчения, четырех стадий классификации, трех стадий магнитной сепарации, трех операций дешламации, операции доводки концентрата методом тонкого грохочения.

Хвосты магнитной сепарации и сливы дешламаторов попадают в зумпфы пульпонасосной станции, откуда часть хвостов перекачиваются в хвостохранилище. Другая часть хвостов из зумпфов пульпонасосной станции насосами подается на сгущение. Сгущенные хвосты также перекачиваются в хвостохранилище. Осветленная вода сгустителей подается в технологический процесс производства концентрата.

Готовый концентрат направляется в корпус сгущения концентрата, где на радиальных сгустителях сгущается до требуемой плотности, и подается на фабрику по производству окатышей. Технологическая схема фабрики по производству окатышей разделяется на три этапа: фильтрование концентрата, производство сырых окатышей (окомкование) и обжиг окатышей. Сгущенный концентрат подвергают фильтрованию. Отфильтрованный

концентрат (кек) подается в отделение бункерования и дозирования, где смешивается с бентонитом, известняком или магнезитом в заданном соотношении. Полученная шихта подается на окомкование в барабанные окомкователи, работающие в замкнутом цикле с грохотами.

Готовые окатыши класса +8 - 16 мм подаются на обжиговую машину, где они последовательно проходят зоны предварительного подогрева, обжига, рекуперации и охлаждения. Максимальная температура обжига - 1350 градусов Цельсия. Высокотемпературный окислительный обжиг позволяет получить их высокую прочность и на 90-95 процентов удалить серу из окатышей [56].

2.4. Изучение отходов производства окатышей из различных железных руд

Состав хвостов, согласно классификации ГОСТ 25100-2011 [11], изменяется от песков пылеватых до песков средней крупности. В большинстве случаев, исследуемые пробы представлены рыхлыми песками малой степени водонасыщения.

Гранулометрический состав хвостов характеризуется высоким коэффициентом неоднородности (степень неоднородности рыхлых пород по гранулометрическому составу) – от 3,8 до 13,3.

Показатели физических свойств в естественном состоянии:

- естественная влажность - 6,5-25,2%;
- плотность - 1,47-1,87 г/см³;
- плотность частиц - 2,79-2,82 г/см³;
- плотность в сухом состоянии - 1,31-1,50 г/см³;
- пористость - 0,47-0,53;
- коэффициент пористости - 0,88-1,13.

Влажность хвостов увеличивается по мере удаления от места сброса пульпы. Наибольшей плотностью характеризуются хвосты наиболее крупного гранулометрического состава.

Значения оптимальной влажности W_{opt} и максимальной плотности $\rho_d \max$: для хвостов объединенной пробы (0,50 и 100 м от места сброса пульпы), относящихся к категории песков пылеватых: $W_{opt} = 11,0 \%$, $\rho_d \max = 1,89 \text{ г/см}^3$; для хвостов объединенной пробы (150 и 200 м от места сброса пульпы), относящихся к категории песков средней крупности: $W_{opt} = 6,5 \%$, $\rho_d \max = 1,83 \text{ г/см}^3$.

Модуль деформации возрастает, что означает снижение деформируемости, при укрупнении гранулометрического состава материала и повышении его плотности в сухом состоянии.

Расчетные значения модулей общей деформации по первому предельному состоянию при уплотняющей нагрузке 0,1 МПа для хвостов естественной плотности влажности:

- категории песок пылеватый (в 100 м от места сброса пульпы) – 16,8 МПа;
- категории песок средней крупности (у места сброса пульпы) - 23,2 МПа.

Расчетные значения модулей общей деформации по первому предельному состоянию при уплотняющей нагрузке 0,1 МПа объединенных проб хвостов при оптимальной влажности и коэффициенте уплотнения 0,95:

- категории песок пылеватый (0, 50 и 100 м) от места сброса пульпы –23,4 МПа;
- категории песок средней крупности (150 и 200 м от места сброса пульпы) —32,3 МПа.

Гранулометрический состав и физические характеристики оказывают влияние на прочностные характеристики хвостов, но несущественное.

Расчетные значения сцепления варьируют в пределах 0-0,003 МПа, а угла внутреннего трения – в интервале 30,0°-33,5°.

Расчетные значения сцепления (C_1) и угла внутреннего трения (φ_1) исследованных хвостов следующие:

- для песка пылеватого при естественной плотности-влажности: $C_1= 0$ МПа, $\varphi_1=30,0^\circ$;
- для песка средней крупности при естественной плотности и влажности: $C_1= 0$ МПа, $\varphi_1=32,0^\circ$;
- для песка пылеватого при оптимальной влажности и коэффициенте уплотнения 0,95 (объединенная проба – 0, 50 и 100 м от места сброса пульпы): $C_1= 0,003$ МПа, $\varphi_1=31,8^\circ$;
- для песка средней крупности при оптимальной влажности и коэффициенте уплотнения 0,95 (объединенная проба – 150 и 200 м от места сброса пульпы): $C_1= 0$ МПа, $\varphi_1=33,5^\circ$.

Наибольшей водопроницаемостью характеризуются хвосты более крупного гранулометрического состава и меньшей плотности в сухом состоянии.

Коэффициенты фильтрации хвостов при уплотняющих нагрузках σ , равных 0 и 0,1 МПа при естественной плотности и влажности:

- для песка пылеватого (в 100 м от места сброса пульпы):

при $\sigma=0$	0,0022 см/сек (1,90 м/сут);
при $\sigma=0,1$ МПа	0,000906 см/сек (0,78 м/сут);
- для песка средней крупности (у места сброса пульпы):

при $\sigma=0$	0,0035 см/сек (3,0 м/сут);
при $\sigma=0,1$ МПа	0,0011 см/сек (0,95 м/сут).

Коэффициенты фильтрации хвостов при уплотняющих нагрузках σ , равных 0 и 0,1 МПа объединенных проб при оптимальной влажности и коэффициенте уплотнения 0,95:

- для песка пылеватый (0, 50 и 100 м) от места сброса пульпы:

при $\sigma=0$	0,0010 см/сек (0,86 м/сут);
----------------	-----------------------------

при $\sigma=0,1$ МПа 0,0002 см/сек (0,17 м/сут);

- для песка средней крупности (150 и 200 м от места сброса пульпы):

при $\sigma=0$ 0,002 см/сек (1,70 м/сут);

при $\sigma=0,1$ МПа 0,0009 см/сек (0,78 м/сут).

Сравнительный анализ результатов исследований хвостов естественной плотности и влажности, проведенных в 2012 и 2016 годах, свидетельствует о следующем:

- гранулометрический состав хвостов стал более однородным, в связи, с чем естественная плотность стала более низкой;
- эти изменения не отразились на значениях таких характеристик, как плотность частиц, влажность, характеристики прочности и деформируемости, коэффициенты фильтрации под нагрузкой и коэффициенты фильтрации при отсутствии нагрузки для хвостов, относящихся к категории песков пылеватых;
- увеличилась водопроницаемость хвостов при отсутствии нагрузки, относящихся к категории песков средней крупности.

2.5. Выводы по главе 2

Основная продукция АО «Карельский окатыш» – высококачественные железорудные офлюсованные и неофлюсованные окатыши для металлургической промышленности.

Окатыши используются главным образом в чёрной металлургии для доменной плавки или электрометаллургической переработки. При использовании окатышей исключается отдельная загрузка в доменную печь руды и флюсов, значительно сокращается количество шлака при переработке руд с низким содержанием железа, а также повышается производительность плавки чугуна в доменной печи [52].

Для производства неофлюсованного окатыша используется бентонитовая глина месторождения «10-Хутор», находящегося в Усть-Абаканском районе Республики Хакасия. При взаимодействии с водой бентонитовая глина увеличивается в объеме и становится клейкой, что позволяет эффективно ее использовать в качестве связующего для производства окатышей из железорудного концентрата. Бентонит выступает в роли склеивающего компонента, а также создает прочные межзерновые контакты, способствующие уменьшению образования трещин под воздействием высоких температур, придавая окатышам прочность. ООО «Бентонит Хакасии» производит добычу бентонитовой глины в карьере открытым способом. Практически весь добытый бентонит во влажном состоянии активируется кальцинированной содой и сушится. Производственные мощности предприятия обеспечивают переработку 438 тысяч тонн бентонита в год [51].

Для производства офлюсованного окатыша используют в качестве добавок известняк Белоруческого месторождения, находящийся в Вытегорском районе Вологодской области.

Введение флюсов в состав агломерата или в доменную печь необходимо для понижения температуры плавления пустой породы железной руды или агломерата и золы кокса, а также для перевода их в легкоплавкий жидкий шлак, который легко выходит из печи.

При нагревании известняк разлагается с образованием извести и углекислого газа: $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$. Образовавшаяся известь и является шлакообразующим компонентом.

Белоручейское месторождение открыто в 1949 году. Его запасы составляют 9% всех запасов флюсовых известняков в России. Белоручейское рудоуправление добывает в год 1,5 млн. тонн известняка. Белоручейский участок не намечается к освоению, его запасы составляют 257 млн. т. На Ковжинском участке в 2008 г. добыто 1385 тыс. т. известняка, складировано 402 тыс. т. Запасы на 01.01.2009 г. по категории А+В+С1 388 млн. т. (8,1% от запасов РФ), по категории С2 - 747 млн. т.

Костомукшское и Корпангское месторождения разрабатываются открытым способом. Разработку осуществляет АО «Карельский Окамыш», входящее в ПАО «Северсталь». Главный административный и промышленный центр разработки — город Костомукша.

Костомукшское месторождение включает 2 залежи железной руды на глубине от 0 до 40 м: основную рудную (длиной 12,5 км, толщина до 270 м) и переслаивания (свыше 40 рудных тел длиной 0,1-6,7 км, толщиной 1-80 м). Руды представлены железистыми кварцитами. Основной рудный минерал — магнетит. Вредные примеси — фосфор, сера. Разведанные запасы руды 1156 млн т со средним содержанием Fe 32,2 %. Среднегодовая добыча руды около 24 млн тонн [47].

Корпангское месторождение представлено Западной и Восточной рудными зонами, каждая из которых имеет протяженность более 3 км, при мощности от 20-45 до 220-370 м. Мощность отдельных рудных тел колеблется от 5 до 120 м (средняя 35-40 м), длина от 200 до 2900 м. Рудные тела Западной зоны падают на северо-запад под углом 28-60°, Восточной - на восток под углом 60-90°. Рудные тела перемежаются с кварц-биотитовыми, биотит-кварцевыми, углеродсодержащими сланцами и безрудными кварцитами, участками интенсивно мигматизированными. Состав руд – преимущественно амфибол-магнетитовые, в меньшей степени имеют развитие биотит-магнетитовые руды. Вредные примеси – фосфор, сера. Прогнозные ресурсы категории P1 подвешенные к запасам кат. С2 на глубине от 300 до 670 м, были оценены в 220 млн т, впоследствии сокращены до 200 млн т.

В карьерах проводятся буровзрывные работы; рудная масса доставляется на перегрузочные склады, откуда железнодорожным транспортом поступает на дробильно-обогательную фабрику, где из руды получают железорудный концентрат.

Технологическая схема обогащения руд состоит из трех стадий измельчения, четырех стадий классификации, трех стадий магнитной сепарации, трех операций дешламации, операции доводки концентрата методом тонкого грохочения.

Хвосты магнитной сепарации и сливы дешламаторов попадают в зумпфы пульпонасосной станции, откуда часть хвостов перекачиваются в хвостохранилище. Другая часть хвостов из зумпфов пульпонасосной станции насосами подается на сгущение. Сгущенные хвосты также перекачиваются в хвостохранилище. Осветленная вода сгустителей подается в технологический процесс производства концентрата.

Готовый концентрат направляется в корпус сгущения, после чего подается на фабрику по производству окатышей. Технологическая схема фабрики по производству окатышей

разделяется на три этапа: фильтрация концентрата, производство сырых окатышей (окомкование) и обжиг окатышей [56].

Состав хвостов, согласно классификации ГОСТ 25100-2011 [11], изменяется от песков пылеватых до песков средней крупности. В большинстве случаев, исследуемые пробы представлены рыхлыми песками малой степени водонасыщения. Показатели физических свойств в естественном состоянии:

- естественная влажность - 6,5-25,2%;
- плотность - 1,47-1,87 г/см³;
- плотность частиц - 2,79-2,82 г/см³;
- плотность в сухом состоянии - 1,31-1,50 г/см³;
- пористость - 0,47-0,53;
- коэффициент пористости - 0,88-1,13.

Влажность хвостов увеличивается по мере удаления от места сброса пульпы. Наибольшей плотностью характеризуются хвосты наиболее крупного гранулометрического состава. Наибольшей водопроницаемостью характеризуются хвосты более крупного гранулометрического состава и меньшей плотности в сухом состоянии.

Сравнительный анализ результатов исследований хвостов естественной плотности и влажности, проведенных в 2012 и 2016 годах, свидетельствует о следующем:

- гранулометрический состав хвостов стал более однородным, в связи, с чем естественная плотность стала более низкой;
- эти изменения не отразились на значениях таких характеристик, как плотность частиц, влажность, характеристики прочности и деформируемости, коэффициенты фильтрации под нагрузкой и коэффициенты фильтрации при отсутствии нагрузки для хвостов, относящихся к категории песков пылеватых;
- увеличилась водопроницаемость хвостов при отсутствии нагрузки, относящихся к категории песков средней крупности.

Глава 3. Инженерно-геологическая характеристика хвостохранилища АО «Карельский окатыш».

3.1. Инженерно-геологические исследования

На прилегающей к району изысканий территории в 2011 г. ООО «ГЕОКАРТ» был составлен технический отчет по результатам инженерно-геологических изысканий для стадии «Проектная документация» на объекте: «Опытно-промышленный комплекс сухой магнитной сепарации для переработки руд в карьере «Центральный» производительностью 4 млн. тонн в год» [41].

На территории изысканий было пробурено 4 скважины глубиной 10,0 м, отобраны 4 пробы грунта для определения физико-механических свойств.

В геологическом строении территории до глубины бурения 10,0 м принимают участие кристаллические породы архея и протерозоя (кислые вулканиты и геллефлинты, кварциты безрудные). Подземные воды на территории изыскания встречены не были.

В 2015 г. АО «Карельский окатыш» был составлен технический отчет о производстве инженерно-геологических изысканий для разработки проектной документации по объекту «Установка для сгущения хвостов на АО «Карельский окатыш» [40].

На исследуемой территории в процессе изысканий было пройдено 54 скважины глубиной от 4,0 до 13,6 м, отобрано 57 проб грунта для определения физических и физико-механических характеристик и 2 пробы воды на стандартный химический анализ.

В геологическом строении территории, в пределах вскрытых скважинами глубин, принимают участие кристаллические породы архея и протерозоя (AR-PR), перекрытые чехлом четвертичных отложений. Четвертичные отложения представлены техногенными образованиями (крупнообломочные отложения с супесчаным, либо песчаным заполнителем), биогенными образованиями (торф среднеразложившийся), ледниковыми отложениями (супесь от твердой до пластичной, песок разной крупности от влажного до водонасыщенного). Коренные скальные породы представлены гнейсо-гранитами.

Гидрогеологические условия участка характеризуется наличием безнапорного водоносного горизонта, приуроченного к биогенным образованиям и рыхлым четвертичным отложениям, а также водоносного горизонта трещиноватой зоны коренных пород.

При бурении скважин подземные воды на участке работ встречены практически во всех скважинах на глубине от 0,0 до 4,3 м от поверхности земли (на абсолютных отметках от 191,2 до 192,6 м).

По результатам визуальной оценки местности и результатам бурения признаки опасных инженерно-геологических процессов (карст, оползни) выявлены не были. Из современных геологических процессов и явлений на территории изысканий встречены: морозное пучение, вызванное сезонным промерзанием грунта, подтопление территории, связанное с близким к поверхности залеганием уровня подземных вод [44].

В 2018 г. на территории хвостового хозяйства УПКиО АО «Карельский окатыш» по проекту "Развитие сооружений хвостового хозяйства УПКиО на период 2018-2043 гг." [44] был проведен комплекс инженерно-геологических изысканий, с целью получения материалов комплексного изучения инженерно-геологических условий, необходимых для строительства и обоснования безопасной эксплуатации проектируемых объектов. Работы проводились Пермским государственным национальным исследовательским университетом, генеральный подрядчик АО «Механобр Инжиниринг».

В 2019 г. цехом по производству геологических работ АО «Карельский окатыш» были проведены дополнительные работы по поверочному бурению скважин в районе Пионерной плотины и исследованию физико-механических свойств пород, слагающих данный разрез [39].

Цель работы – получение дополнительных материалов по изучению инженерно-геологических условий, для проведения повторного расчета устойчивости плотины.

В ходе инженерно-геологических изысканий на участке работ в районе плотины «Пионерная» в сумме была выполнена проходка 26 (21 – изыскания 2018 г. + 5 - доп. работы 2019 г.) скважины в 7 створах. Отбор проб осуществлялся в соответствии с ГОСТ 12071 [5].

План хвостового хозяйства (на 2018 г.) показан на рис. 8 и в Приложении А.

Схематичный план плотины «Пионерная» с нанесенными створами представлен на рис. 9.

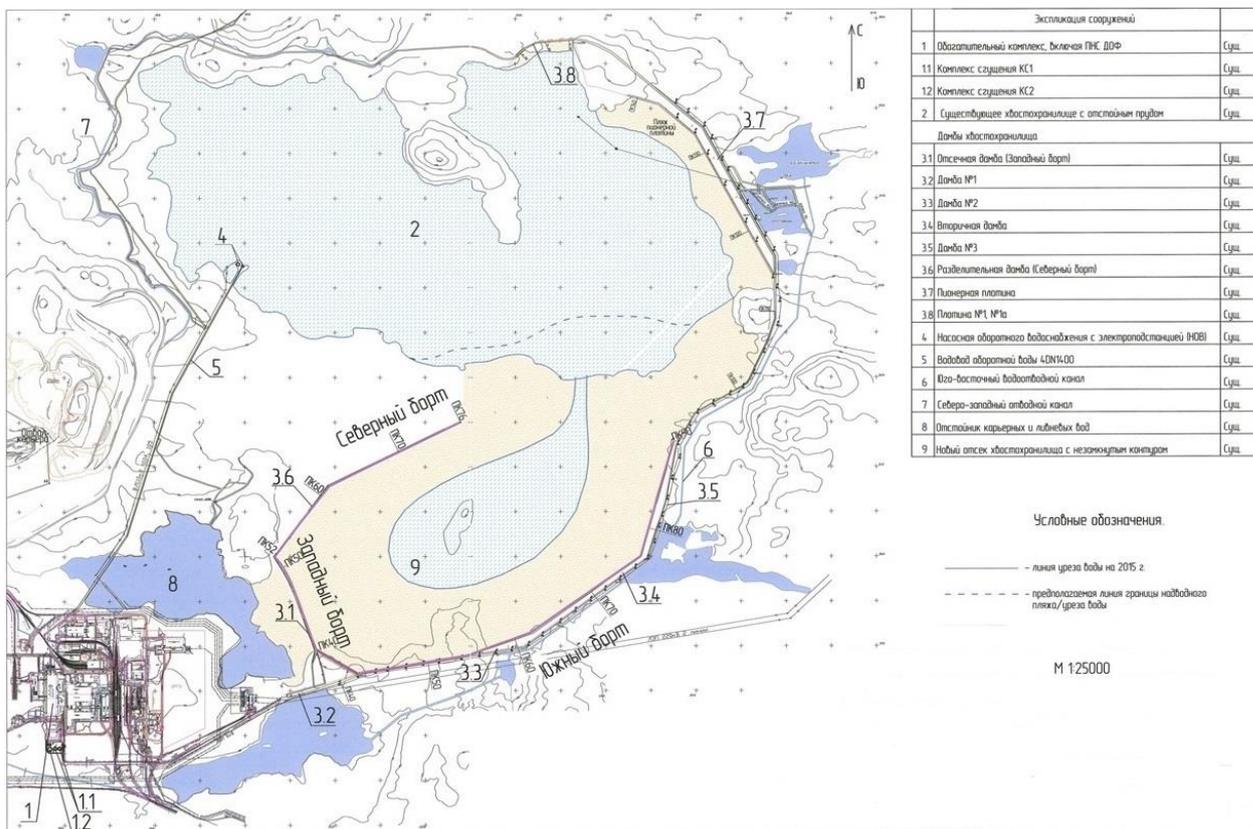


Рис. 8. План хвостового хозяйства на 2018 г.

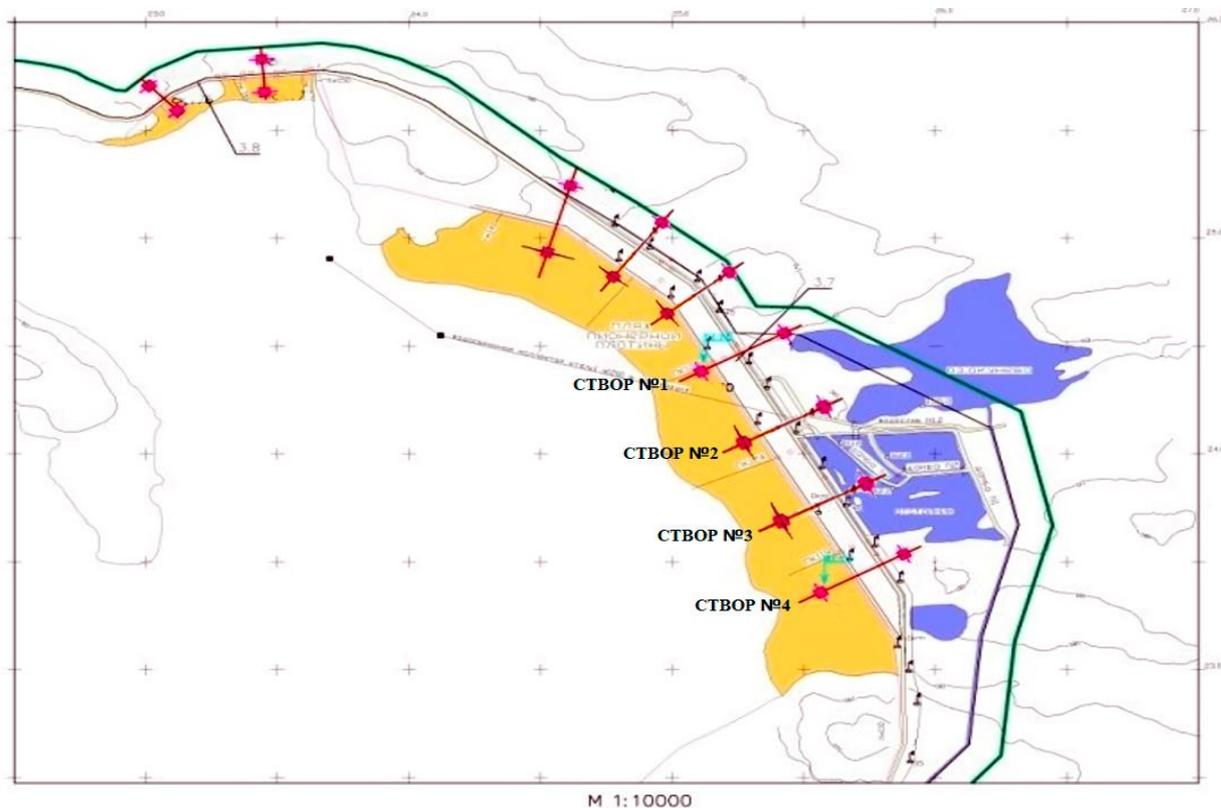


Рис. 9. Схематичный план плотины «Пионерная» с нанесенными створами.

В геологическом строении района изысканий («Пионерная плотина») пределах вскрытых скважинами глубин принимают участие биогенные (bQ_{IV}), техногенные (tQ_{IV}), верхневалдайские ледниковые ($gQ_{III_{vd}}$) отложения четвертичного возраста и коренные архейские отложения (AR) [44].

Всего в процессе полевых и камеральных работ был выделено 22 инженерно-геологических элемента (ИГЭ), условия залегания и развития которых отражено на инженерно-геологических разрезах и показаны в колонках геологических выработок (см. Приложение Б).

Геолого-литологический разрез участка изысканий по результатам проходки горных выработок следующий (сверху вниз):

Современные биогенные отложения – bQ_{IV}

Погребенный почвенно-растительный слой (ПРС). Мощность слоя 0,1 м. Встречен в скважинах № 5, 6.

ИГЭ-8. Торф коричневый сильноразложившийся. Мощность слоя от 0,4 до 1,2 м. Встречен в скважинах № 1, 4, 7, 8, 10.

Четвертичные техногенные отложения – tQ_{IV}

ИГЭ-2. Насыпной грунт: песок пылеватый серый средней плотности водонасыщенный, с включением до 20% дресвы метаморфических пород. В скважине № 2 с прослоями (3-5 см) песка мелкого серого плотного водонасыщенного. В скважине № 5 с прослоями супеси серой пластичной. Мощность слоя от 1,0 до 1,1 м. Встречен в скважинах № 2, 5.

ИГЭ-3. Насыпной грунт: песок мелкий серый, темно-серый средней плотности средней степени водонасыщения, с включением до 11% дресвы метаморфических пород. Участками с прослоями (до 5 см) супеси серой песчанистой пластичной, с прослоями (до 30 см) песка пылеватого/мелкого/средней крупности серого средней плотности средней степени водонасыщения. Местами сезонно-мерзлый до глубины 0,2 м. Мощность слоя от 0,2 до 13,8 м. Встречен в скважинах № 1, 2, 4, 5, 7, 8, 10, 11, 13, 14, 16, 17, 19, 20.

ИГЭ-4. Насыпной грунт: песок мелкий серый средней плотности водонасыщенный, с единичными включениями до 7% дресвы метаморфических пород. Участками с прослоями (3-5 см) супеси серой песчанистой пластичной, с прослоями песка пылеватого серого средней плотности средней степени водонасыщения. Мощность слоя от 9,3 до 12,2 м. Встречен в скважинах № 1, 4, 7, 10, 13, 16, 19.

ИГЭ-4а. Слой представлен песком коричневого цвета, гравелистым, местами до среднезернистого, плотный, неоднородного состава, с включением щебня (3-5 см) и валунов метаморфических пород (до 30%), с прослоями супеси текучей серовато-коричневого цвета. Мощность слоя варьирует от 3.8 до 8.0 м. Встречен в скважинах № 18-2 и 21-2.

ИГЭ-6. Насыпной грунт: песок средней крупности серый средней плотности водонасыщенный, с включением до 9% дресвы метаморфических пород. Участками с прослоями (до 30 см) супеси серой песчанистой пластичной с включением до 20% дресвы метаморфических пород. Мощность слоя от 1,1 до 2,7 м. Встречен в скважинах № 11, 4, 7, 8, 10.

ИГЭ-7. Насыпной грунт: песок крупный серый средней плотности водонасыщенный, с включением до 27% дресвы (размером 0,3-0,8 см) метаморфических пород, с прослоями (до 30 см) песка дресвяного серого плотного водонасыщенного (дресвы до 45%). Мощность слоя от 1,0 до 1,2 м. Встречена в скважинах № 2, 11.

ИГЭ-9. Насыпной грунт: супесь серая, темно-серая, серовато-коричневая пылеватая/песчанистая текучая. Участками с прослоями (до 8 см) песка пылеватого/мелкого серого, серовато-коричневатого средней плотности водонасыщенного, с включениями до 20% дресвы метаморфических пород. Участками с прослоями (до 30 см) суглинка легкого/тяжелого пылеватого текучего. Участками с включениями до 15% дресвы метаморфических пород, с прослоями (5- м) супеси серовато-коричневой щебенистой текучей (щебня и дресвы до 35%). Мощность слоя от 0,9 до 13,5 м. Встречен в скважинах № 1, 2, 4-8, 10-12, 13-21.

ИГЭ-9а. Супесь серовато-коричневая, песчанистая, до гравелистой, твердая. Мощность слоя до 2,5 м. Встречен в скважине № 15-3.

ИГЭ-9б. Супесь серовато-коричневого цвета, песчанистая, с прослоями дресвы и щебня метаморфических пород (размер 1-4 см). По слою отмечены прослой супеси пластичной. Мощность слоя до 8,5 м. Встречен в скважине № 12-2.

ИГЭ-9в. Супесь зеленовато-серая, серовато-коричневая, песчанистая, текучая, с включением щебня (3-8 см) и дресвы метаморфических пород. Отмечены прослой супеси твердой с включением щебня. Мощность слоя до 8,4 м. Встречен в скважине № 15-2.

ИГЭ-10. Насыпной грунт: супесь серовато-коричневая с дресвой твердая, дресвы и щебня (размерами до 5 см) метаморфических пород до 25%. Участками с прослоями (10-15 см) песка мелкого серовато-коричневого средней плотности средней степени водонасыщения. Мощность слоя от 0,9 до 2,3 м. Встречен в скважинах № 12, 15, 15-2, 18, 21.

ИГЭ-11. Насыпной грунт: дресвяный грунт с песчаным заполнителем, заполнителя до 45%, дресва, щебень метаморфических пород. Заполнитель песок мелкий серый, желтовато-коричневый, коричневый средней плотности средней степени водонасыщения, местами с прослоями (7-10 см) супеси коричневой песчанистой пластичной. Участками с прослоями (5-10 см) щебенистого грунта (щебня до 90%), с единичными включениями валунов (размером до 30 см). Местами грунт сезонно-мерзлый до глубины 0,2 м. Мощность слоя от 0,5 до 1,5 м. Встречен в скважинах № 3, 6, 9, 12, 12-2, 15, 18, 18-2, 21.

Насыпные грунты слежавшиеся, отсыпаны с применением гидромеханизации. Возраст отсыпки более 10 лет. Насыпь представляет собой отвалы грунтов и отходов производств. Процессы самоуплотнения насыпных грунтов в верхней части насыпных грунтов не завершены.

Общая мощность насыпных грунтов на участке работ составила от 0,5 до 33,8 м [44].

Четвертичные верхневалдайские ледниковые отложения – gQIIIvd

ИГЭ 16. Песок дресвяный желтовато-коричневый плотный водонасыщенный, дресвы и щебня метаморфических пород до 29%, с прослоями дресвяного грунта (дресвы, щебня до 60%). Мощность слоя от 1,1 м. Встречен в скважине № 9.

ИГЭ-16а. Песок желтого цвета, гравелистый, водонасыщенный. Мощность слоя до 16м. Встречен в скважине № 18-2.

ИГЭ-17. Супесь серая, коричневатая-серая дресвяная пластичная, дресвы и щебня (размерами 0,3-20 см) метаморфических пород до 48%. Участками с прослоями (до 10 см) супеси серой щебенистой пластичной (щебня и дресвы до 36%), с прослоями (1-3 см) песка мелкого серого водонасыщенного с единичными включениями дресвы. Мощность слоя от 1,2 до 3,9 м. Встречен в скважинах № 7, 12, 12-2, 14, 15, 18, 21.

ИГЭ-17а. Супесь серовато-коричневая, песчанистая, текучая, с включением щебня метаморфических пород (до 5 см), отмечены интервалы с прослоями песка среднезернистого, средней плотности, водонасыщенного. Мощность слоя до 1,5 м. Встречен в скважине № 21-2.

ИГЭ-176. Супесь серовато-коричневого цвета, местами зеленоватого, твердая, песчанистая, с включениями дресвы (размер 0,5-1,0 см) и щебня (размер до 3 см) метаморфических пород. Отмечены прослой песка гравелистого. Мощность слоя от 2,07 до 6,3 м. Встречен в скважинах № 15-2 и 15-3.

ИГЭ-18. Дресвяный грунт с песчаным заполнителем, заполнителя до 48%, дресва, щебень (размером до 10 см) метаморфических пород. Заполнитель песок средней крупности серовато-коричневый средней плотности водонасыщенный. Участками с прослоями (10-30 см) щебенистого грунта (щебня до 75%). Мощность слоя от 0,8 до 11,3 м. Встречен скважинами № 1-11, 16, 17, 19, 20. Общая мощность верхневалдайских ледниковых отложений на участке работ составила от 0,8-11,3 м [44].

Коренные архейские отложения – AR

ИГЭ-19. Гранито-гнейс светло-серый очень прочный очень плотный слабопористый слабовыветрелый неразмягчаемый мелкозернистый массивный трещиноватый, по трещинам обводнен. Мощность слоя от 1,2 до 3,3 м. Встречен всеми скважинами, кроме скв. № 12-2). Трещины тонкие и мелкие, как правило заполнены окислами железа. В скв. 18-2 в интервале 40.5-43.2 м отмечена зона дробления гнейсо-гранита, порода сильно трещиноватая, разрушенная. Общая вскрытая мощность коренных отложений на участке работ составила от 1,2 до 3,3 м [44].

ИГЭ-196. Габбро-диабаз серого цвета, плотный, мелкокристаллический, массивный, пятнистый. Вскрыт скважиной 21-2 на глубине 10.9 м.

Инженерно-геологические разрезы створов плотины «Пионерная» и условные обозначения к ним представлены в Приложение Б. Пример одного из разрезов показан на рисунке ниже:

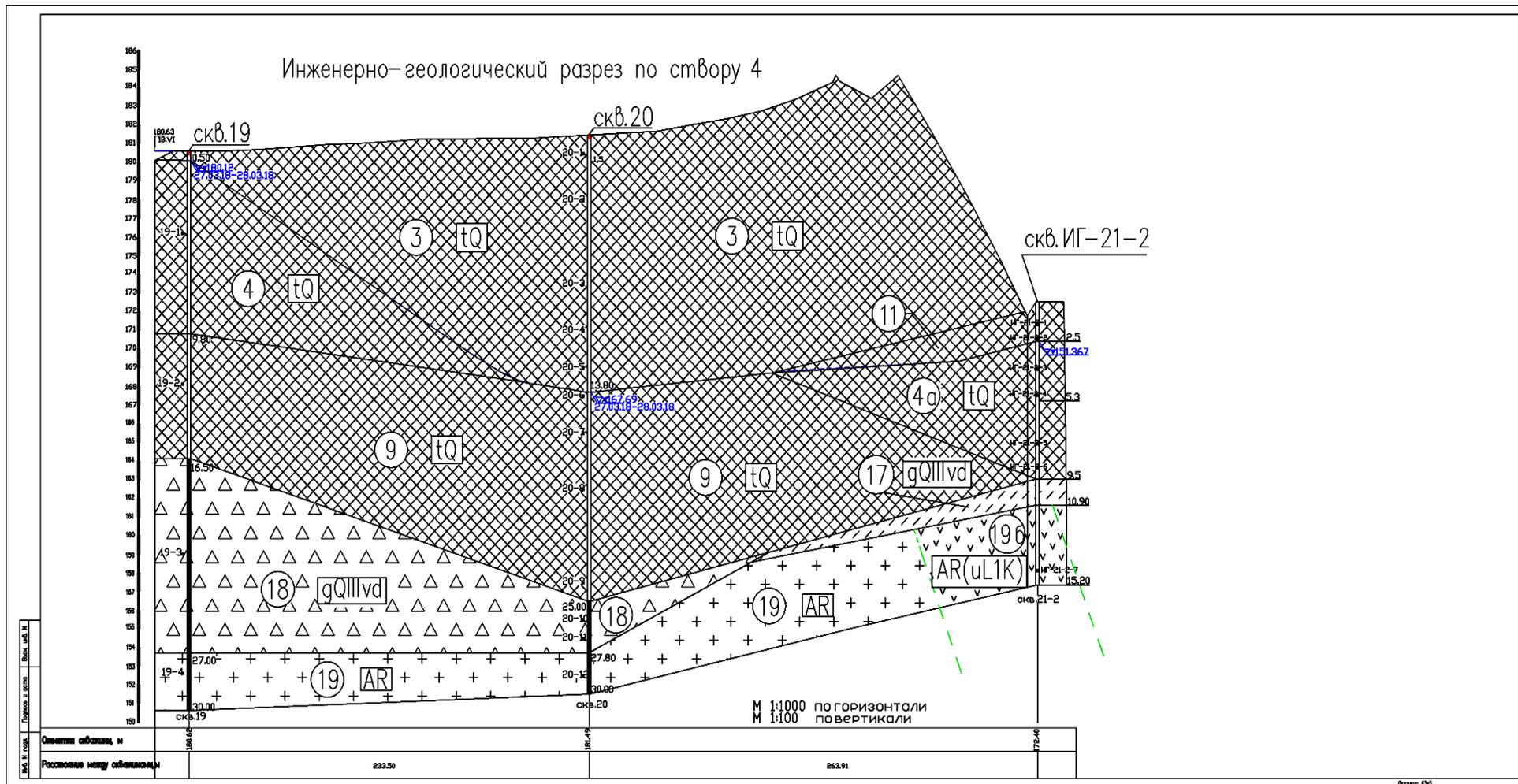


Рис. 10. Инженерно-геологический разрез створа №4 плотины «Пионерная».

3. 2. Характеристика техногенных сооружений

Система складирования

В состав существующих сооружений системы складирования хвостов входят:

1. Хвостохранилище
2. Ограждающие дамбы хвостохранилища, включая:
 - 2.1. Отсечную дамбу (Западный борт);
 - 2.2. Разделительную дамбу (Северный борт);
 - 2.3. Дамбы Южного борта (Южный борт), включая:
 - 2.3.1. Дамбу №1;
 - 2.3.2. Дамбу №2;
 - 2.3.3. Дамбу №3;
 - 2.3.4. Вторичную дамбу Южного борта накопителя.
3. Пионерная плотина.
4. Плотина №1.
5. Плотина №1А.

План расположения существующих сооружений представлен на рисунке ниже:

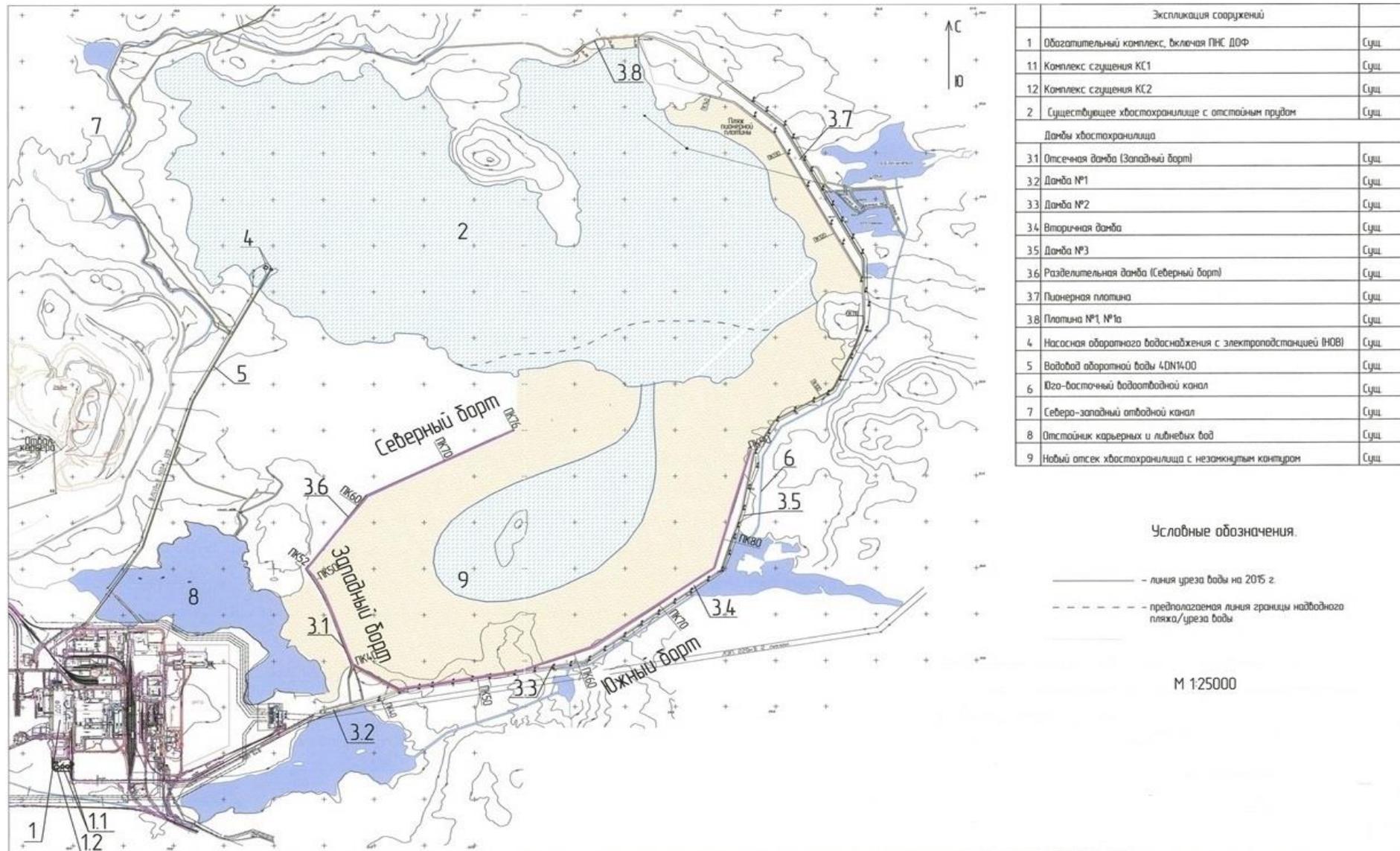


Рис. 11. План хвостового хозяйства на 2018 г.

Хвостохранилище

Хвостохранилище образовано в озере путем перекрытия естественных водотоков насыпными плотинами и дамбами и предназначено для складирования хвостов обогащения железной руды, а также осветления воды для оборотного водоснабжения.

Хвостохранилище *овражно-балочного типа*, по способу заполнения – *намывное*. С севера и запада хвостохранилище оконтурено холмами, с востока, юга и северо-востока насыпными и намывными плотинами.

Хвостохранилище является гидротехническим сооружением II класса и введено в эксплуатацию в 1982 году. Расположено на расстоянии 3 км к востоку от обогатительной фабрики. Общая площадь, отведенная под хвостохранилище, составляет 39 км², полезный объем при максимальной отметке заполнения 184,00 м составляет около 500 млн. м³.

В состав комплекса, обеспечивающего складирование отходов обогащения железных руд и возврат осветленной воды из хвостохранилища на дробильно-обогатительную фабрику, входят следующие гидротехнические сооружения и системы:

- основная плотина;
- ограждающая дамба южного борта;
- плотины 1 и 1а;
- отсечная дамба;
- водосбросное сооружение;
- отстойник карьерных и сточных вод с водоотводным каналом;
- система водоотвода поверхностного стока;
- очистные сооружения;
- аварийный бассейн;
- система гидротранспорта;
- система оборотного водоснабжения;
- система контрольно – измерительной аппаратуры (КИА);
- разделительная дамба.

Гидрологические условия характеризуются наличием водоносного горизонта, приуроченного к торфам болотных отложений, к пескам ледниковых отложений и к верхней зоне выветрелых и трещиноватых гранито – гнейсов архейско – протерозойского возраста. Расчетная сейсмичность площадки составляет 7 баллов [45].

Ограждающие дамбы хвостохранилища

Ограждающие дамбы предназначены для создания ёмкости хвостохранилища.

Дамба №1

Дамба №1 конструктивно представляет собой однородную насыпную каменно-земляную дамбу из скального грунта. В теле дамбы у верхового откоса предусмотрен экран из моренного грунта. По низовому откосу выполнена отсыпка скальным грунтом толщиной слоя 1 м. По температурному состоянию грунтов – дамба талая.

Дамба №1 имеет следующие характеристики: максимальная отметка гребня – 184,57 м, ширина по гребню – 19,2 м, длина по гребню – 526,53 м, максимальная ширина по основанию – 64 м, минимальная отметка основания в нижнем бьефе у подошвы – 173,0 м, максимальная высота – 11 м. Формула заложения низового откоса: $173,0 - 1:3,5 - 181,0 - 1:1,5 - 184,57 (19,2)$.

Среднее заложение верхового откоса – 1:1,5. Формула заложения верхового откоса: $173,0 - 1:1,5 - 184,57 (19,2)$.

Со стороны верхового откоса выполнен намыв пляжа из хвостовых отложений. Средняя длина надводного пляжа 100 м. По гребню дамбы выполнен эксплуатационный проезд, установлено стационарное электроосвещение, выполнена установка пьезометра.

В соответствии с постановлением №986 от 02.11.2013 года «О классификации гидротехнических сооружений» [1] (ограждающие сооружения хранилищ жидких промышленных отходов) относится к III классу ГТС.

Дамба №2

Дамба №2 конструктивно представляет собой однородную насыпную каменно-земляную дамбу из скального грунта. В теле дамбы у верхового откоса предусмотрен экран из моренного грунта. По низовому откосу выполнена отсыпка скальным грунтом толщиной слоя 1 м.

По температурному состоянию грунтов – талая.

Дамба №2 имеет следующие характеристики: максимальная отметка гребня – 186 м, ширина по гребню – 17 м, длина по гребню – 442 м, максимальная ширина по основанию – 87 м, минимальная отметка основания в нижнем бьефе у подошвы – 168,0 м, максимальная высота – 18 м. Формула заложения низового откоса: $168 - 1:3,5 - 180,0 - 1:1,5 - 186 (17)$.

Среднее заложение верхового откоса – 1:1,5. Формула заложения верхового откоса: $168,0 - 1:1,5 - 186 (17)$.

Со стороны верхового откоса выполнен намыв пляжа из хвостовых отложений. Средняя длина надводного пляжа более 500 м. По гребню дамбы выполнен эксплуатационный проезд, установлено стационарное электроосвещение, выполнена установка пьезометра.

В соответствии с постановлением №986 от 02.11.2013 года «О классификации гидротехнических сооружений» [1] (ограждающие сооружения хранилищ жидких промышленных отходов) относится к III классу ГТС.

Дамба №3

Дамба №3 конструктивно представляет собой однородную насыпную каменно-земляную дамбу из скального грунта. В теле дамбы у верхового откоса предусмотрен экран из моренного грунта. По низовому откосу выполнена отсыпка скальным грунтом толщиной слоя 1 м.

По температурному состоянию грунтов – талая.

Дамба №3 имеет следующие характеристики: максимальная отметка гребня – 183,51 м, ширина по гребню – 17 м, длина по гребню – 1668 м, максимальная ширина по основанию – 58 м, минимальная отметка основания в нижнем бьефе у подошвы – 171,0 м, максимальная высота – 12,5 м. Формула заложения низового откоса: 171 – 1:3,5 – 180,0 – 1:1,5 – 183,51 (17). Среднее заложение верхового откоса – 1:1,5. Формула заложения верхового откоса: 171 – 1:1,5 – 183,51 (17).

Со стороны верхового откоса выполнен намыв пляжа из хвостовых отложений. Средняя длина надводного пляжа – более 500 м. По гребню дамбы выполнен эксплуатационный проезд, установлено стационарное электроосвещение, выполнена установка пьезометра.

В соответствии с постановлением №986 от 02.11.2013 года «О классификации гидротехнических сооружений» (ограждающие сооружения хранилищ жидких промышленных отходов) относится к III классу ГТС [1].

Пионерная плотина

Пионерная плотина конструктивно представляет собой однородную насыпную каменно-земляную плотину из моренного грунта с пригрузкой низового и верхового откосов скальным грунтом толщиной 1-2 м. По температурному состоянию грунтов – талая.

Пионерная плотина имеет следующие характеристики: максимальная отметка гребня – 172,0 м, ширина по гребню – 12,0 м, длина по гребню – 2124 м, минимальная отметка основания в нижнем бьефе у подошвы – 152,37 м, максимальная высота – 19,63 м. Формула заложения низового откоса: 152,37 – 1:2,5 – 164,0 (6,0) – 1:2 – 172,0 (12,0). Среднее заложение верхового откоса – 1:2. Формула заложения верхового откоса: 152,37 – 1:2 – 172,0 (12,0).

Со стороны верхового откоса выполнен намыв пляжа из хвостовых отложений. Средняя длина надводного пляжа 329 м. По гребню плотины выполнен эксплуатационный проезд, установлено стационарное электроосвещение, выполнена установка 4 пьезометров и 5

поверхностных марок. В нижнем бьефе выполнена дренажная канава с максимальной глубиной 3 м.

В соответствии с постановлением №986 от 02.11.2013 года «О классификации гидротехнических сооружений» [1] (ограждающие сооружения хранилищ жидких промышленных отходов) относится ко II классу ГТС.

Согласно инженерным изысканиям (техническое обследование зданий и сооружений) было выявлено снижение фактического значения коэффициента устойчивости к нормативному значению коэффициента устойчивости Пионерной плотины. Согласно поверочному расчету устойчивости, необходимо выполнить пригруз из скального грунта.

Плотина №1

Плотина №1 конструктивно представляет собой однородную насыпную каменно-земляную плотину из моренного грунта с супесчаным заполнителем. В основании плотины выполнены banquetты из скального грунта с моренным экраном, пригрузом откосов скальным грунтом толщиной слоя 1-2 м. Экран из моренного грунта шириной по верху 3 м. выполнен обратный фильтр на низовом откосе из двух слоёв гравия толщиной 1 м, крупностью 1-5 см и 5-10 см. По температурному состоянию грунтов – талая.

Плотина №1 имеет следующие характеристики: максимальная отметка гребня – 184,0 м, ширина по гребню – 20,0 м, длина по гребню – 440 м, максимальная ширина понизу – 106 м, минимальная отметка основания в нижнем бьефе у подошвы – 170,91 м, максимальная высота – 13,0 м. Формула заложения низового откоса: 170,91 – 1:1,5 – 176,0 (6,0) – 1:3 – 184,0 (20,0). Среднее заложение верхового откоса – 1:2,5. Формула заложения верхового откоса: 168,75 – 1:2,5 – 174,0 (9,0) – 1:2,5 – 184,0 (20).

Со стороны верхового откоса выполнен намыв пляжа из хвостовых отложений. Средняя длина надводного пляжа 137 м. По гребню дамбы выполнен эксплуатационный проезд, установлено стационарное электроосвещение, выполнена установка 6 пьезометров и 4 поверхностных марок. В нижнем бьефе выполнена дренажная канава с максимальной глубиной 3 м.

В соответствии с постановлением №986 от 02.11.2013 года «О классификации гидротехнических сооружений» [1] (ограждающие сооружения хранилищ жидких промышленных отходов) относится к III классу ГТС.

Плотина №1а

Плотина №1а конструктивно представляет собой однородную насыпную каменно-земляную плотину из моренного грунта с пригрузкой низового и верхового откосов скальным грунтом толщиной 1-2 м. По температурному состоянию грунтов – талая.

Плотина №1а имеет следующие характеристики: максимальная отметка гребня – 184,0 м, ширина по гребню – 20,0 м, длина по гребню – 230 м, максимальная ширина понизу – 84 м, минимальная отметка основания в нижнем бьефе у подошвы – 175,05 м, максимальная высота – 5,0 м. Формула заложения низового откоса: 175,05 – 1:3 – 184,0 (20,0). Среднее заложение верхового откоса – 1:3. Формула заложения верхового откоса: 175,05 – 1:3 – 184,0 (20).

Со стороны верхового откоса выполнен намыв пляжа из хвостовых отложений. Средняя длина надводного пляжа 137 м. По гребню дамбы выполнен эксплуатационный проезд, установлено стационарное электроосвещение, выполнена установка 2 пьезометров и 2 поверхностных марок. В нижнем бьефе выполнена дренажная канава с максимальной глубиной 3 м.

В соответствии с постановлением №986 от 02.11.2013 года «О классификации гидротехнических сооружений» (ограждающие сооружения хранилищ жидких промышленных отходов) относится к IV классу ГТС [1].

Намывные дамбы хвостохранилища

В процессе эксплуатации накопителя выполнено возведение следующих ограждающих сооружений на хвостовых отложениях:

1. Южный борт (вторичная дамба Южного борта) хвостохранилища;
2. Западный борт (Отсечная дамба) хвостохранилища;
3. Северный борт хвостохранилища.

Вторичная дамба Южного борта хвостохранилища

Вторичная дамба Южного борта хвостохранилища предназначена для создания требуемой ёмкости в накопителе, а также защиты дамб №2 и №3.

Вторичная дамба Южного борта конструктивно представляет собой однородную дамбу, возведённую из хвостовых отложений. По температурному состоянию грунтов – талая.

Вторичная дамба Южного борта имеет следующие характеристики:

- максимальная отметка гребня – 198,93 м;
- ширина по гребню – 13,0 м;
- длина по гребню – 3400 м;
- минимальная отметка основания в нижнем бьефе у подошвы – 168,0 м;
- максимальная высота – 30,93 м.

Среднее заложение низового откоса – 1:6.

Со стороны верхового откоса выполнен намыв пляжа из хвостовых отложений. Средняя длина надводного пляжа более 500 м. По гребню дамбы выполнен эксплуатационный проезд.

В соответствии с постановлением №986 от 02.11.2013 года «О классификации гидротехнических сооружений» [1] (ограждающие сооружения хранилищ жидких промышленных отходов) относится ко II классу ГТС.

Западный борт (Отсечная дамба) хвостохранилища

Отсечная дамба хвостохранилища предназначена для создания требуемой ёмкости в накопителе. Конструктивно представляет собой однородную дамбу, возведённую из хвостовых отложений. По температурному состоянию грунтов – талая.

Отсечная дамба имеет следующие характеристики:

- максимальная отметка гребня – 197,51 м;
- ширина по гребню – 6,0 м;
- длина по гребню – 1500 м;
- минимальная отметка основания в нижнем бьефе у подошвы – 182,5 м;
- максимальная высота – 15,01 м.

Среднее заложение низового откоса – 1:2. Со стороны верхового откоса выполнен намыв пляжа из хвостовых отложений. Средняя длина надводного пляжа более 500 м. По гребню дамбы выполнен эксплуатационный проезд.

В соответствии с постановлением №986 от 02.11.2013 года «О классификации гидротехнических сооружений» [1] (ограждающие сооружения хранилищ жидких промышленных отходов) относится к III классу ГТС.

Северный борт (Разделительная дамба) хвостохранилища

Разделительная дамба хвостохранилища предназначена для отвода потоков пульпы в сторону от насосной станции оборотного водоснабжения.

Разделительная дамба конструктивно представляет собой однородную дамбу, возведённую из хвостовых отложений. По температурному состоянию грунтов – талая.

Разделительная дамба имеет следующие характеристики:

- максимальная отметка гребня – 196,87 м;
- ширина по гребню – 6,0 м;
- длина по гребню – 2400 м;
- минимальная отметка основания в нижнем бьефе у подошвы – 183,17 м;
- максимальная высота – до 6 м.

Среднее заложение низового откоса – 1:2. Со стороны верхового откоса выполнен намыв пляжа из хвостовых отложений. Средняя длина надводного пляжа более 500 м. По гребню дамбы выполнен эксплуатационный проезд.

В соответствии с постановлением №986 от 02.11.2013 года «О классификации гидротехнических сооружений» (ограждающие сооружения хранилищ жидких промышленных отходов) относится к IV классу ГТС [1].

Отстойный пруд хвостохранилища

Емкость отстойного пруда образована путём отсыпки ограждающих дамб и естественными бортами накопителя, и предназначена для аккумуляирования и осветления поступающих стоков:

- жидкой фазы хвостов за вычетом воды, заполняющей поры в складываемых хвостах;
- местных осадков на водосборную площадь хвостохранилища за вычетом испарения.

Общий объём отстойного пруда (при ФПУ) – около 165 млн. м³, фактический объём (при НПУ) – около 152 млн. м³, объём пруда, участвующий в процессе укладки хвостов и осветлении сточных вод – около 90-100 млн. м³. На 2018 год площадь отстойного пруда существующего хвостохранилища составляет ~13,3 млн. м². Средняя глубина 11,4 м, максимальная глубина 25 м. Пруд отстойник может безопасно аккумуляировать паводок поверхностного стока 1% обеспеченности. Следует отметить, что объём отстойного пруда за период с 2010 г. уменьшился примерно на 100 млн. м³, а максимальная глубина сократилась с 39 м до 25 м.

На хвостохранилище, для предотвращения переполнения, предусмотрен разрешённый сброс воды из пруда отстойника. Сброс воды из пруда отстойника осуществляется по двум водоприемным колодцам и водосборному коллектору DN140 [1].

3.3. Изучение формирования состава, строения, состояние и свойств техногенного массива

Напряженно деформирование состояние массива грунтов на территории плотины

Напряженное состояние верхних горизонтов земной коры формируется в результате действия *гравитационной* (ρg) и *тектонических сил* (T). Для описания напряженного состояния массивов горных пород вводится понятие о напряженном состоянии в точке (рис. 11). Графическим изображением напряженного состояния в точке массива пород служит диаграмма Мора (рис. 12).

Для характеристики напряженно-деформированного состояния массивов пород используется механическая модель, представляющая собой полупространство, ограниченное горизонтальной поверхностью и являющееся однородным, изотропным и линейно-деформированным [55].

Нормальные напряжения на горизонтальных площадках (σ_z) на территории рассматриваемой плотины возрастают с глубиной и равны весу выше залегающих пород, а также весу постоянно находящихся на плотине конструкций, местоположение которых не меняется в процессе эксплуатации сооружения.

Нормальные напряжения на вертикальных площадках ($\sigma_y = \sigma_x$) составляют часть от вертикальных и определяются с помощью распора (коэффициента Пуассона). В рассматриваемом случае, коэффициентом Пуассона будем пренебрегать, поскольку ширина сооружения мала. Боковой нагрузкой для ограждающей плотины будет считаться давление столба жидкости, которую плотина удерживает.

В случае действия тектонических сил горизонтальные напряжения возрастают на величину, соответствующую интенсивности действующей тектонической силы [55].

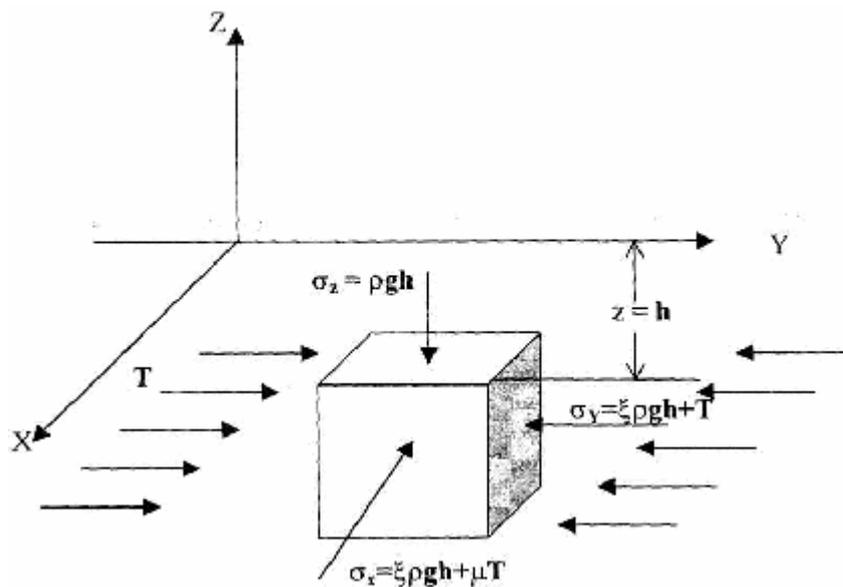


Рис. 12. Распределение напряжений в однородном изотропном упругом массиве горных пород в условиях действия гравитационных и сжимающих горизонтальных тектонических сил.

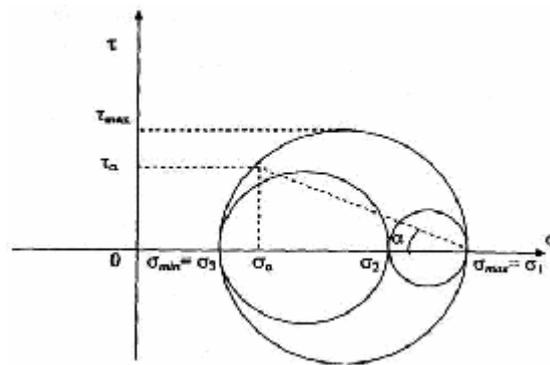


Рис. 13. Диаграмма Мора – графическое отображение напряжённого состояния в точке

Основные факторы, влияющие на величины и характер распределения напряжений, могут быть *глобальными, региональными и локальными*.

К глобальным факторам относится гравитационная сила, действующая повсеместно.

К региональным – тектонические силы, действующие на значительных территориях [55].

К локальным факторам, которые приводят к существенному перераспределению напряжений, на территории плотины относятся: движущиеся подземные воды, оказывающие взвешивающее воздействие на горные породы, гидродинамическое и гидростатическое давления, неровности рельефа, а также сейсмические воздействия от буровзрывных работ.

Массив горных пород плотины испытывает динамическое воздействие от транспортных средств и подвижного подъемно-транспортного оборудования (погрузчиков, экскаваторов, кранов, бульдозеров, включая вес транспортируемых грузов). Так же, на массив влияют климатические (снеговые, ветровые, температурные, гололедные) нагрузки, а также сезонное промерзание и пучинистость грунтов.

По результатам визуальной оценки местности и результатам бурения признаки опасных инженерно-геологических процессов (карст, оползни) выявлены не были [44].

Современные геологические процессы и инженерно-геологические процессы и явления на территории плотины, оказывающие на ее напряженно-деформированное состояние, следующие:

- криогенные – морозное пучение, вызванное сезонным промерзанием грунта;
- подтопление территории, связанное с близким к поверхности залеганием уровня подземных вод, который зависит как от рельефа местности, слабой фильтрации моренных и торфяных грунтов, так и от подпора стока подземных вод строительными сооружениями.

Грунт дамб обвалования, отсыпаемых из крупнозернистых хвостов, уплотняется под собственным весом – плотность после уплотнения - 1,90-2,00 т/м. Плотность частиц грунта – 2,70 т/м³. Коэффициент фильтрации – не менее 1,0 м/сут. Угол внутреннего трения, не менее: – для грунтов в водонасыщенном состоянии – 34 град; – для грунтов в естественном состоянии – 36 град. Сцепление, не менее: – для грунтов в водонасыщенном состоянии – 1,0 кПа; – для грунтов в естественном состоянии – 3,0 кПа. Модуль деформации, не менее: для грунтов в водонасыщенном состоянии – 15,94 МПа; – для грунтов в естественном состоянии – 21,25 МПа [45].

Проведя сравнение результатов исследований хвостов естественной плотности и влажности, проведенных в 2012 и 2016 годах, можно сделать вывод о следующем:

- гранулометрический состав хвостов стал более однородным, в связи, с чем естественная плотность стала более низкой;
- эти изменения не отразились на значениях таких характеристик, как плотность частиц, влажность, характеристики прочности и деформируемости, коэффициенты фильтрации под нагрузкой и коэффициенты фильтрации при отсутствии нагрузки для хвостов, относящихся к категории песков пылеватых;

- увеличилась водопроницаемость хвостов при отсутствии нагрузки, относящихся к категории песков средней крупности.

Расчет вертикальных и горизонтальных напряжений в грунте

Расчет вертикальных напряжений от собственного веса грунта с учетом взвешивающего эффекта и без него, а также горизонтальных напряжений, производились на всех четырех створах для максимальной, средней и минимальных высот.

По получившимся данным построены графики зависимости вертикальных напряжений от собственного веса грунта с учетом взвешивающего эффекта и без него, от высоты плотины. Аналогично построены графики зависимости горизонтальных напряжений от высоты плотины.

Таблица 26 – Расчет вертикальных и горизонтальных напряжений

Створ_1 / высота 184.18							без взвеш. эффекта	со взвеш. эфф.					
							вертикальные напряжения				горизонтальные напряжения		
ИГЭ	h, м	$\rho_{гр}, \text{т/м}^3$	$\rho_s, \text{т/м}^3$	e	$\gamma \text{ воды, кН/м}^3$	g, м/с ²	$\gamma \text{ грунта, кН/м}^3$	$s_{zg}, \text{кПа}$	$\gamma \text{ взвеш.гр., кН/м}^3$	$s_{zg}, \text{кПа}$	$\rho \text{ пульпы}$	$\gamma \text{ пульпы, кН/м}^3$	$s_{xg}, \text{кПа}$
3	14,50	1,92	2,83	0,66	10,00	10,00	19,20	278,40	19,20	278,40	1,05	10,50	152,25
уровень грунтовых вод													
6	0,97	2,04	2,83	0,65	10,00	10,00	20,41	298,20	11,14	289,21	1,05	10,50	162,44
9	3,24	1,80	2,82	0,96	10,00	10,00	18,03	356,53	9,29	319,27	1,05	10,50	196,40
7	0,66	2,02	2,81	0,66	10,00	10,00	20,20	369,82	10,90	326,45	1,05	10,50	203,31
9	13,55	1,80	2,82	0,96	10,00	10,00	18,03	614,23	9,29	452,42	1,05	10,50	345,63
17	0,76	2,11	2,84	0,55	10,00	10,00	21,14	630,31	11,85	461,44	1,05	10,50	353,62
18	0,90	2,05	2,84	0,63	10,00	10,00	20,50	648,84	11,26	471,62	1,05	10,50	363,11
19	3,02	2,64	2,91	0,10	10,00	10,00	26,40	728,48	17,29	523,78	1,05	10,50	394,79

Для наглядного примера приведены графики зависимости вертикальных и горизонтальных напряжений от глубины скважины при максимальной (рис. 14 и 16) и при минимальной (рис. 15 и 17) ее отметке.

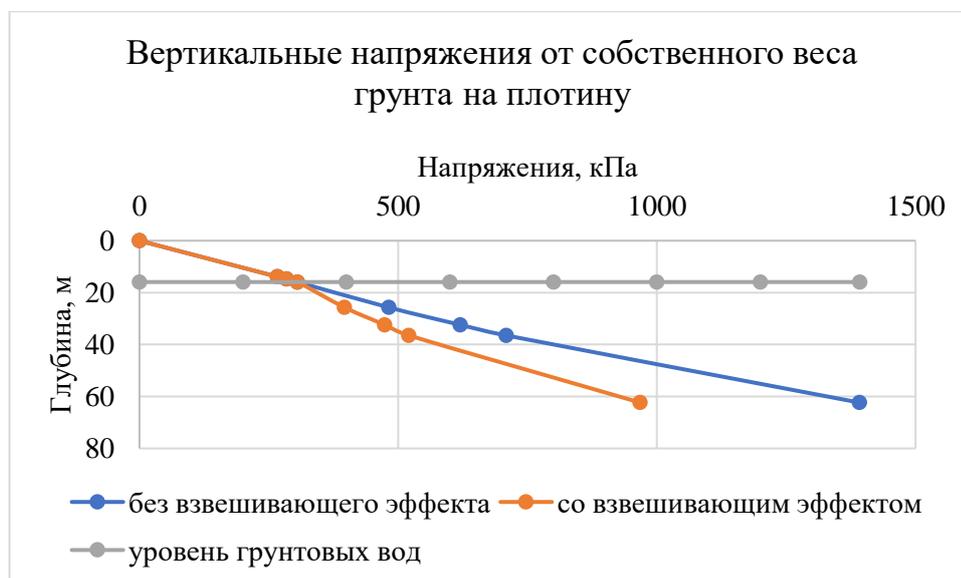


Рис. 14. График зависимости вертикальных напряжений собственного веса грунта с учетом взвешивающего эффекта и без него, от глубины скважины (створ 3, глубина скважины 62,34 м, абс. выс. 185,92).

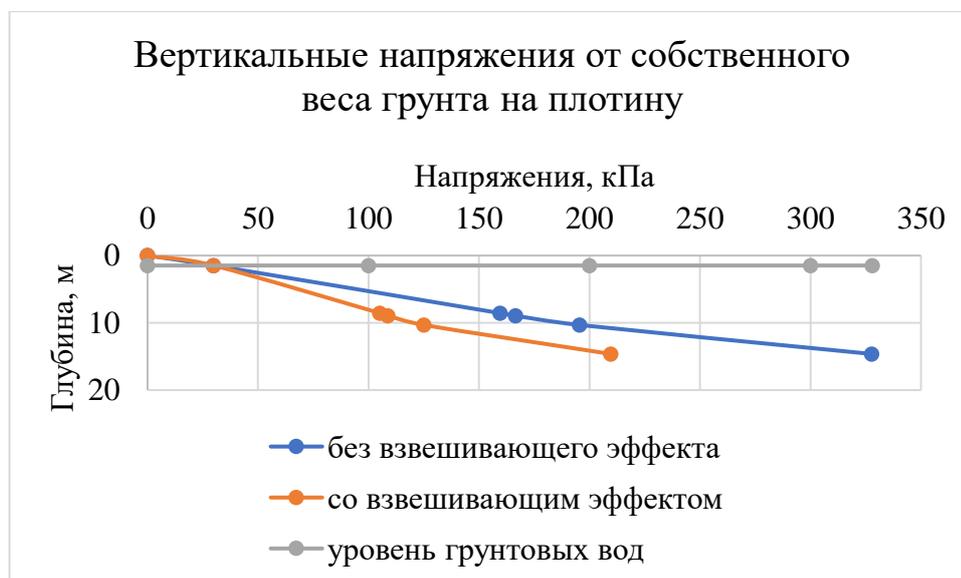


Рис. 15. График зависимости вертикальных напряжений собственного веса грунта с учетом взвешивающего эффекта и без него, от глубины скважины (створ 4, глубина скважина 14,63 м., абс. выс. 171,56 м.).

По рис. 14 и рис. 15 видно, что величина вертикальных напряжений от собственного веса грунта увеличивается пропорционально увеличению величины глубины скважины (максимальное напряжение = $1391,3 \text{ кН/м}^3$ при глубине скважины 62,34 м. (створ 3, абс. выс. 184,43 м), минимальное = $327,76 \text{ кН/м}^3$ при глубине скважины 14,63 м. (створ 4, абс.

выс. 171,56 м). Следовательно, можно сделать вывод о том, что чем выше высота плотины, тем больше будет вертикальная нагрузка от нижележащих грунтов действовать на плотину.

Так же по этим рисункам видно, что что взвешивающий эффект уменьшает величину вертикального напряжения от собственного веса грунта (максимальное уменьшение напряжений от взвешивающего эффекта = $423,78 \text{ кН/м}^3$ при глубине скважины 62,34 м. (створ 3, абс. выс. 184,43 м), минимальное = $117,15 \text{ кН/м}^3$ при глубине скважины 14,63 м. (створ 4, абс. выс. 171,56 м).

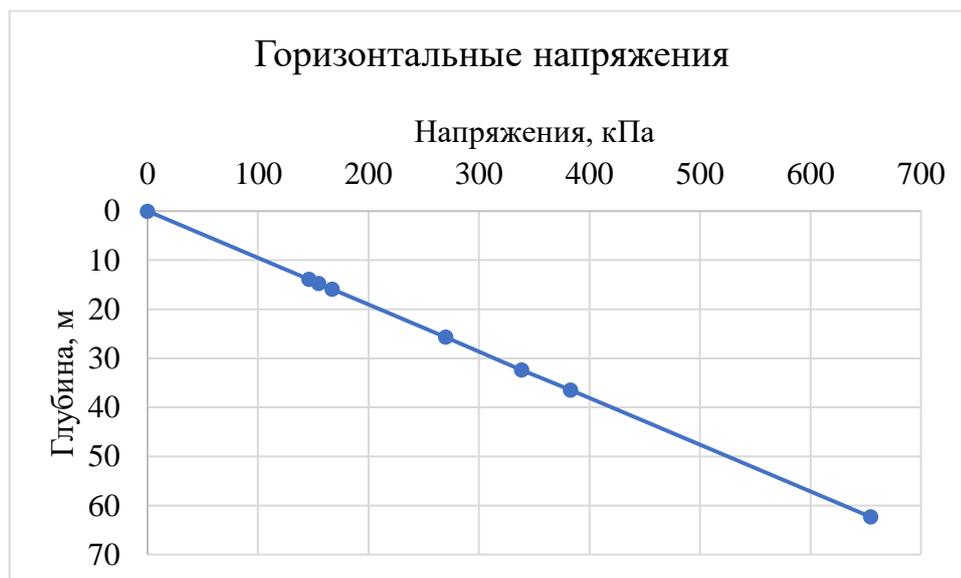


Рис. 16. График зависимости горизонтальных напряжений от глубины скважины (створ 3, глубина скважины 62,34 м, абс. выс. 185.92 м.).



Рис. 17. График зависимости горизонтальных напряжений от глубины скважины (створ 4, глубина скважина 14, 63 м., абс. выс. 171,56 м.).

По рис. 16 и рис. 17 видно, что величина горизонтальных напряжений увеличивается прямо пропорционально величине роста высоты плотины. Следовательно, можно сделать вывод о том, что чем выше высота плотины (следовательно, и уровень НПУ в хвостохранилище), тем больше будет величина горизонтальных напряжений, действующих на плотину.

Все расчетные таблицы и построенные по ним эпюры напряжений, а также графики зависимости вертикальных и горизонтальных напряжений от высоты плотины приведены в Приложении Б.

3.4. Изучение физико-механических свойств пород оснований

В 2018 г. на территории хвостового хозяйства УПКиО АО «Карельский окатыш» по проекту "Развитие сооружений хвостового хозяйства УПКиО на период 2018-2043 гг." [44] был проведен комплекс инженерно-геологических изысканий, с целью получения материалов комплексного изучения инженерно-геологических условий, необходимых для строительства и обоснования безопасной эксплуатации проектируемых объектов. Работы проводились Пермским государственным национальным исследовательским университетом, генеральный подрядчик АО «Механобр Инжиниринг». Лабораторные исследования образцов пород и химические анализы воды были выполнены в лаборатории механики грунтов ООО «Уралстройизыскания».

В 2019 г. цехом по производству геологических работ АО «Карельский окатыш» были проведены дополнительные работы по поверочному бурению скважин в районе Пионерной плотины и исследованию физико-механических свойств пород, слагающих данный разрез [37].

Цель работы – получение дополнительных материалов по изучению инженерно-геологических условий, для проведения повторного расчета устойчивости плотины.

Лабораторные исследования образцов пород были проведены в лаборатории физико-механических свойств и разрушения горных пород Научного центра геомеханики и проблем горного производства ФГБОУ «Санкт-Петербургский горный университет».

Таблица 27 - Объемы и виды работ ООО «Уралстройизыскания»

Виды работ	Измеритель	Объемы фактические
Полевые работы		
Статическое зондирование	1 опыт	25
Штамповые испытания	1 опыт	34
Опытно-фильтрационные работы	1 испытание	6
Отбор проб грунта ненарушенной структуры	1 монолит	2299
Отбор проб воды	1 проба	49
Лабораторные работы		
Полный комплекс физико-механических характеристик глинистых грунтов	1 образец	32
Полный комплекс физических характеристик глинистых грунтов	1 образец	523
Полный комплекс физико-механических характеристик песчаных грунтов	1 образец	74

Полный комплекс физических характеристик песчаных грунтов	1 образец	948
Полный комплекс физических характеристик крупнообломочных грунтов	1 образец	343
Полный комплекс физических характеристик торфов	1 образец	79
Полный комплекс физико-механических характеристик скальных грунтов	1 образец	300
Определения характеристик прочности и деформируемости грунтов методом трехосного сжатия	1 образец	128
Определение степени коррозионной агрессивности грунтов к бетону	1 образец	28
Определение степени коррозионной агрессивности грунтов к железобетонным конструкциям	1 образец	28
Определение степени коррозионной агрессивности грунтов к алюминиевой оболочке кабеля	1 образец	28
Определение степени коррозионной агрессивности грунтов к свинцовой оболочке кабеля	1 образец	28
Определение степени коррозионной агрессивности к углеродистой и низколегированной стали	1 образец	28
Стандартный химический анализ воды	1 проба	49

На участке изысканий были отобраны пробы грунта для определения коррозионной активности грунтов по отношению к различным материалам, а так же выполнено статическое зондирование в 25 точках и 34 испытания грунтов штампом (тип III и IV) площадью 600 см² на глубине от 1,5 до 7,5 м.

При расчетах рекомендуется использовать для грунтов ИГЭ-1 – ИГЭ-12, ИГЭ-14 – ИГЭ-18 значение модуля деформации, полученное по результатам штамповых испытаний; для грунтов ИГЭ-13 значение модуля деформации, согласно СП 11-105-97 часть III [17]; для грунтов ИГЭ-17 значение модуля деформации, полученное согласно «Методике оценки прочности и сжимаемости крупнообломочных грунтов с пылеватым и глинистым заполнителем» [13]. Предел прочности на одноосное сжатие для грунтов ИГЭ-14 приведен по лабораторным данным. Расчетные сопротивления грунтов приведены согласно СП 22.13330.2011 [20].

При проведении лабораторных и полевых испытаний руководствовались Государственными стандартами Российской Федерации.

Рекомендуемые значения C , ϕ грунтов ИГЭ-1 - ИГЭ-6, ИГЭ-8 - ИГЭ-10, ИГЭ-14 и ИГЭ-15 приняты по лабораторным данным; грунтов ИГЭ-7, ИГЭ-11, ИГЭ-16 – согласно испытаниям методом трехосного сжатия; грунтов ИГЭ-12 и ИГЭ-18 – согласно полевым испытаниям грунтов на сдвиг методом среза; грунтов ИГЭ-13 – согласно СП 11-105-97 часть III [33]; грунтов ИГЭ-17 – согласно «Методике оценки прочности и сжимаемости крупнообломочных грунтов с пылеватым и глинистым заполнителем» [13].

Рекомендуемые модули деформации для грунтов ИГЭ-1 – ИГЭ-12, ИГЭ-14 – ИГЭ-18 приняты по результатам штамповых испытаний; для грунтов ИГЭ-13 – согласно СП 11-105-97 часть III [33]; для грунтов ИГЭ-17 – согласно «Методике оценки прочности и сжимаемости крупнообломочных грунтов с пылеватым и глинистым заполнителем» [13].

На участке изысканий были отобраны пробы грунта для определения коррозионной активности грунтов по отношению к различным материалам.

По результатам химического анализа водных вытяжек и согласно ГОСТ 9.602-2005 [3] коррозионная агрессивность грунтов по отношению к свинцовой оболочке кабеля высокая по всем пробам. Коррозионная агрессивность грунтов по отношению к алюминиевой оболочке кабеля высокая по всем пробам.

Также были проведены определения коррозионной агрессивности грунта по отношению к углеродистой и низколегированной стали. По результатам исследований и ГОСТ 9.602-2005 [3] агрессивность грунта средняя по всем пробам.

Согласно СП 28.13330.2012 [21] грунты на участке изысканий неагрессивны к бетону марки W4.

Согласно СП 28.13330.2012 [21] грунты на участке изысканий по отношению к железобетонным конструкциям слабоагрессивные по всем пробам [44].

Статическое зондирование

По результатам статического зондирования грунтов построены графики удельного сопротивления грунта проникновению конуса зонда в МПа и общего сопротивления по боковой поверхности в кН, в зависимости от глубины погружения зонда.

Физико-механические характеристики грунтов по результатам статического зондирования согласно СП 47.13330.2012 [23]:

ИГЭ-1 – значения механических характеристик для насыпного грунта: песка пылеватого средней плотности средней степени водонасыщения – E (МПа) = 27,67; ϕ (град.) = 35; c (кПа) = 0.

ИГЭ-2 – значения механических характеристик для песка пылеватого средней плотности водонасыщенного – E (МПа) = 28,48; ϕ (град.) = 33; c (кПа) = 0.

ИГЭ-3 – значения механических характеристик для насыпного грунта: песка мелкого средней плотности средней степени водонасыщения – E (МПа) = 27,70; φ (град.) = 35; c (кПа) = 0.

ИГЭ-4 – значения механических характеристик для насыпного грунта: песка мелкого средней плотности водонасыщенного – E (МПа) = 25,42; φ (град.) = 32; c (кПа) = 0.

ИГЭ-5 – значения механических характеристик для насыпного грунта: песка средней крупности средней плотности средней степени водонасыщения – E (МПа) = 25,37; φ (град.) = 33; c (кПа) = 0.

ИГЭ-6 – значения механических характеристик для насыпного грунта: песка средней крупности средней плотности водонасыщенного – E (МПа) = 25,72; φ (град.) = 33; c (кПа) = 0.

ИГЭ-7 – значения механических характеристик для насыпного грунта: песка крупного средней плотности водонасыщенного – E (МПа) = 28,08; φ (град.) = 33; c (кПа) = 0.

ИГЭ-8 – значения механических характеристик для насыпного грунта: супеси песчанистой пластичной – E (МПа) = 41,38; φ (град.) = 27; c (кПа) = 46.

ИГЭ-9 – значения механических характеристик для насыпного грунта: супеси пылеватой/песчанистой текучей – E (МПа) = 34,35; φ (град.) = 26; c (кПа) = 40.

ИГЭ-10 – значения механических характеристик для насыпного грунта: супеси с дресвой твердой - E (МПа) = 36,55; φ (град.) = 26; c (кПа) = 42.

ИГЭ-11 – значения механических характеристик для насыпного грунта: дресвяного грунта с песчаным заполнителем средней плотности средней степени водонасыщения – E (МПа) = 34,25; φ (град.) = 35; c (кПа) = 0.

ИГЭ-18 – значения механических характеристик для дресвяного грунта с песчаным заполнителем средней плотности водонасыщенного – E (МПа) = 27,70; φ (град.) = 33; c (кПа) = 0.

Статическое зондирование выполнено в 25 точках. Глубина зондирования составляет от 2,9 до 15,1 м.

Отказ происходит в:

- насыпном грунте: песке пылеватом средней плотности средней степени водонасыщения (ИГЭ-1);
- насыпном грунте: песке мелком средней плотности средней степени водонасыщения (ИГЭ-3);
- насыпном грунте: песке средней крупности средней плотности средней степени водонасыщения (ИГЭ-5);

- насыпном грунте: супеси песчанистой пластичной (ИГЭ-8);
- насыпном грунте: супеси пылеватой/песчанистой текучей (ИГЭ-9);
- насыпном грунте: дресвяном грунте с песчаным заполнителем средней плотности средней степени водонасыщения (ИГЭ-11);
- супеси дресвяной пластичной (ИГЭ-17);
- дресвяном грунте с песчаным заполнителем средней плотности водонасыщенном (ИГЭ-18).

Статическое зондирование грунтов проводилось с целью расчленения инженерно-геологического разреза территории, выделения инженерно-геологических элементов, определения однородности пород по площади и по глубине.

Штамповые испытания грунтов

Испытания грунтов штампом выполнялись после бурения инженерно-геологических скважин механическим колонковым способом диаметром 325 мм и осуществлялось с обсадкой трубами до забоя с отбором грунта после опыта.

Тип и площадь штампа приняты в зависимости от испытываемого грунта, согласно ГОСТ 20276-2012 [8] (площадь штампа 600 см², диаметр 27,65 см).

На участке изысканий было выполнено 34 испытания грунтов на глубине от 1,5 до 7,5 м для определения модуля деформации грунтов ИГЭ-1 – ИГЭ-12 и ИГЭ-14 – ИГЭ-18, а также для уточнения значений модуля деформации грунтов, полученных в лабораторных условиях. Подготовка к испытанию грунта штампом и проведение опытов выполнено согласно ГОСТ 20276-2012 [8].

Нагрузка на штамп для грунтов ИГЭ-1 – ИГЭ-4, ИГЭ-8, ИГЭ-14, ИГЭ-15 и ИГЭ-17 проводилась ступенями по 0,025 МПа; для грунтов ИГЭ-5 – ИГЭ-7, ИГЭ-9, ИГЭ-10 и ИГЭ-16 ступенями по 0,050 МПа; для грунтов ИГЭ-11, ИГЭ-12 и ИГЭ-18 проводилась ступенями по 0,100 МПа до условной стабилизации деформации грунта (осадки штампа) согласно ГОСТ 20276-2012 [8].

Общее число ступеней давления для каждого опыта для грунтов ИГЭ-1 – ИГЭ-4, ИГЭ-14 и ИГЭ-15 составило 20; для грунтов ИГЭ-5 – ИГЭ-8, ИГЭ-16 и ИГЭ-17 составило 12, для грунтов ИГЭ-11, ИГЭ-12 и ИГЭ-18 составило 7, для грунтов ИГЭ-9 и ИГЭ-10 составило 8. Время выдержки каждой ступени давления по всем опытам составило 1,0-5,0 часов. За критерий условной стабилизации деформации принята скорость осадки штампа, не превышающая 0,1 мм за 1 час согласно ГОСТ 20276-2012 [8].

Отсчеты проводились по прогибомерам на каждой ступени нагружения: при испытании песков (ИГЭ-1 – ИГЭ-7, ИГЭ-14 – ИГЭ-16) и крупнообломочных грунтов (ИГЭ-11, ИГЭ-12 и ИГЭ-18) через каждые 10 минут в течение первого получаса, 15 минут в течение второго получаса и далее через 30 минут до условной стабилизации деформации грунтов. При испытании глинистых грунтов (ИГЭ-8 – ИГЭ-10 и ИГЭ-17) через каждые 15 минут в течение первого часа, далее через каждые 30 минут в течение второго часа, далее через 1 час до условной стабилизации деформации грунта (ГОСТ 20276-2012 [8]).

По данным испытаний построены графики зависимости осадки штампа от давления согласно ГОСТ 20276-2012 [8].

Модуль деформации грунта E , МПа рассчитан согласно ГОСТ 20276-2012 [8]. Результаты испытаний грунта штампом приведены ниже в таблице 28.

Таблица 28 - Результаты испытаний грунтов штампами

Номер ИГЭ	Номер штампа	Модуль деформации, МПа	
		Интервал значений	Среднее значение
1	1, 2	14,01-14,20	14,10
2	3, 4	15,58-16,05	15,82
3	5, 6	15,58-16,31	15,94
4	7, 8	18,15-18,47	18,31
5	9, 10	19,19-19,46	19,33
6	11, 12	21,08-21,41	21,25
7	13, 14	22,44-23,58	23,01
8	29, 30	13,36-13,97	13,67
9	27, 28	10,19-10,40	10,30
10	31, 32	14,38-15,28	14,83
11	25, 26	39,20-40,23	39,72
12	23, 24	41,61-42,78	42,20
14	15, 16	20,46-21,08	20,77
15	17, 18	21,97-22,69	22,33
16	19, 20	27,83-28,69	28,26
17	33, 34	21,64-24,45	23,05
18	21, 22	40,23-41,90	41,07

Таблица 29 - Объемы и виды работ лаборатории физико-механических свойств и разрушения горных пород Научного центра геомеханики и проблем горного производства Санкт-Петербургского Горного университета

Виды работ	Измеритель	Объемы Фактические
Лабораторные работы		
Гранулометрический состав пород	1 определение	35
Плотность в естественном сложении	1 определение	55

Плотность частиц	1 определение	39
Параметры сцепления и угла внутреннего трения) при одноплоскостном сдвиге	1 определение	35
Модуль деформации (нагрузка до 0,5 МПа)	1 определение	175
Модуль упругости	1 определение	8
Модуль деформации	1 определение	8
Коэффициент Пуассона скальных пород	1 определение	8
Предел прочности при срезе со сжатием	1 определение	8
Сцепление и угол внутреннего трения скальных пород	1 определение	1

Всего из ИГ скважин было отобрано 40 проб грунтов, а именно по скв. ИГ-21-2 – 7 проб; скв. ИГ-12-2 – 7 проб; скв. ИГ-15-2 – 12 проб; скв. ИГ-15-3 – 4 пробы; скв. ИГ-18-2 – 10 проб, из них 5 проб скальных грунтов. Отбор проб осуществлялся в соответствии с ГОСТ 12071 [5].

Результаты механических испытаний дополнены экспериментальными кривыми деформирования образцов в условиях одноосного сжатия, паспортами прочности горных пород, графиками зависимости предельного сдвигающего (касательного) напряжения от заданного нормального напряжения по испытаниям на одноплоскостной срез, графиками зависимости деформирования при компрессионном сжатии [39].

При проведении лабораторных испытаний руководствовались Государственными стандартами Российской Федерации.

Определение *показателей физических характеристик* проб грунта выполнено согласно ГОСТ 5180-2015 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик» [4].

Гранулометрический состав определен согласно ГОСТ 12536-2014 «Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микро агрегатного состава» ареометрическим методом» [6]. Определение гранулометрического (зернового) состава глинистых грунтов ареометрическим методом производили путем измерения плотности суспензии ареометром в процессе ее отстаивания [37].

Результаты исследований физических свойств и состава пород

Таблица 30 - Результаты определения физических свойств проб горных пород

№ п/п	Номер скважины	Интервал отбора, м	Подвид	W ест. %	Пластичность				Плотность грунта ρ , г/см ³	Плотность сухого вещества ρ_d , г/см ³	Плотность минеральной части, ρ_s г/см ³	Коэф. пористости, e	Пористость, %
					Предел текучести W_L , %	Предел пластичности W_P , %	Число пластичности I_P , %	Показатель текучести, I_L , д.е.					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	ИГ-15-2	1,7-1,9	Песок	3,8	-	-	-	-	1,90	1,83	2,75	0,50	33,44
2	ИГ-15-2	5,4-5,6	Крупнообломочный	14,3	-	-	-	-	2,00	1,75	2,73	0,560	35,91
3	ИГ-15-2	6,6-6,8	Песок	16,4	-	-	-	-	2,00	1,72	2,73	0,59	37,06
4	ИГ-15-2	7,9-8,1	Крупнообломочный	12,7	15,4	11,8	3,6	0,25	2,22	1,97	2,71	0,38	27,31
5	ИГ-15-2	13,3-13,5	Супесь	18,7	16,3	11,5	4,8	1,50	2,14	1,80	2,73	0,51	33,96
6	ИГ-15-2	15,0-15,2	Супесь	13,1	21,1	15,3	5,8	-0,38	2,26	2,00	2,78	0,39	28,12
7	ИГ-15-2	15,7-16,0	Супесь	20,0	14,3	11,4	2,9	2,97	2,11	1,76	2,74	0,56	35,83
8	ИГ-15-2	16,1-16,3	Супесь	11,6	14,7	11,9	2,8	-0,11	2,28	2,04	2,74	0,34	25,44
9	ИГ-15-2	17,3-17,5	Песок	7,8	-	-	-	-	1,90	1,76	2,76	0,57	36,14
10	ИГ-15-2	18,4-18,6	Супесь	11,8	15,3	12,4	2,9	-0,21	2,28	2,04	2,75	0,35	25,84
11	ИГ-15-2	19,8-20,0	Супесь	16,9	16,6	13,6	3,0	1,10	2,12	1,81	2,73	0,51	33,57
12	ИГ-15-2	29,8-30,0	Гранито-гнейс	0,12	-	-	-	-	2,67	2,67	2,76	0,04	3,38
13	ИГ-15-3	1,0-1,2	Супесь	10,7	14,3	11,2	3,1	-0,16	2,29	2,07	2,74	0,33	24,50
14	ИГ-15-3	3,5-3,7	Песок	7,2	-	-	-	-	2,29	2,14	2,73	0,28	21,75
15	ИГ-15-3	6,4-6,6	Крупнообломочный	5,8	-	-	-	-	1,85	1,75	2,72	0,56	35,71
16	ИГ-15-3	10,0-10,2	Гнейсо-гранит	0,08	-	-	-	-	2,66	2,66	2,69	0,01	1,19
17	ИГ-18-2	1,12-1,32	Песок	4,4	-	-	-	-	1,80	1,72	2,74	0,59	37,08
18	ИГ-18-2	1,32-1,52	Песок	6,0	-	-	-	-	1,80	1,70	2,74	0,61	38,03
19	ИГ-18-2	3,2-3,4	Песок	8,5	-	-	-	-	1,84	1,70	2,75	0,62	38,33
20	ИГ-18-2	5,9-6,1	Песок	8,0	-	-	-	-	1,86	1,72	2,75	0,60	37,37
21	ИГ-18-2	9,0-9,2	Песок	20,8	-	-	-	-	2,10	1,74	2,74	0,58	36,55
22	ИГ-18-2	10,9-11,2	Супесь	10,9	14,9	12,4	2,5	-0,60	2,28	2,06	2,73	0,33	24,69
23	ИГ-18-2	12,2-12,4	Песок	12,2	-	-	-	-	2,23	1,99	2,76	0,39	27,99
24	ИГ-18-2	16,7-16,9	Песок	17,7	-	-	-	-	1,92	1,63	2,72	0,67	40,03
25	ИГ-18-2	19,0-19,2	Песок	17,5	-	-	-	-	2,00	1,70	2,71	0,60	37,19
26	ИГ-18-2	25,5-25,7	Гранит	0,11	-	-	-	-	2,58	2,58	2,65	0,03	2,75

27	ИГ-21-2	1,3-1,5	Крупнообломочный	2,6	-	-	-	-	1,72	1,68	2,74	0,63	38,82
28	ИГ-21-2	2,1-2,3	Песок	8,1	-	-	-	-	1,81	1,67	2,73	0,63	38,67
29	ИГ-21-2	3,7-3,9	Песок	16,0	-	-	-	-	1,95	1,68	2,75	0,64	38,87
30	ИГ-21-2	5,1-5,3	Песок	8,1	-	-	-	-	1,78	1,65	2,73	0,66	39,68
31	ИГ-21-2	7,7-7,9	Супесь	8,2	16,7	13,2	0,04	-1,43	2,34	2,16	2,74	0,27	21,07
32	ИГ-21-2	9,0-9,2	Песок	10,1	-	-	-	-	1,81	1,64	2,76	0,68	40,44
33	ИГ-12-2	0,2-0,4	Песок	8,1	-	-	-	-	1,83	1,69	2,88	0,70	41,22
34	ИГ-12-2	3,2-3,4	Песок	7,7	-	-	-	-	1,83	1,70	2,74	0,61	37,99
35	ИГ-12-2	5,7-5,9	Супесь	10,2	15,1	11,3	3,8	-0,29	2,28	2,07	2,73	0,32	24,21
36	ИГ-12-2	7,3-7,5	Супесь	10,7	15,2	10,4	4,8	0,06	2,29	2,07	2,73	0,32	24,23
37	ИГ-12-2	9,2-9,4	Супесь	10,6	15,0	11,7	3,3	-0,33	2,31	2,09	2,74	0,31	23,77
38	ИГ-12-2	13,4-13,6	Супесь	11,8	16,2	13,7	2,5	-0,76	2,25	2,01	2,74	0,36	26,55
39	ИГ-12-2	23,0-23,2	Гнейсо-гранит	0,11	-	-	-	-	2,69	2,69	2,73	0,02	1,57

Таблица 31 – Наименование пород согласно ГОСТ 25100-2011 "Грунты. Классификация"

№ п/п	Номер скважины	Интервал отбора, м	Подвид	Описание породы		Наличие включений	Относительное содержание органического вещества	Консистенция	Цвет
				5	6				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	ИГ-15-2	1,7-1,9	Песок	Песок	гравелистый				коричневый
2	ИГ-15-2	5,4-5,6	Крупнообломочный	Крупнообломочный	галечниковый				коричневый
3	ИГ-15-2	6,6-6,8	Песок	Песок	гравелистый				коричневый
4	ИГ-15-2	7,9-8,1	Крупнообломочный	Крупнообломочный	галечниковый	с супесью		пластичная	коричнево-серый
5	ИГ-15-2	13,3-13,5	Супесь	Супесь	песчанистая	с включениями		текучая	коричневый
6	ИГ-15-2	15,0-15,2	Супесь	Супесь	пылеватая			твердая	коричневый
7	ИГ-15-2	15,7-16,0	Супесь	Супесь	песчанистая	с включениями		текучая	коричнево-серый
8	ИГ-15-2	16,1-16,3	Супесь	Супесь	песчанистая	с щебнем		твердая	коричневый
9	ИГ-15-2	17,3-17,5	Песок	Песок	гравелистый				коричневый
10	ИГ-15-2	18,4-18,6	Супесь	Супесь	песчанистая	с щебнем		твердая	коричневый
11	ИГ-15-2	19,8-20,0	Супесь	Супесь	песчанистая	с включениями		текучая	коричневый
12	ИГ-15-3	1,0-1,2	Супесь	Супесь	песчанистая	с щебнем		твердая	серо-коричневый
13	ИГ-15-3	3,5-3,7	Песок	Песок	средней крупности				серо-коричневый
14	ИГ-15-3	6,4-6,6	Крупнообломочный	Крупнообломочный	гравийный				коричнево-серый
15	ИГ-18-2	1,12-1,32	Песок	Песок	гравелистый				коричневый
16	ИГ-18-2	1,32-1,52	Песок	Песок	пылеватый				коричневый
17	ИГ-18-2	3,2-3,4	Песок	Песок	гравелистый				серо-коричневый
18	ИГ-18-2	5,9-6,1	Песок	Песок	гравелистый				коричневый
19	ИГ-18-2	9,0-9,2	Песок	Песок	пылеватый				серый
20	ИГ-18-2	10,9-11,2	Супесь	Супесь	песчанистая	с включениями		твердая	серый
21	ИГ-18-2	12,2-12,4	Песок	Песок	пылеватый				коричневый

22	ИГ-18-2	16,7-16,9	Песок	Песок	гравелистый										коричневый
23	ИГ-18-2	19,0-19,2	Песок	Песок	гравелистый										коричнево-серый
24	ИГ-21-2	1,3-1,5	Крупнообломочный	Крупнообломочный	гравийный										коричневый
25	ИГ-21-2	2,1-2,3	Песок	Песок	гравелистый										коричневый
26	ИГ-21-2	3,7-3,9	Песок	Песок	средней крупности										коричневый
27	ИГ-21-2	5,1-5,3	Песок	Песок	гравелистый										коричневый
28	ИГ-21-2	7,7-7,9	Супесь	Супесь	песчанистая	с включениями						твердая			коричневый
29	ИГ-21-2	9,0-9,2	Песок	Песок	средней крупности										коричневый
30	ИГ-12-2	0,2-0,4	Песок	Песок	средней крупности					0,23					темно- коричневый
31	ИГ-12-2	3,2-3,4	Песок	Песок	пылеватый										коричневый
32	ИГ-12-2	5,7-5,9	Супесь	Супесь	песчанистая	с щебнем						твердая			коричневый
33	ИГ-12-2	7,3-7,5	Супесь	Супесь	пылеватая	щебенистая						пластичная			коричневый
34	ИГ-12-2	9,2-9,4	Супесь	Супесь	песчанистая	с щебнем						твердая			коричневый
35	ИГ-12-2	13,4-13,6	Супесь	Супесь	песчанистая	с включениями						твердая			коричневый

Таблица 32 – Результаты определения гранулометрического состава пород

№ п/п	Номер скважины	Интервал отбора, м	Подвид	Гранулометрический состав в % по фракциям в мм											
				>25	25-10	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	0,01-0,002	< 0,002
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	ИГ-15-2	1,7-1,9	Песок	15,3	5,3	11,9	5,9	6,2	7,8	8,7	16,9	10,5	8,6	1,5	1,5
2	ИГ-15-2	5,4-5,6	Крупнообломочный	50,3	10,4	8,5	3,7	3,5	4,0	4,0	6,7	3,3	4,2	0,9	0,5
3	ИГ-15-2	6,6-6,8	Песок	0,0	5,8	16,8	19,1	16,3	9,2	7,4	11,5	4,9	6,2	1,2	1,6
4	ИГ-15-2	7,9-8,1	Крупнообломочный	37,8	12,6	6,9	5,2	5,8	5,7	5,6	8,9	4,8	4,7	1,2	0,8
5	ИГ-15-2	13,3-13,5	Супесь	0,0	0,0	6,5	5,1	7,2	8,6	10,2	16,3	22,8	13,6	5,0	4,7
6	ИГ-15-2	15,0-15,2	Супесь	0,0	0,0	1,3	0,4	0,6	1,1	1,4	4,8	23,0	44,5	14,6	8,4
7	ИГ-15-2	15,7-16,0	Супесь	0,0	0,0	2,9	9,6	8,1	10,9	13,1	19,1	15,2	14,4	4,1	2,7
8	ИГ-15-2	16,1-16,3	Супесь	0,0	10,4	1,9	7,2	6,8	8,5	10,4	17,3	19,7	11,9	3,6	2,4
9	ИГ-15-2	17,3-17,5	Песок	19,8	5,0	10,7	6,5	6,5	9,3	13,7	15,0	5,9	5,3	1,3	1,0
10	ИГ-15-2	18,4-18,6	Супесь	0,0	16,2	3,3	5,5	5,1	6,9	8,9	14,4	20,1	12,4	3,3	3,9
11	ИГ-15-2	19,8-20,0	Супесь	0,0	0,0	7,5	2,7	4,6	7,6	10,0	15,1	15,5	19,4	7,8	9,9

12	ИГ-15-3	1,0-1,2	Супесь	0,0	0,0	8,6	7,3	9,2	9,6	11,1	15,4	19,5	13,8	3,7	1,9
13	ИГ-15-3	3,5-3,7	Песок	0,0	4,2	10,6	9,4	10,5	14,6	12,2	12,8	9,4	12,7	2,1	1,6
14	ИГ-15-3	6,4-6,6	Крупнообломочный	26,4	11,9	10,6	4,3	4,9	7,0	8,4	12,6	5,0	6,8	1,1	0,9
15	ИГ-18-2	1,12-1,32	Песок	11,5	5,5	8,5	6,7	8,4	7,6	7,5	21,0	7,3	9,3	3,1	3,6
16	ИГ-18-2	1,32-1,52	Песок	0,0	4,0	7,0	6,2	6,5	7,9	10,2	30,5	10,3	12,6	2,6	2,1
17	ИГ-18-2	3,2-3,4	Песок	9,6	2,7	6,7	6,5	6,8	9,3	10,9	18,6	11,5	12,3	3,4	1,7
18	ИГ-18-2	5,9-6,1	Песок	22,1	5,6	7,5	5,3	5,3	7,2	8,6	14,7	9,3	10,1	2,7	1,6
19	ИГ-18-2	9,0-9,2	Песок	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	4,0	55,5	29,4	9,4	0,9	0,9
20	ИГ-18-2	10,9-11,2	Супесь	0,0	0,0	3,7	8,0	7,0	10,1	13,5	19,0	21,0	12,2	3,4	2,0
21	ИГ-18-2	12,2-12,4	Песок	0,0	0,0	1,6	5,8	6,1	9,6	13,5	20,5	23,5	10,7	7,7	1,0
22	ИГ-18-2	16,7-16,9	Песок	0,0	18,7	7,7	6,1	9,5	7,2	8,5	34,6	2,9	2,8	1,0	0,9
23	ИГ-18-2	19,0-19,2	Песок	0,0	13,4	17,9	11,6	10,0	11,7	8,4	12,3	4,2	6,1	2,2	2,2
24	ИГ-21-2	1,3-1,5	Крупнообломочный	30,1	4,1	12,6	7,9	8,2	6,8	6,4	12,6	3,3	5,2	1,7	0,9
25	ИГ-21-2	2,1-2,3	Песок	0,0	8,2	10,3	7,7	7,8	9,7	10,3	18,2	10,6	12,8	2,6	1,9
26	ИГ-21-2	3,7-3,9	Песок	0,0	7,7	0,0	9,5	8,1	11,6	13,3	17,7	15,1	13,2	1,5	2,3
27	ИГ-21-2	5,1-5,3	Песок	7,8	12,8	14,2	10,7	10,6	11,4	9,5	10,0	5,5	5,5	1,1	0,8
28	ИГ-21-2	7,7-7,9	Супесь	0,0	0,0	2,1	9,9	6,2	9,0	11,8	17,2	23,9	13,9	3,3	2,6
29	ИГ-21-2	9,0-9,2	Песок	0,0	2,2	8,7	10,9	12,2	15,2	16,5	17,9	8,1	6,4	0,7	1,1
30	ИГ-12-2	0,2-0,4	Песок	0,0	0,0	1,5	14,4	18,4	12,3	9,0	19,4	12,1	11,8	0,6	0,6
31	ИГ-12-2	3,2-3,4	Песок	0,0	5,8	7,4	6,4	6,7	9,8	11,9	22,2	8,3	13,2	3,8	4,4
32	ИГ-12-2	5,7-5,9	Супесь	0,0	5,9	2,9	7,0	5,8	8,0	10,1	14,5	22,0	13,6	5,8	4,4
33	ИГ-12-2	7,3-7,5	Супесь	0,0	28,6	3,3	4,9	5,3	6,8	8,0	11,5	17,7	7,9	5,3	0,7
34	ИГ-12-2	9,2-9,4	Супесь	0,0	0,0	6,3	9,3	6,9	9,1	10,5	15,3	22,2	14,7	3,5	2,4
35	ИГ-12-2	13,4-13,6	Супесь	0,0	0,0	2,2	2,9	4,6	7,5	8,8	15,1	20,6	18,1	7,9	12,1

Предел прочности горных пород при одноосном сжатии σ_c определяли в соответствии с ГОСТ 21153.2-84 [9].

Деформационные характеристики при одноосном сжатии определялись в соответствии с ГОСТ 28985-91 [12]. Испытания проводились на сервогидравлической испытательной машине MTS 816.

Показатели прочности горных пород при срезе со сжатием (нормальные и сдвиговые компоненты нагрузки) определены методом косого среза в соответствии с ГОСТ 21153.5-88 [10].

Результаты исследований механических свойств

Таблица 33 - Результаты определения прочностных и деформационных характеристик при одноосном сжатии

№ п/п	Номер скважины	Интервал отбора, м	Литотип	Естественная плотность, г/см ³	Модуль упругости, ГПа	Модуль деформации, ГПа	Коэффициент Пуассона	Предел прочности при одноосном сжатии, МПа	
								частное	среднее
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	ИГ 12-2	23,0-23,2	Гнейсогранит	2,631	34,67	21,78	0,22	72,06	46,00
2	ИГ 12-2	23,0-23,2	Гнейсогранит	2,732	23,25	12,61	0,24	29,97	
3	ИГ 12-2	23,0-23,2	Гнейсогранит	2,625	25,15	19,98	0,22	35,96	
4	ИГ 15-2	29,8-30,0	Гранито-гнейс	2,673	33,53	27,55	0,21	84,26	69,89
5	ИГ 15-2	29,8-30,0	Гранито-гнейс	2,629	22,97	17,82	0,2	61,63	
6	ИГ 15-2	29,8-30,0	Гранито-гнейс	2,624	28,3	21,8	0,22	63,78	
7	ИГ 18-2	25,5-25,7	Гранит	2,581	31,6	24,46	0,25	80,26	54,16
8	ИГ 18-2	25,5-25,7	Гранит	2,578	22,89	13,67	0,4	28,06	
9	ИГ-21-2	14,5-14,7	Габбро-диабаз	3,067	57,37	50,64	0,16	227,28	227,28

Таблица 34 - Результаты испытания образцов при косом срезе

№ п/п	Номер скважины	Интервал отбора, м	Литотип	Естественная плотность, г/см ³	Угол между плоскостью среза и осевой нагрузкой, град	Нормальное напряжение σ_n , МПа		Предельное касательное напряжение τ , МПа		Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, °
						частное	среднее	частное	среднее		
1	ИГ 15-3	10,0-10,2	Гнейсогранит	2,612	25	16,90	16,45	36,24	35,29	27,76	32,23
2	ИГ 15-3	10,0-10,2	Гнейсогранит	2,440	25	15,61		33,48			
3	ИГ 15-3	10,0-10,2	Гнейсогранит	2,470	25	16,85		36,14			
4	ИГ 15-3	10,0-10,2	Гнейсогранит	2,562	35	42,24	41,94	60,32	59,89		
5	ИГ 15-3	10,0-10,2	Гнейсогранит	2,489	35	36,17		51,65			
6	ИГ 15-3	10,0-10,2	Гнейсогранит	2,620	35	47,40		67,70			
7	ИГ 15-3	10,0-10,2	Гнейсогранит	2,430	45	65,33	67,42	65,33	67,42		
8	ИГ 15-3	10,0-10,2	Гнейсогранит	2,587	45	69,50		69,50			

Таблица 35 - Результаты испытаний образцов на консолидированно-дренированный сдвиг

№ п/п	Номер скважины	Интервал отбора, м	Подвид	1-ая ступень		2-ая ступень		3-ая ступень		Сцепление, кПа	Угол внутреннего трения, град
				Вертикальное давление при сдвиге, σ , кПа	Сдвигающее давление, τ , кПа	Вертикальное давление при сдвиге, σ , кПа	Сдвигающее давление, τ , кПа	Вертикальное давление при сдвиге, σ , кПа	Сдвигающее давление, τ , кПа		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	ИГ-15-2	1,7-1,9	Песок	100	104,0	200	183,0	300	254,7	29,87	37,00
2	ИГ-15-2	5,4-5,6	Крупнообломочный	100	104,0	200	165,0	300	238,0	35,00	33,82
3	ИГ-15-2	6,6-6,8	Песок	100	146,0	200	240,3	300	334,5	51,77	43,30
4	ИГ-15-2	7,9-8,1	Крупнообломочный	100	95,6	200	170,3	300	241,3	23,37	36,07
5	ИГ-15-2	13,3-13,5	Супесь	100	68,4	150	102,9	200	130,0	8,03	31,63
6	ИГ-15-2	15,0-15,2	Супесь	100	91,9	200	175,0	300	219,8	34,33	32,60
7	ИГ-15-2	15,7-16,0	Супесь	100	116,5	150	131,0	200	170,0	58,92	28,15
8	ИГ-15-2	16,1-16,3	Супесь	100	132,8	200	181,4	300	261,3	63,33	32,72
9	ИГ-15-2	17,3-17,5	Песок	100	107,3	200	202,3	300	303,5	8,17	44,45
10	ИГ-15-2	18,4-18,6	Супесь	100	119,9	200	201,2	300	265,1	50,20	35,98
11	ИГ-15-2	19,8-20,0	Супесь	100	70,7	150	96,0	200	125,9	14,73	28,90
12	ИГ-15-3	1,0-1,2	Супесь	100	133,6	200	203,9	300	260,7	72,30	32,44
13	ИГ-15-3	3,5-3,7	Песок	100	95,0	200	173,2	300	225,6	34,00	33,14
14	ИГ-15-3	6,4-6,6	Крупнообломочный	100	103,1	200	204,5	300	275,1	22,23	40,70
15	ИГ-18-2	1,12-1,32	Песок	100	91,4	200	171,6	300	245,1	15,67	37,54
16	ИГ-18-2	1,32-1,52	Песок	100	77,5	200	168,3	300	228,9	6,83	37,13
17	ИГ-18-2	3,2-3,4	Песок	100	101,2	200	201,1	300	287,5	10,30	42,97
18	ИГ-18-2	5,9-6,1	Песок	100	117,4	200	197,3	300	271,6	41,23	37,63
19	ИГ-18-2	9,0-9,2	Песок	100	84,2	200	160,3	300	239,8	5,83	37,88
20	ИГ-18-2	10,9-11,2	Супесь	100	104,6	200	169,2	300	246,3	31,67	35,32
21	ИГ-18-2	12,2-12,4	Песок	100	94,0	200	160,9	300	222,9	30,37	32,80
22	ИГ-18-2	16,7-16,9	Песок	100	104,2	200	189,6	300	266,7	24,33	39,09
23	ИГ-18-2	19,0-19,2	Песок	100	96,0	200	169,0	300	249,9	17,73	37,58
24	ИГ-21-2	1,3-1,5	Крупнообломочный	100	101,0	200	173,9	300	264,2	16,50	39,21
25	ИГ-21-2	2,1-2,3	Песок	100	89,9	200	187,6	300	259,9	9,13	40,36
26	ИГ-21-2	3,7-3,9	Песок	100	81,8	200	163,6	300	240,1	3,53	38,36
27	ИГ-21-2	5,1-5,3	Песок	100	96,9	200	182,8	300	271,8	8,93	41,17
28	ИГ-21-2	7,7-7,9	Супесь	100	111,0	200	189,1	300	229,8	57,83	30,71

29	ИГ-21-2	9,0-9,2	Песок	100	102,9	200	184,1	300	250,7	31,43	36,46
30	ИГ-12-2	0,2-0,4	Песок	100	95,6	200	172,4	300	246,7	20,47	37,07
31	ИГ-12-2	3,2-3,4	Песок	100	88,1	200	174,1	300	229,9	22,23	35,34
32	ИГ-12-2	5,7-5,9	Супесь	100	135,7	200	197,9	300	261,2	72,77	32,11
33	ИГ-12-2	7,3-7,5	Супесь	100	128,6	200	201,7	300	259,7	65,57	33,24
34	ИГ-12-2	9,2-9,4	Супесь	100	133,1	200	207,1	300	260,0	73,17	32,40
35	ИГ-12-2	13,4-13,6	Супесь	100	135,4	200	200,5	300	254,4	77,77	30,75

Таблица 36 - Результаты испытаний образцов на компрессионное сжатие

№ п/п	Номер скважины	Интервал отбора, м	Подвид	β	1-ый диапазон давлений				2-ой диапазон давлений				3-ий диапазон давлений				4-ый диапазон давлений				5-ый диапазон давлений			
					Давление, МПа	m_o , МПа ⁻¹	E_k , МПа	E_{oed} , МПа	Давление, МПа	m_o , МПа ⁻¹	E_k , МПа	E_{oed} , МПа	Давление, МПа	m_o , МПа ⁻¹	E_k , МПа	E_{oed} , МПа	Давление, МПа	m_o , МПа ⁻¹	E_k , МПа	E_{oed} , МПа	Давление, МПа	m_o , МПа ⁻¹	E_k , МПа	E_{oed} , МПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	ИГ-15-2	1,7-1,9	Песок	0,8	от 0,1 до 0,2	0,123	9,8	12,2	от 0,2 до 0,3	0,074	16,3	20,4	от 0,3 до 0,4	0,062	19,5	24,4	от 0,4 до 0,5	0,059	20,3	25,3	от 0,5 до 0,6	0,048	25,0	31,2
2	ИГ-15-2	5,4-5,6	Крупнообломочный	0,8	от 0,1 до 0,2	0,111	11,3	14,1	от 0,2 до 0,3	0,075	16,7	20,8	от 0,3 до 0,4	0,064	19,5	24,4	от 0,4 до 0,5	0,054	23,2	29,0	от 0,5 до 0,6	0,046	27,1	33,9
3	ИГ-15-2	6,6-6,8	Песок	0,8	от 0,1 до 0,2	0,131	9,7	12,1	от 0,2 до 0,3	0,091	14,0	17,5	от 0,3 до 0,4	0,076	16,7	20,8	от 0,4 до 0,5	0,063	20,3	25,3	от 0,5 до 0,6	0,049	25,8	32,3
4	ИГ-15-2	7,9-8,1	Крупнообломочный	0,7	от 0,1 до 0,2	0,062	15,6	22,2	от 0,2 до 0,3	0,051	18,9	27,0	от 0,3 до 0,4	0,034	28,0	40,0	от 0,4 до 0,5	0,033	29,2	41,7	от 0,5 до 0,6	0,029	33,3	47,6
5	ИГ-15-2	13,3-13,5	Супесь	0,7	от 0,1 до 0,2	0,218	4,9	6,9	от 0,2 до 0,3	0,148	7,2	10,3	от 0,3 до 0,4	0,124	8,5	12,2	от 0,4 до 0,5	0,076	14,0	20,0	от 0,5 до 0,6	0,061	17,5	25,0
6	ИГ-15-2	15,0-15,2	Супесь	0,7	от 0,1 до 0,2	0,097	10,1	14,4	от 0,2 до 0,3	0,068	14,3	20,4	от 0,3 до 0,4	0,044	22,2	31,7	от 0,4 до 0,5	0,038	25,5	36,4	от 0,5 до 0,6	0,031	31,8	45,5
7	ИГ-15-2	15,7-16,0	Супесь	0,7	от 0,1 до 0,2	0,119	9,2	13,1	от 0,2 до 0,3	0,065	16,9	24,1	от 0,3 до 0,4	0,042	25,9	37,0	от 0,4 до 0,5	0,037	29,2	41,7	от 0,5 до 0,6	0,033	33,3	47,6
8	ИГ-15-2	16,1-16,3	Супесь	0,7	от 0,1 до 0,2	0,104	9,0	12,9	от 0,2 до 0,3	0,066	14,3	20,4	от 0,3 до 0,4	0,050	18,7	26,7	от 0,4 до 0,5	0,043	21,9	31,2	от 0,5 до 0,6	0,036	25,9	37,0
9	ИГ-15-2	17,3-17,5	Песок	0,8	от 0,1 до 0,2	0,117	10,7	13,4	от 0,2 до 0,3	0,084	15,0	18,7	от 0,3 до 0,4	0,061	20,5	25,6	от 0,4 до 0,5	0,052	24,2	30,3	от 0,5 до 0,6	0,039	32,0	40,0
10	ИГ-15-2	18,4-18,6	Супесь	0,7	от 0,1 до 0,2	0,108	8,7	12,5	от 0,2 до 0,3	0,072	13,2	18,9	от 0,3 до 0,4	0,055	17,1	24,4	от 0,4 до 0,5	0,044	21,5	30,8	от 0,5 до 0,6	0,039	24,1	34,5
11	ИГ-15-3	19,8-20,0	Супесь	0,7	от 0,1 до 0,2	0,178	5,9	8,5	от 0,2 до 0,3	0,1152	9,2	13,1	от 0,3 до 0,4	0,082	12,8	18,3	от 0,4 до 0,5	0,071	14,9	21,3	от 0,5 до 0,6	0,059	17,9	25,6
12	ИГ-15-3	1,0-1,2	Супесь	0,7	от 0,1 до 0,2	0,105	8,8	12,6	от 0,2 до 0,3	0,092	10,1	14,4	от 0,3 до 0,4	0,070	13,3	19,0	от 0,4 до 0,5	0,063	14,7	21,1	от 0,5 до 0,6	0,045	20,6	29,4
13	ИГ-15-3	3,5-3,7	Песок	0,8	от 0,1 до 0,2	0,104	9,9	12,3	от 0,2 до 0,3	0,082	12,4	15,5	от 0,3 до 0,4	0,065	15,8	19,8	от 0,4 до 0,5	0,057	18,0	22,5	от 0,5 до 0,6	0,043	23,9	29,9

14	ИГ-15-3	6,4-6,6	Крупно обломочный	0,8	от 0,1 до 0,2	0,120	10,4	12,9	от 0,2 до 0,3	0,097	12,8	16,0	от 0,3 до 0,4	0,065	19,3	24,1	от 0,4 до 0,5	0,049	25,4	31,7	от 0,5 до 0,6	0,042	29,6	37,0
15	ИГ-18-2	1,12-1,32	Песок	0,8	от 0,1 до 0,2	0,157	8,1	10,2	от 0,2 до 0,3	0,096	13,2	16,5	от 0,3 до 0,4	0,064	20,0	25,0	от 0,4 до 0,5	0,056	22,9	28,6	от 0,5 до 0,6	0,052	24,2	30,3
16	ИГ-18-2	1,32-1,52	Песок	0,8	от 0,1 до 0,2	0,103	12,5	15,6	от 0,2 до 0,3	0,078	16,5	20,6	от 0,3 до 0,4	0,052	24,6	30,8	от 0,4 до 0,5	0,036	36,4	45,5	от 0,5 до 0,6	0,034	38,1	47,6
17	ИГ-18-2	3,2-3,4	Песок	0,8	от 0,1 до 0,2	0,080	16,2	20,2	от 0,2 до 0,3	0,065	20,0	25,0	от 0,3 до 0,4	0,049	26,7	33,3	от 0,4 до 0,5	0,045	29,1	36,4	от 0,5 до 0,6	0,037	34,8	43,5
18	ИГ-18-2	5,9-6,1	Песок	0,8	от 0,1 до 0,2	0,114	11,2	14,0	от 0,2 до 0,3	0,082	15,7	19,6	от 0,3 до 0,4	0,057	22,5	28,2	от 0,4 до 0,5	0,048	26,7	33,3	от 0,5 до 0,6	0,036	35,6	44,4
19	ИГ-18-2	9,0-9,2	Песок	0,8	от 0,1 до 0,2	0,066	19,0	23,8	от 0,2 до 0,3	0,058	21,9	27,4	от 0,3 до 0,4	0,049	25,8	32,3	от 0,4 до 0,5	0,042	30,2	37,7	от 0,5 до 0,6	0,036	34,8	43,5
20	ИГ-18-2	10,9-11,2	Супесь	0,7	от 0,1 до 0,2	0,090	10,4	14,8	от 0,2 до 0,3	0,064	14,6	20,8	от 0,3 до 0,4	0,045	20,9	29,9	от 0,4 до 0,5	0,037	25,5	36,4	от 0,5 до 0,6	0,027	34,1	48,8
21	ИГ-18-2	12,2-12,4	Песок	0,8	от 0,1 до 0,2	0,080	13,9	17,4	от 0,2 до 0,3	0,058	19,0	23,8	от 0,3 до 0,4	0,041	27,1	33,9	от 0,4 до 0,5	0,038	29,6	37,0	от 0,5 до 0,6	0,031	36,4	45,5
22	ИГ-18-2	16,7-16,9	Песок	0,8	от 0,1 до 0,2	0,104	12,8	16,0	от 0,2 до 0,3	0,078	17,2	21,5	от 0,3 до 0,4	0,055	24,2	30,3	от 0,4 до 0,5	0,049	27,1	33,9	от 0,5 до 0,6	0,039	34,0	42,6
23	ИГ-18-2	19,0-19,2	Песок	0,8	от 0,1 до 0,2	0,139	9,2	11,5	от 0,2 до 0,3	0,101	12,6	15,7	от 0,3 до 0,4	0,069	18,6	23,3	от 0,4 до 0,5	0,045	28,1	35,1	от 0,5 до 0,6	0,033	38,1	47,6
24	ИГ-21-2	1,3-1,5	Крупно обломочный	0,8	от 0,1 до 0,2	0,160	8,2	10,2	от 0,2 до 0,3	0,105	12,4	15,5	от 0,3 до 0,4	0,092	14,3	17,9	от 0,4 до 0,5	0,070	18,8	23,5	от 0,5 до 0,6	0,062	21,1	26,3
25	ИГ-21-2	2,1-2,3	Песок	0,8	от 0,1 до 0,2	0,130	10,1	12,6	от 0,2 до 0,3	0,104	12,5	15,6	от 0,3 до 0,4	0,095	13,8	17,2	от 0,4 до 0,5	0,088	14,8	18,5	от 0,5 до 0,6	0,068	19,3	24,1
26	ИГ-21-2	3,7-3,9	Песок	0,8	от 0,1 до 0,2	0,096	13,7	17,1	от 0,2 до 0,3	0,079	16,5	20,6	от 0,3 до 0,4	0,053	24,6	30,8	от 0,4 до 0,5	0,043	30,2	37,7	от 0,5 до 0,6	0,033	40,0	50,0
27	ИГ-21-2	5,1-5,3	Песок	0,8	от 0,1 до 0,2	0,128	10,4	13,0	от 0,2 до 0,3	0,094	14,2	17,7	от 0,3 до 0,4	0,079	16,8	21,1	от 0,4 до 0,5	0,065	20,5	25,6	от 0,5 до 0,6	0,058	22,9	28,6
28	ИГ-21-2	7,7-7,9	Супесь	0,7	от 0,1 до 0,2	0,093	9,5	13,6	от 0,2 до 0,3	0,071	12,5	17,9	от 0,3 до 0,4	0,057	15,6	22,2	от 0,4 до 0,5	0,044	20,3	29,0	от 0,5 до 0,6	0,039	23,0	32,8
29	ИГ-21-2	9,0-9,2	Песок	0,8	от 0,1 до 0,2	0,200	6,7	8,4	от 0,2 до 0,3	0,165	8,1	10,2	от 0,3 до 0,4	0,118	11,3	14,2	от 0,4 до 0,5	0,108	12,4	15,5	от 0,5 до 0,6	0,088	15,2	19,0
30	ИГ-12-2	0,2-0,4	Песок	0,8	от 0,1 до 0,2	0,178	7,7	9,6	от 0,2 до 0,3	0,145	9,4	11,8	от 0,3 до 0,4	0,124	11,0	13,7	от 0,4 до 0,5	0,110	12,4	15,5	от 0,5 до 0,6	0,086	15,8	19,8
31	ИГ-12-2	3,2-3,4	Песок	0,8	от 0,1 до 0,2	0,182	7,1	8,8	от 0,2 до 0,3	0,136	9,5	11,9	от 0,3 до 0,4	0,109	11,9	14,8	от 0,4 до 0,5	0,091	14,2	17,7	от 0,5 до 0,6	0,055	23,5	29,4
32	ИГ-12-2	5,7-5,9	Супесь	0,7	от 0,1 до 0,2	0,091	10,1	14,5	от 0,2 до 0,3	0,087	10,6	15,2	от 0,3 до 0,4	0,073	12,6	18,0	от 0,4 до 0,5	0,062	14,9	21,3	от 0,5 до 0,6	0,044	21,1	30,1
33	ИГ-12-2	7,3-7,5	Супесь	0,7	от 0,1 до 0,2	0,116	8,0	11,4	от 0,2 до 0,3	0,071	13,0	18,5	от 0,3 до 0,4	0,048	19,4	27,8	от 0,4 до 0,5	0,040	23,0	32,8	от 0,5 до 0,6	0,034	27,5	39,2
34	ИГ-12-2	9,2-9,4	Супесь	0,7	от 0,1 до 0,2	0,095	9,7	13,8	от 0,2 до 0,3	0,066	14,0	20,0	от 0,3 до 0,4	0,049	18,9	27,0	от 0,4 до 0,5	0,041	22,6	32,3	от 0,5 до 0,6	0,035	25,9	37,0
35	ИГ-12-2	13,4-13,6	Супесь	0,7	от 0,1 до 0,2	0,127	7,5	10,7	от 0,2 до 0,3	0,079	12,1	17,2	от 0,3 до 0,4	0,055	17,3	24,7	от 0,4 до 0,5	0,048	19,7	28,2	от 0,5 до 0,6	0,040	24,1	34,5

Обоснование выбора свойств для выполнения расчета устойчивости

Статистическая обработка данных лабораторных исследований проведена для случаев, в которых количество испытаний ≥ 5 , в обратных случаях были взяты средние значения.

По результатам статистической обработки составлена сводная таблица расчетных физико-механических характеристик грунтов плотины (табл. 35), значения которой будут использованы для выполнения расчета устойчивости плотины.

Таблица 37 – Сводная таблица расчетных физико-механических характеристик грунтов основания и сооружения плотины

№ ИГЭ	Название грунта	Удельный вес грунта	Удельный вес взвеш. Грунта	Модуль деформации	Коэффициент Пуассона	Сцепление	Угол внутреннего трения	Коэффициент фильтрации
		$\gamma_{uns}, \text{кН/м}^3$	$\gamma_s, \text{кН/м}^3$	E, Мпа	ν	c, кПа	ϕ , град.	Кф, м/сут
Грунты тела плотины, хвосты								
3	Насыпной грунт песок мелкий средней плотности средней степени водонасыщения	19,20	11,02	15,94	0,30	3	34	1,17
4	Насыпной грунт песок мелкий средней плотности водонасыщенный	19,81	11,55	18,31	0,31	4	36	1,11
4а	Насыпной грунт: песок коричневого цвета, гравелистый	18,32	10,63	-	-	11	39	-
6	Насыпной грунт песок средней крупности средней плотности водонасыщенный	20,41	11,14	21,25	0,26	2	35	1,41
7	Насыпной грунт песок крупной средней плотности водонасыщенный	20,20	10,90	23,01	0,27	10	37	2,56
9	Насыпной грунт супесь пылеватая/песчаная текучая	18,03	9,29	10,30	0,34	8	25	0,12
9а	Насыпной грунт: супесь песчаная, твердая	22,90	13,08	-	-	72	32	-
9б	Насыпной грунт: супесь песчаная, пластичная	22,93	13,16	-	-	70	33	-
9в	Насыпной грунт: супесь пылеватая/песчаная, текучая	21,98	12,05	-	-	41	31	-
10	Насыпной грунт супесь с дресвой твердая, дресвы до 25%	19,50	11,39	14,83	0,31	10	28	0,18
11	Насыпной грунт дресвяный грунт с песчаным заполнителем, заполнителя до 45%	20,20	11,76	39,72	0,21	10	36	15,32
Грунты основания								
16а	Песок гравелистый, водонасыщенный	20,90	10,98	-	-	-	-	-
17	Супесь дресвяная пластичная, дресвы до 50%	21,14	11,85	23,05	0,32	4	16	0,24
17б	Супесь песчаная, текучая	21,48	12,21	-	-	27	36	
18	Дресвяный грунт с песчаным заполнителем, заполнителя до 50 %	20,50	11,26	41,04	0,21	9	27	15,39
19	Гранито-грейс очень прочный	26,40	17,29	20000	0,27	100	35	-
19б	Габбро-диабаз плотный	30,67	19,62	50640	0,16	-	-	-

3.5. Гидрогеологические условия

В общей схеме гидрогеологического районирования территория исследований относится к Балтийскому бассейну трещинных вод; основной водоносный комплекс, имеющий повсеместное распространение, приурочен к верхней трещиноватой зоне кристаллического массива.

Водоносный горизонт четвертичных отложений включает в себя воды ледниковых и торфяных отложений, которые, в основном, приурочены к слабодренированным впадинам [44].

Данные замеров уровней подземных вод в пройденных выработках по расчетным створам приводятся ниже (см. таблицу 38).

Таблица 38 – Замеренные уровни подземных вод в пройденных выработках

Номер скважины Высотная отметка устья, м	Уровень подземных вод, м	
	Появившийся уровень, м Высотная отм., м	Установившийся уровень, м Высотная отм., м
<u>Скв.1</u> 180,84	<u>0,30</u> 180,54	<u>0,30</u> 180,54
<u>Скв.2</u> 182,01	<u>9,80</u> 172,21	<u>9,80</u> 172,21
<u>Скв.3</u> 176,62	<u>0,70</u> 175,92	<u>0,70</u> 175,92
<u>Скв.4</u> 180,91	<u>0,40</u> 180,51	<u>0,40</u> 180,51
<u>Скв.5</u> 182,30	<u>9,90</u> 172,40	<u>9,90</u> 172,40
<u>Скв.6</u> 172,39	<u>1,00</u> 171,39	<u>1,00</u> 171,39
<u>Скв.7</u> 180,76	<u>0,40</u> 180,36	<u>0,40</u> 180,36
<u>Скв.8</u> 182,62	<u>11,30</u> 171,32	<u>11,30</u> 171,32
<u>Скв.9</u> 172,43	<u>0,90</u> 171,53	<u>0,90</u> 171,53
<u>Скв.10</u> 180,74	<u>0,60</u> 180,14	<u>0,60</u> 180,14
<u>Скв.11</u> 182,52	<u>13,30</u> 169,22	<u>13,30</u> 169,22
<u>Скв.12</u> 172,87	<u>3,60</u> 169,27	<u>3,60</u> 169,27
<u>Скв.13</u> 181,21	<u>0,30</u> 180,91	<u>0,30</u> 180,91
<u>Скв.14</u> 182,37	<u>12,70</u> 169,67	<u>12,70</u> 169,67
<u>Скв.15</u> 172,49	<u>2,90</u> 169,59	<u>2,90</u> 169,59
<u>Скв.16</u>	<u>0,20</u>	<u>0,20</u>

180,81	180,61	180,61
<u>Скв.17</u>	<u>13,00</u>	<u>13,00</u>
182,82	169,82	169,82
<u>Скв.18</u>	<u>2,00</u>	<u>2,00</u>
164,03	162,03	162,03
<u>Скв.19</u>	<u>0,50</u>	<u>0,50</u>
180,62	180,12	180,12
<u>Скв.20</u>	<u>13,80</u>	<u>13,80</u>
181,49	167,69	167,69
<u>Скв.21</u>	<u>3,00</u>	<u>3,00</u>
172,53	169,53	169,53

Водовмещающими грунтами являются техногенные четвертичные отложения, представленные насыпными грунтами (пески пылеватые, мелкие, средней крупности и крупные, супеси пластичные и текучие), биогенные отложения (торф сильноразложившийся), верхневалдайские ледниковые отложения (дресвяный грунт с песчаным наполнителем и щебенистый грунт).

В гидрогеологическом отношении на участке работ, в пределах исследуемых глубин до 50,2 м, подземные воды вскрыты всеми скважинами. Появившийся и установившийся уровни были отмечены на глубине от 0,20 до 14,3 м. Водоносный горизонт является безнапорным [39].

Питание грунтовых вод осуществляется преимущественно за счет поступления воды из пульпопроводов, притока из нижележащих водоносных горизонтов, а также за счет инфильтрации атмосферных осадков. Уровень грунтовых вод зависит от объемов подаваемой воды из пульпопроводов.

На участке изысканий было отобрано 49 проб воды. По химическому составу подземные воды гидрокарбонатные кальциево-железистые, гидрокарбонатные железисто-кальциевые, гидрокарбонатно-сульфатные натриево-калиевые, гидрокарбонатно-сульфатные натриево-кальциевые, гидрокарбонатно-сульфатные магниевые-кальциевые, гидрокарбонатные натриево-кальциевые, гидрокарбонатные натриево-калиевые, гидрокарбонатно-хлоридные кальциевые, гидрокарбонатно-хлоридные натриево-кальциевые, сульфатно-гидрокарбонатные натриево-кальциевые, сульфатно-гидрокарбонатные натриево-кальциевые, сульфатно-гидрокарбонатные магниевые-кальциевые, сульфатно-гидрокарбонатные натриево-калиевые, сульфатные натриево-калиевые, сульфатные кальциево-магниевые, сульфатные натриево-кальциевые, сульфатные натриево-кальциево-магниевые, сульфатные магниевые-натриево-кальциевые с общей минерализацией от 0,11 до 1,76 г/л [44].

Наличие в воде нитритов, нитратов и ионов аммония, а также различный химический состав воды свидетельствует о техногенном питании грунтовых вод.

Оценка степени агрессивного воздействия подземных вод по различным видам агрессивности была произведена согласно химическому анализу и СП 28.13330.2017 [21]. Согласно СП 28.13330.2017 [21] подземные воды по выщелачивающей агрессивности – слабоагрессивные в скважинах № 3 и неагрессивные по всем остальным пробам (для бетонов марки W4).

По общекислотной агрессивности – неагрессивные по всем пробам (для бетонов марки W4).

По углекислотной агрессивности – неагрессивные по всем пробам (для бетонов марки W4).

Согласно СП 28.13330.2017 [21] подземные воды на участке изысканий по сульфатной агрессивности по отношению к бетону нормальной проницаемости (марки W4) – слабоагрессивные в скважинах № 3 и неагрессивные по всем остальным пробам.

Согласно СП 28.13330.2017 [21] степень агрессивного воздействия жидких хлоридных сред на арматуру железобетонных конструкций при периодическом смачивании – неагрессивная по всем пробам, при постоянном погружении – неагрессивная.

Согласно СП 28.13330.2017 [21] степень агрессивного воздействия подземных вод на металлические конструкции при свободном доступе кислорода – среднеагрессивная.

Согласно РД 34.20.508 [14] и РД 34.20.509 [15] степень агрессивности подземных вод по отношению к свинцовой оболочке кабеля - средняя в скважинах № 3, 13, и высокая по всем остальным пробам; по отношению к алюминиевой оболочке кабеля - средняя по всем пробам.

3.6. Геологические и инженерно-геологические процессы

По результатам визуальной оценки местности и результатам бурения признаки опасных инженерно-геологических процессов (карст, оползни) выявлены не были.

Из неблагоприятных инженерно-геологических процессов можно отметить подтопление и процессы морозного пучения грунтов.

Подтопление территории – процесс подъема уровня грунтовых вод выше некоторого критического положения, приводящий к ухудшению инженерно-геологических условий территории строительства.

Подтопление территории связано с близким к поверхности залеганием уровня подземных вод, который зависит от рельефа местности, слабой фильтрации грунтов, притока из нижележащих водоносных горизонтов, а также за счет поступления воды из пульпопроводов.

Подтопление подземными водами ведет к водонасыщению грунтов оснований, ухудшению их деформационных характеристик и изменению напряженного состояния сжимаемой толщи основания. Водонасыщение грунтов при подъеме подземных вод может привести к дополнительным деформациям оснований, в том числе вследствие дополнительных осадок. При проектировании и строительстве рекомендуется провести соответствующие мероприятия по инженерной защите исследуемой территории от подтопления [44].

Изучаемую территорию согласно СП 11-105-97 часть II [17] на большей ее части с учетом прогноза можно отнести к постоянно подтопленной в результате долговременных техногенных воздействий (I-Б-1); участки дамб, возвышающиеся над поверхностью - к неподтопляемым (III-Б-2).

Пучинистость грунтов — это явление возникает в местах неглубокого залегания грунтовых вод. Сооружения, подвергающиеся сезонному промерзанию-протаиванию, должны проектироваться с учетом морозного пучения грунтов, заключающегося в том, что влажные тонкодисперсные грунты при промерзании способны деформироваться – увеличиваться в объеме. При последующем оттаивании в этих грунтах происходит обратный процесс, сопровождающийся их разуплотнением, осадкой. Морозное пучение выражается в неравномерном поднятии промерзающего грунта.

Непосредственно на инженерные сооружения процесс морозного пучения воздействуют через касательные и нормальные силы пучения. Противопучинные мероприятия при строительстве должны быть направлены на снижение касательных сил пучения и

разработку конструктивных особенностей сооружений позволяющих удерживать их от выпучивания.

Пучинистость пылевато-глинистых, песчаных и крупнообломочных грунтов рассчитана согласно СП 22.13330.2011 [20].

Интенсивность сейсмических воздействий (сейсмичность) для района следует принимать на основе комплекта карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-2015, утвержденных Российской академией наук.

Указанный комплект карт предусматривает осуществление антисейсмических мероприятий при строительстве объектов и отражает 10 %, 5 % и 1 % вероятность возможного превышения (или 90 %, 95 % и 99 % - ную вероятность не превышения) в течение 50 лет указанных на картах значений сейсмической интенсивности.

Интенсивность сейсмического воздействия (сейсмичность района) согласно СП 14.13330.2014 [18]:

- территория не сейсмична по карте ОСР-2015-А;
- территория не сейсмична по карте ОСР-2015-В;
- 6 баллов по карте ОСР-2015-С.

Современные геологические процессы и явления на участке работ следующие:

- криогенные – морозное пучение, вызванное сезонным промерзанием грунта;
- подтопление территории, связанное с близким к поверхности залеганием уровня подземных вод, который зависит как от рельефа местности, слабой фильтрации моренных и торфяных грунтов, так и от подпора стока подземных вод строительными сооружениями.

3.7. Выводы по главе 3

В ходе инженерно-геологических изысканий на участке работ в районе плотины «Пионерная» в сумме была выполнена проходка 26 (21 – изыскания 2018 г. + 5 - доп. работы 2019 г.) скважины в 7 створах. Всего в процессе полевых и камеральных работ был выделено 22 инженерно-геологических элемента (ИГЭ), условия залегания и развития которых отражено на инженерно-геологических разрезах и показаны в колонках геологических выработок. В геологическом строении района изысканий («Пионерная плотина») пределах вскрытых скважинами глубин принимают участие биогенные (bQ_{IV}), техногенные (tQ_{IV}), верхневалдайские ледниковые ($gQ_{III_{vd}}$) отложения четвертичного возраста и коренные архейские отложения (AR) [44].

В состав существующих сооружений системы складирования хвостов входят: ограждающие дамбы хвостохранилища (Отсечная, Разделительная и Южного борта дамбы, Пионерная плотина и плотины №1 и 1а) и намывные дамбы (вторичная дамба Южного борта, Южный и Северный борта хвостохранилища).

Пионерная плотина представляет собой однородную насыпную каменно-земляную плотину из моренного грунта с пригрузкой низового и верхового откосов скальным грунтом толщиной 1-2 м. По температурному состоянию грунтов – талая.

Плотина имеет следующие характеристики: максимальная отметка гребня – 172,0 м, ширина по гребню – 12,0 м, длина по гребню – 2124 м, минимальная отметка основания в нижнем бьефе у подошвы – 152,37 м, максимальная высота – 19,63 м. Формула заложения низового откоса: 152,37 – 1:2,5 – 164,0 (6,0) – 1:2 – 172,0 (12,0). Среднее заложение верхового откоса – 1:2. Формула заложения верхового откоса: 152,37 – 1:2 – 172,0 (12,0).

Со стороны верхового откоса выполнен намыв пляжа из хвостовых отложений. Средняя длина надводного пляжа 329 м. По гребню плотины выполнен эксплуатационный проезд, установлено стационарное электроосвещение. В нижнем бьефе выполнена дренажная канава с максимальной глубиной 3 м. В соответствии с постановлением №986 от 02.11.2013 года «О классификации гидротехнических сооружений» относится ко II классу ГТС.

Согласно инженерным изысканиям прошлых лет было выявлено снижение фактического значения коэффициента устойчивости к нормативному значению коэффициента устойчивости Пионерной плотины [45].

Хвостохранилище образовано в озере путем перекрытия естественных водотоков насыпными плотинами и дамбами. По типу - *овражно-балочное*, по способу заполнения – *намывное*. С севера и запада хвостохранилище оконтурено холмами, с востока, юга и северо-востока насыпными и намывными плотинами. Хвостохранилище является

гидротехническим сооружением II класса и введено в эксплуатацию в 1982 г. Расположено на расстоянии 3 км к востоку от обогатительной фабрики. Общая площадь - 39 км², полезный объем при максимальной отметке 184,00 м составляет около 500 млн. м³ [45].

Расчет вертикальных напряжений от собственного веса грунта с учетом взвешивающего эффекта и без него, а также горизонтальных напряжений, производились на всех четырех створах для максимальной, средней и минимальных высот. По получившимся данным построены графики зависимости вертикальных напряжений от собственного веса грунта с учетом взвешивающего эффекта и без него, от высоты плотины. Аналогично построены графики зависимости горизонтальных напряжений от высоты плотины.

Величина вертикальных напряжений от собственного веса грунта увеличивается пропорционально увеличению величины высоты плотины. Следовательно, можно сделать вывод о том, что чем выше высота плотины, тем больше будет вертикальная нагрузка от нижележащих грунтов действовать на плотину. Так же по этим рисункам видно, что взвешивающий эффект уменьшает величину вертикального напряжения от собственного веса грунта.

Величина горизонтальных напряжений увеличивается прямо пропорционально величине роста высоты плотины. Следовательно, можно сделать вывод о том, что чем выше высота плотины (следовательно, и уровень НПУ в хвостохранилище), тем больше будет величина горизонтальных напряжений, действующих на плотину.

В 2018 г. на территории хвостового хозяйства УПКиО АО «Карельский окатыш» по проекту "Развитие сооружений хвостового хозяйства УПКиО на период 2018-2043 гг." [44] был проведен комплекс инженерно-геологических изысканий, с целью получения материалов комплексного изучения инженерно-геологических условий, необходимых для строительства и обоснования безопасной эксплуатации проектируемых объектов.

Работы проводились Пермским государственным национальным исследовательским университетом. Лабораторные исследования образцов пород и химические анализы воды были выполнены в лаборатории механики грунтов ООО «Уралстройизыскания».

В 2019 г. цехом по производству геологических работ АО «Карельский окатыш» были проведены дополнительные работы по поверочному бурению скважин в районе Пионерной плотины и исследованию физико-механических свойств пород, слагающих данный разрез. Цель работы – получение дополнительных материалов по изучению инженерно-геологических условий, для проведения повторного расчета устойчивости плотины.

Лабораторные исследования образцов пород были проведены в лаборатории физико-механических свойств и разрушения горных пород Научного центра геомеханики и проблем горного производства ФГБОУ «Санкт-Петербургский горный университет» [39].

По результатам обработки исследований составлена сводная таблица расчетных физико-механических характеристик грунтов плотины, значения которой будут использованы для выполнения расчета устойчивости плотины.

Территория исследований относится к Балтийскому бассейну трещинных вод; основной водоносный комплекс приурочен к верхней трещиноватой зоне кристаллического массива. Водоносный горизонт четвертичных отложений включает в себя воды ледниковых и торфяных отложений, которые, в основном, приурочены к слабодренированным впадинам. Водовмещающими грунтами являются техногенные четвертичные отложения, представленные насыпными грунтами (пески пылеватые, мелкие, средней крупности и крупные, супеси пластичные и текучие) и верхневалдайские ледниковые отложения (дресвяный грунт с песчаным заполнителем и щебенистый грунт) [44].

В гидрогеологическом отношении на участке работ, в пределах исследуемых глубин до 50,2 м, подземные воды вскрыты всеми скважинами. Появившийся и установившийся уровни были отмечены на глубине от 0,20 до 14,3 м. Водоносный горизонт является безнапорным. Питание грунтовых вод осуществляется преимущественно за счет поступления воды из пульпопроводов, притока из нижележащих водоносных горизонтов, а также за счет инфильтрации атмосферных осадков. Уровень грунтовых вод зависит от объемов подаваемой воды из пульпопроводов [39].

По результатам визуальной оценки местности и результатам бурения, признаки опасных инженерно-геологических процессов (карст, оползни) выявлены не были. Из неблагоприятных процессов можно отметить подтопление, связанное с близким к поверхности залеганием уровня подземных вод, который зависит как от рельефа местности, слабой фильтрации грунтов, так и от притока из нижележащих водоносных горизонтов, а также за счет поступления воды из пульпопроводов, и криогенный процесс – морозное пучение грунтов, вызванное сезонным промерзанием грунта и возникает в местах неглубокого залегания грунтовых вод. Интенсивность сейсмических воздействий определена по картам ОСР-2015. Территории не сейсмична по картам ОСР-2015-А/В, 6 баллов по карте ОСР-2015-С [44].

ГЛАВА 4. ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ТЕХНОГЕННЫХ МАССИВОВ ПРИ СКЛАДИРОВАНИИ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД

4.1. Оценка устойчивости отвалов

Описание плотины

Пионерная плотина расположена в 8 км от производственной площадки АО «Карельский Окамыш», конструктивно представляет собой однородную насыпную каменно-земляную плотину из моренного грунта, с пригрузкой низового и верхового откосов скальным грунтом толщиной 1-2 м.

Пионерная плотина имеет следующие характеристики: максимальная отметка гребня – 172,0 м, ширина по гребню – 12,0 м, длина по гребню – 2124 м, минимальная отметка основания в нижнем бьефе у подошвы – 152,37 м, максимальная высота – 19,63 м (29,93 м – вместе с вторичными дамбами обвалования). Среднее заложение верхового откоса – 1:2-1:2,5, низового – 1:2.

Со стороны верхового откоса выполнен намыв пляжа из хвостовых отложений. Средняя длина надводного пляжа 329 м.

В соответствии с постановлением №986 от 02.11.2013 года «О классификации гидротехнических сооружений» (ограждающие сооружения хранилищ жидких промышленных отходов) относится ко II классу ГТС [1].



Рис. 18. Вид на Пионерную плотину.

В геологическом строении района изысканий («Пионерная плотина») пределах вскрытых скважинами глубин принимают участие биогенные (bQ_{IV}), техногенные (tQ_{IV}), верхневалдайские ледниковые ($gQ_{III_{vd}}$) отложения четвертичного возраста и коренные архейские отложения (AR) [44].

Геолого-литологический разрез участка изысканий по результатам проходки горных выработок следующий (сверху вниз):

Четвертичные техногенные отложения – tQ_{IV}

ИГЭ-3. Насыпной грунт: песок мелкий серый, темно-серый средней плотности средней степени водонасыщения, с включением до 11% дресвы метаморфических пород.

ИГЭ-4а. Слой представлен песком коричневого цвета, гравелистым, местами до среднезернистого, плотный, неоднородного состава, с включением щебня (3-5 см) и валунов метаморфических пород (до 30%).

ИГЭ-6. Насыпной грунт: песок средней крупности серый средней плотности водонасыщенный, с включением до 9% дресвы метаморфических пород.

ИГЭ-7. Насыпной грунт: песок крупный серый средней плотности водонасыщенный, с включением до 27% дресвы (размером 0,3-0,8 см) метаморфических пород.

ИГЭ-9. Насыпной грунт: супесь серая, темно-серая, пылеватая/песчанистая, текучая.

ИГЭ-9а. Супесь серовато-коричневая, песчанистая, до гравелистой, твердая.

ИГЭ-9б. Супесь серовато-коричневого цвета, песчанистая, с прослоями дресвы и щебня метаморфических пород (размер 1-4 см).

ИГЭ-9в. Супесь зеленовато-серая, серовато-коричневая, песчанистая, текучая, с включением щебня (3-8 см) и дресвы метаморфических пород.

ИГЭ-10. Насыпной грунт: супесь серовато-коричневая с дресвой твердая, дресвы и щебня (размерами до 5 см) метаморфических пород до 25%.

ИГЭ-11. Насыпной грунт: дресвяный грунт с песчаным заполнителем, заполнителя до 45%, дресва, щебень метаморфических пород.

Четвертичные верхневалдайские ледниковые отложения – gQIIIvd

ИГЭ-16а. Песок желтого цвета, гравелистый, водонасыщенный.

ИГЭ-17. Супесь серая, коричневатая-серая дресвяная пластичная, дресвы и щебня (размерами 0,3-20 см) метаморфических пород до 48%.

ИГЭ-17б. Супесь серовато-коричневого цвета, местами зеленоватого, твердая, песчанистая, с включениями дресвы (размер 0,5-1,0 см) и щебня (размер до 3 см) метаморфических пород.

ИГЭ-18. Дресвяный грунт с песчаным заполнителем, заполнителя до 48%, дресва, щебень (размером до 10 см) метаморфических пород.

Коренные архейские отложения – AR

ИГЭ-19. Гранито-гнейс светло-серый, очень прочный, очень плотный, слабопористый, слабовыветрелый, мелкозернистый, массивный, трещиноватый.

ИГЭ-19б. Габбро-диабаз серого цвета, плотный, мелкокристаллический, массивный, пятнистый.

Наращивание плотины

За время эксплуатации Пионерной плотины (с 1982 г.) была проведена пригрузка откосов скальными грунтами шириной 2м, а также возведены вторичные дамбы обвалования до отметки 182,3 м. Отсыпка производилась из крупнозернистых хвостов (свойства грунта

приведены в гл. 3.3). Насыпные грунты слежавшиеся, отсыпаны с применением гидромеханизации. Возраст отсыпки более 10 лет. Процессы самоуплотнения насыпных грунтов в верхней части насыпных грунтов не завершены.

Наращивание плотины в связи с увеличением сброса пульпы в хвостохранилище, и соответственно для увеличения его емкости, планируется выполнить на 10 м в среднем до отметки 192,3 м из крупнозернистых хвостов, как и в подобных работах ранее.

Согласно расчетам, приведенным в табл. 39, такое наращивание увеличит:

- вертикальные напряжения без взвешивающего эффекта на 215 кПа (до 1606,3);
- вертикальные напряжения с учетом взвешивающего эффекта на 133,59 кПа (до 1101,1);
- горизонтальные напряжения на 105 кПа (до 759,57).

Для расчетов выбрана максимальная по глубине скважина (створ 3, абс. выс. 184.43 м.), которая обеспечит максимальные увеличения напряжений при наращивании плотины. По результатам расчетов построены эпюры вертикальных и горизонтальных напряжений, показанные на рис. 19.

Таблица 39 – Расчет вертикальных и горизонтальных напряжений при прогнозируемом наращивании плотины (ИГЭ №0 – наращенный)

Створ_3 / высота 184.43							без взвеш. эффекта	со взвеш. эфф.					
							вертикальные напряжения				горизонтальные напряжения		
ИГЭ	h, м	$\rho_{гр}, \text{т/м}^3$	$\rho_s, \text{т/м}^3$	e	$\gamma \text{ воды, кН/м}^3$	$g, \text{м/с}^2$	$\gamma \text{ грунта, кН/м}^3$	$s_{zg}, \text{кПа}$	$\gamma \text{ взвеш.гр., кН/м}^3$	$s_{zg}, \text{кПа}$	$\rho \text{ пульпы}$	$\gamma \text{ пульпы, кН/м}^3$	$s_{xg}, \text{кПа}$
0	10	2,15	2,81	0,51	10,00	10,00	21,5	215,00	21,5	215	1,05	10,5	105
3	5,92	1,92	2,83	0,66	10	10	19,2	328,66	19,2	328,66	1,05	10,5	167,16
уровень грунтовых вод													
3	7,99	1,92	2,83	0,66	10	10	19,2	482,07	11,02	416,75	1,05	10,5	251,06
11	0,84	2,02	2,82	0,55	10	10	20,2	499,04	11,76	426,62	1,05	10,5	259,88
4а	1,17	1,83	2,74	0,64	10	10	18,32	520,47	10,63	439,06	1,05	10,5	272,16
9	9,78	1,80	2,82	0,96	10	10	18,03	696,82	9,29	529,96	1,05	10,5	374,85
17	6,54	2,11	2,84	0,55	10	10	21,14	835,07	11,85	607,46	1,05	10,5	443,52
16а	4,24	2,09	2,68	0,53	10	10	20,90	923,69	10,98	654,02	1,05	10,5	488,04
19	25,86	2,64	2,91	0,10	10	10	26,40	1606,30	17,29	1101,10	1,05	10,5	759,57

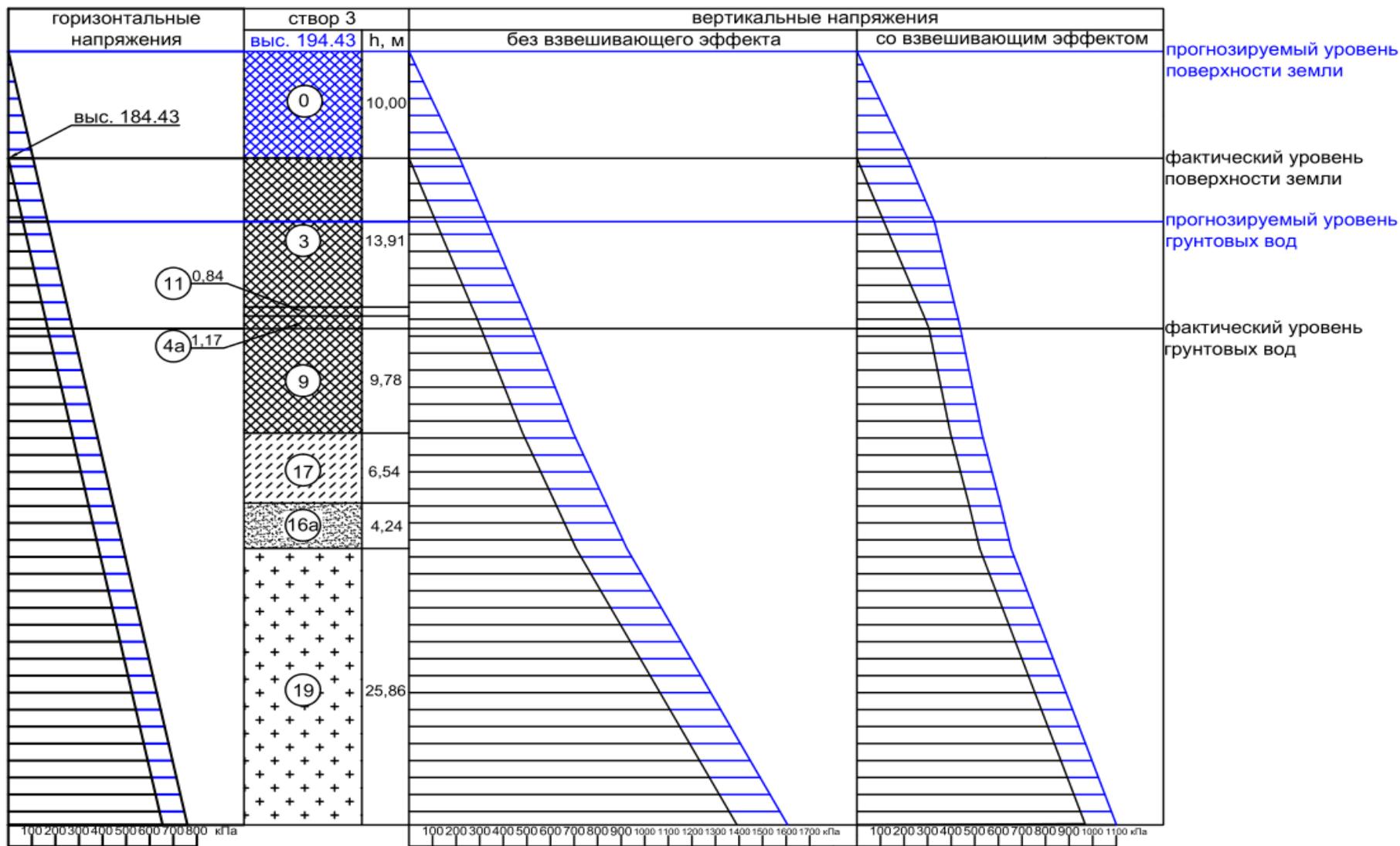


Рис. 19. Эпюры вертикальных и горизонтальных напряжений при прогнозируемом наращивании плотины.

Фактическая устойчивость

Согласно поверочным расчетам устойчивости, выполненных АО "Механобр инжиниринг" [44], коэффициент устойчивости Пионерной плотины ниже нормативного в створах 1, 2, 3, 4.

При этом неустойчивыми являются Пионерная плотина и дренажная призма, а дамбы обвалования, возводимые в процессе эксплуатации являются устойчивыми, как целостное сооружение. Признаков оплыwania или подтекания плотины по рекогносцировочным данным не обнаружено.

В ходе выполнения дополнительных работ для возможности проведения повторного расчета устойчивости было проведено поверочное бурение этих створов, а также выполнено бурение дополнительных скважин для уточнения строения плотины. Инженерно-геологические разрезы данных створов и скважин, входящих в состав створов, приведены в Приложении Б.

Признаки опасных инженерно-геологических процессов

По результатам визуальной оценки местности и результатам бурения признаки опасных инженерно-геологических процессов (карст, оползни, суффозии), а также прорывы выявлены не были. Из неблагоприятных инженерно-геологических процессов можно отметить подтопление и процессы морозного пучения грунтов [44].

Подтопление территории связано с близким к поверхности залеганием уровня подземных вод, который зависит от рельефа местности, слабой фильтрации грунтов, притока из нижележащих водоносных горизонтов, а также за счет поступления воды из пульпопроводов.

Пучинистость грунтов — это явление возникает в местах неглубокого залегания грунтовых вод; заключается в том, что влажные тонкодисперсные грунты при промерзании способны деформироваться – увеличиваться в объеме. При последующем оттаивании в этих грунтах происходит обратный процесс, сопровождающийся их разуплотнением, осадкой. Морозное пучение выражается в неравномерном поднятии промерзающего грунта.

Динамика уровня воды в хвостохранилище

Прогнозируемое повышение уровня воды в хвостохранилище в периоды снеготаяния и в дождливые сезоны года находится на уровне 0,1-0,25 м, что говорит о небольшом влиянии на величину горизонтальных нагрузок на плотину, поэтому данный фактор при расчете устойчивости учитываться не будет.

4.1.1. Общие принципы выполнения расчетов устойчивости горнотехнических сооружений

Оценка устойчивости массивов грунта состоит в сопоставлении их реального расчетного напряженного состояния с предельно возможным. Суть инженерных методов оценки устойчивости основана на понятии о коэффициенте запаса устойчивости, который в общем виде представляется так:

$$K_y = R/R_d,$$

где R – обобщенное реактивное предельное сопротивление грунта действию разрушающей нагрузки; R_d – реакция массива грунта на действующую нагрузку. Таким образом, K_y имеет определенный физический смысл и показывает, насколько использовано возможное предельное сопротивление грунта. При этом сопоставляются только одинаковые по природе реактивные силы – предельные и действующие.

В дополнение к этому, должно выполняться условие равновесия:

$$R_d - P = 0,$$

где P – обобщенная активная сила, соответствующая действительному состоянию грунтового массива.

Совместное решение уравнения физического понятия о коэффициенте запаса устойчивости и уравнения равновесия приводит к выражению для K_y в виде:

$$K_y = R / P.$$

Можно использовать и другое определение:

где $T_{\text{пр. реакт}}$ и $M_{\text{пр. реакт}}$ – сумма проекций или моментов всех реактивных сил в предельном состоянии; $T_{\text{действ. реакт}}$ и $M_{\text{действ. реакт}}$ – сумма проекций или моментов действующих, исходя из соотношений реактивных сил.

$$K_y = \frac{T_{\text{пр. реакт}}}{T_{\text{действ. реакт}}} \quad \text{или} \quad K_y = \frac{M_{\text{пр. реакт}}}{M_{\text{действ. реакт}}}$$

Условия равновесия, которые в этом случае можно представить в виде:

$$T_{d,p} = T_{d,a} \quad \text{или} \quad M_{d,p} = M_{d,a}$$

Совместное решение уравнений приводит к выражениям для K_y в виде

$$K_y = \frac{T_{п. p}}{T_{д. а}} \quad \text{или} \quad K_y = \frac{M_{п. p}}{M_{д. а}}$$

В ряде случаев коэффициент запаса определяют из соотношения характеристик сопротивления грунтов сдвигу, при которых происходит разрушение оснований и откосов с фактически имеющимися значениями этих характеристик, т.е.

$$K_y = \operatorname{tg} \varphi / \operatorname{tg} \varphi_{\text{пр}} = c / c_{\text{пр}}$$

где φ и c – действительные значения углов внутреннего трения и сцепления; $\varphi_{\text{пр}}$ и $c_{\text{пр}}$ – характеристики прочности, при которых в условиях действующих нагрузок грунт перейдет в предельное состояние. Таким образом, $\varphi_{\text{пр}}$ и $c_{\text{пр}}$ – это такие уменьшенные значения характеристик сопротивления грунта сдвигу, при которых в эксплуатационных условиях основание или сооружение потеряло бы устойчивость, т.е. $K_y=1$.

Существуют предложения определять коэффициенты запаса устойчивости как

$$K_y = \frac{E_{\text{удерж}}}{E_{\text{сдвиг}}} \quad \text{или} \quad K_y = \frac{M_{\text{удерж}}}{M_{\text{сдвиг}}}$$

т.е. отношение действующих в различных направлениях усилий или их моментов (удерживающих и сдвигающих). Следует обратить внимание, что определение коэффициента запаса по этим формулам может отличаться от предыдущих формул, так как ряд усилий в них учитывается различно. Например, вес грунта в случае немоной поверхности скольжения будет относиться в одной части к сдвигающим силам, в другой – к удерживающим. Становится очевидно, что применение последних формул не обосновано и может приводить к грубым ошибкам. Подразделять силы на сдвигающие и удерживающие не следует. Необходимо использовать только разделение всех сил на активные и реактивные, а последние в свою очередь на предельные и действующие [36].

Тем не менее, существуют методы, основанные на разделении сил на сдвигающие и удерживающие, например аналитический метод Шахунянца [29, 36]. Стоит отметить, что данный метод нашел широкое распространение в отрасли и является рекомендуемым к применению, согласно действующим нормативным документам [25].

Следовательно, поверхность скольжения BB в данном случае будет представлена дугой некоторого круга с радиусом r , очерченного из центра O . Оползающий массив рассматривается при этом как некоторый твердый блок, всеми своими точками участвующий в одном общем движении.

Степень устойчивости откоса оценивается различными методами («метод площадей», «метод круга трения» и т.д.). Принципиально наиболее простым из них и одновременно наиболее распространенным в нашей стране является так называемый метод моментов, сущность которого заключается в следующем.

Оползающий массив находится под воздействием двух моментов: момента $M_{вр}$, вращающего массив, и момента $M_{уд}$, удерживающего массив. Коэффициент устойчивости склона K_y определяется отношением этих моментов, т.е.:

$$K_y = M_{уд}/M_{вр}.$$

Грунтовые воды оказывают взвешивающее влияние на породы и фильтрационное (гидродинамическое) давление на весь массив, как было описано выше. Вращающий момент определяется умножением сдвигающих сил на плечо до центра вращения O , а удерживающий момент - умножением сил сопротивления сдвигу на аналогичное плечо. При этом, так как угол наклона касательной к поверхности скольжения и веса отдельных частей массива не постоянны, приходится расчленять воображаемый оползневой массив (сползающий блок) на n расчетных отсеков, для каждого из которых определяют силы сопротивления сдвигу и сдвигающие силы. Тогда коэффициент запаса устойчивости склона находится как отношение сумм тех и других моментов:

$$K_y = \Sigma M_{уд}/\Sigma M_{вр}.$$

Подробный вывод окончательных формул для определения коэффициента устойчивости методом цилиндрических поверхностей приведен у многих авторов. Поэтому мы их здесь дадим без выводов.

При отсутствии грунтовых вод:

$$K_y = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (P_i \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i)}{\sum_{i=1}^{i=n} (P_i \sin \alpha_i + Q_i)}.$$

При простом затоплении откоса:

$$K_y = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (P_{Bi} \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi_{Bi} + c_{Bi} l_i)}{\sum_{i=1}^{i=n} (P_{Bi} \sin \alpha_i + Q_{ci})}$$

При воздействии на откос фильтрационного потока:

$$K_y = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (P_{Bi} \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi_{Bi} + c_{Bi} l_i)}{\sum_{i=1}^{i=n} (P_i \sin \alpha_i + Q_{ci})}$$

Кроме участвующих в написанных выше формулах сил, в грунтовом массиве имеются еще неизвестные по величине давления грунта на вертикальные боковые грани отсеков. Последние силы являются внутренними по отношению ко всему сползающему массиву и внешними по отношению к отдельным выделенным элементам. Так как независимо от величины и направления боковых давлений сумма всех вертикальных сил должна равняться общему весу сползающего клина, то в методах круглоцилиндрических поверхностей скольжения принимается, что силы бокового давления, действующие на вертикальные грани отдельных элементов грунта, можно не учитывать при определении условий равновесия всего сползающего массива.

Из других способов, использующих круглоцилиндрическую поверхность скольжения, следует упомянуть метод круга трения (приемы Гультина и Петерсона, Казагранде, Крея, Тейлора, Гольдштейна, Федорова и др.), метод многоугольника сил Фрелиха, метод Како, метод Чугаева-Вяземского, метод Бишопа и пр. Все они являются сравнительно эффективными для оценки степени устойчивости склонов, но трудно применимы для определения величины оползневого давления. То же следует сказать о методах расчета устойчивости откоса по кривой скольжения, имеющей форму логарифмической спирали (например, метод Рендулика).

На практике рассматриваемый метод часто осложняется неопределенностью в положении центра вращения O . Его координаты, а также радиус r определяются так, чтобы отразить в расчете наиболее невыгодное положение принимаемой поверхности скольжения, при котором значение коэффициента устойчивости K_y получается минимальным из возможных для данного склона (откоса). Очень часто положение центра O устанавливают подбором путем проведения нескольких расчетов для отыскания наиболее опасного для данного случая положения поверхности скольжения. Такой ход расчета связан со значительной трудоемкостью.

Имеются и другие причины, по которым метод круглоцилиндрической поверхности скольжения сложно использовать при проектировании противоползневых удерживающих

конструкций глубокого заложения. Например, это связано с тем, что оползневое проявление чаще всего развивается в тех естественных склонах, толща которых сложена пластами различных пород (нередко со слабыми прослойками). Для таких же случаев неоднородных грунтов расчет методом круглоцилиндрической поверхности скольжения не вполне пригоден.

Метод Morgenstern-Price

Метод Н. Р. Моргенштерна – В. Е. Прайса применяется для поверхностей скольжения любой формы и является более точным в том смысле, что он учитывает все три уравнения равновесия: уравнения сил равновесия в горизонтальном и вертикальном направлении, а также уравнение момента равновесия. Метод требует выполнения для каждого отсека уравнения равновесия в проекциях на нормальное и касательное к основанию направления; уравнения моментов относительно точки центра основания отсека.

Таким образом, для каждого отсека и соответственно для всей призмы сдвига обеспечивается выполнение всех уравнений статики.

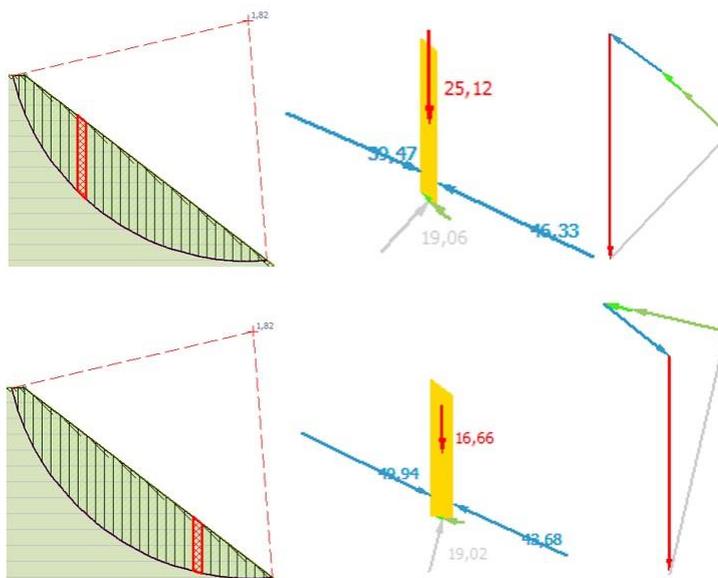


Рис. 21. Метод Моргенштерна-Прайса.

$\sum M_i = 0$ - да, $\sum F_i = 0$ - нет. Нормальные усилия между отсеками – да, касательные – да.

Метод предполагает наличие как горизонтальных E_i , так и вертикальных X_i (рис. 22) составляющих сил взаимодействия между отсеками. Предполагается, что X_i связаны с E_i следующим соотношением:

$$X_i = E_i \lambda f(x_i),$$

где $f(x)$ - некоторая функция, λ - числовой коэффициент.

В качестве функции $f(x)$ может выступать константа, полуволна синуса, трапециевидная функция и т.д.

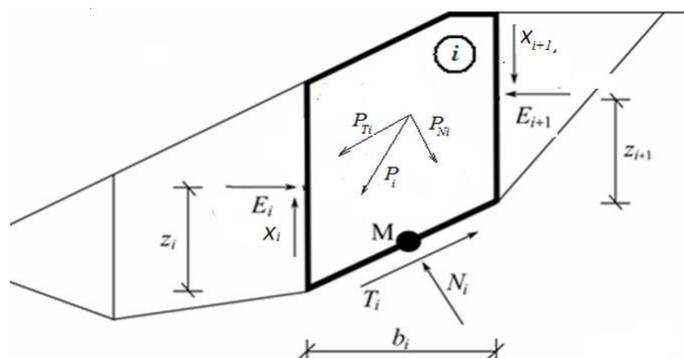


Рис. 22. Призма сдвига.

Для каждого отсека искомое решение должно удовлетворять следующим уравнениям (рис. 22):

- уравнению равновесия в проекции на нормаль к основанию отсека:

$$N_i + P_{N_i} + (X_i - X_{i+1}) \cos(\alpha_i) - (E_i - E_{i+1}) \sin(\alpha_i) = 0,$$

- уравнению равновесия в проекции на направление касательное к основанию отсека:

$$\frac{(N_i \tan(\varphi_i) + c l_i)}{K_y} + P_{T_i} + (E_i - E_{i+1}) \cos(\alpha_i) + (X_i - X_{i+1}) \sin(\alpha_i) = 0$$

- уравнению моментов относительно точки центра основания отсека:

$$M_{P_i} - E_i \left(z_i - \frac{b_i}{2} \sin(\alpha_i) \right) + E_{i+1} \left(z_{i+1} + \frac{b_i}{2} \sin(\alpha_i) \right) - X_i \frac{b_i}{2} - X_{i+1} \frac{b_i}{2} = 0$$

где P_{N_i} и P_{T_i} - нормальная и касательная к основанию отсека составляющие равнодействующей внешних активных сил P_i , M_{P_i} - момент равнодействующей внешних сил P_i относительно точки M , z_i - расстояния от основания отсека до точки приложения силы межотсечного взаимодействия, b_i - ширина отсека, α_i - угол наклона основания отсека, L_i - длина основания отсека, и c_i - сцепление и φ_i - угол внутреннего трения грунта, K_y - коэффициент устойчивости.

Неизвестными величинами в соотношениях выступают $f(x)$, E_i , $M_{актi} = G_i \cdot r_0$, z_i , K_y . В случае использования n отсеков общее количество неизвестных составляет $4n-1$, так как в состоянии равновесия $X_i=0$, $E_i=0$, $X_{n+1}=0$, $E_{n+1}=0$, и, следовательно, в соотношениях также не фигурируют z_i и z_{n+1} . Соотношения образуют замкнутую систему из $4n-1$ уравнения, что позволяет определить все неизвестные величины. Алгебраическая система нелинейна, и для ее решения используются итерационные методики.

Метод Янбу

Этот метод учитывает силы между блоками. А также уравнения сил равновесия в горизонтальном и вертикальном направлениях для всех блоков, уравнение момента равновесия для всех участков, за исключением последнего, самого высокого. Метод требует выполнения суммарного уравнения равновесия в проекции на горизонтальную ось, а также уравнения равновесия в каждом отсеке в проекции на вертикаль.

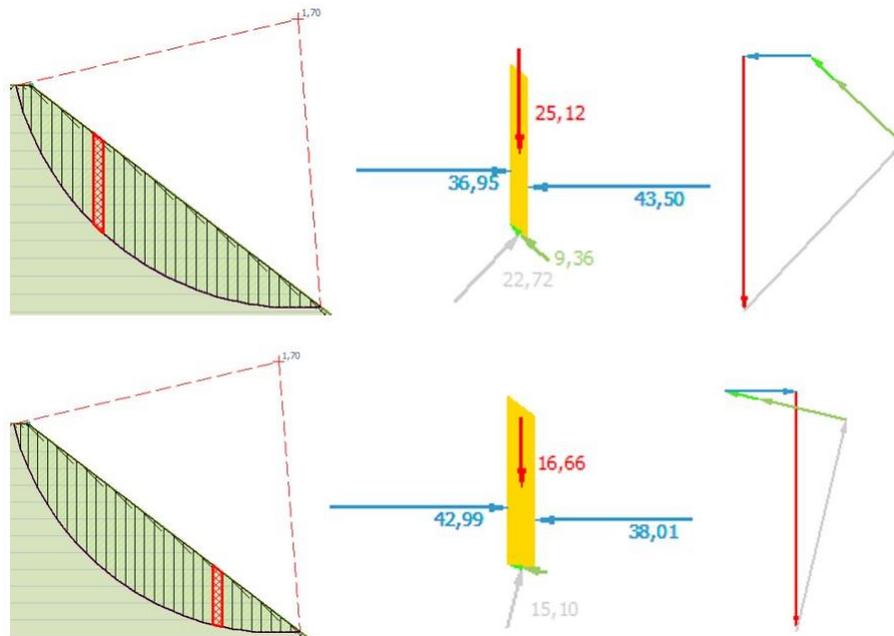


Рис. 23. Метод Янбу.

$\sum M_i = 0$ - нет, $\sum F_i = 0$ - да. Нормальные усилия между отсеками – да, касательные – нет.

Все внешние силы, действующие на s_i -й отсек, приводятся к равнодействующей P_i .

Последняя раскладывается на горизонтальную P_{xi} и вертикальную P_{yi} составляющие.

Общее уравнение равновесия в проекции на горизонтальную ось примет вид:

$$\sum P_{xi} + \sum S_i \sin(\alpha_i) - \frac{\sum R_i}{K_y} \cos(\alpha_i) = 0$$

где S_i – сила нормальной реакции основания к s_i -м отсеку;

$R_i = S_i(\tan(\alpha_i) + c_i l_i)$ – максимальное значение силы сопротивления сдвигу;

α_i – угол наклона основания отсека.

Как и в методе Бишопа, сила нормальной реакции основания определяется из условия выполнения в каждом отсеке уравнения равновесия в проекции на вертикаль.

В случае отсутствия армирующих элементов получаем:

$$S_i = S_i(K_y) = \frac{\frac{P_{yi}}{\cos(\alpha_i)} - \frac{c_i l_i}{K_y} \tan(\alpha_i)}{1 + \frac{\tan(\varphi_i) \tan(\alpha_i)}{K_y}}$$

С учетом влияния армирующих элементов (при устройстве анкеров и нагелей)

$$S_i = S_i(K_y) = \frac{\frac{P_{yi} + \frac{P_{yi}^{арм}}{K_y}}{\cos(\alpha_i)} - \frac{c_i l_i}{K_y} \tan(\alpha_i)}{1 + \frac{\tan(\varphi_i) \tan(\alpha_i)}{K_y}}$$

Общая формула метода

Таким образом, силы S_i и R_i становятся зависящими от K_y , и общее уравнение равновесия может быть записано в виде:

$$K_y = \frac{\sum R_i(K_y) \cos(\alpha_i)}{\sum P_{xi} + \sum S_i(K_y) \cdot \sin(\alpha_i)}$$

В результате мы получаем нелинейную алгебраическую задачу относительно K_y , решение которой выполняется с помощью итерационных методов.

Учет только веса:

$$S_i = S_i(K_y) = \frac{\frac{P_{yi}}{\cos(\alpha_i)} - \frac{c_i l_i}{K_y} \tan(\alpha_i)}{1 + \frac{\tan(\varphi_i) \tan(\alpha_i)}{K_y}}$$

$$K_y = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i(K_y) \cdot \tan(\varphi_i) + c_i l_i) \cos(\alpha_i)}{\sum_{i=1}^n S_i(K_y) \cdot \sin(\alpha_i)}$$

Учет произвольных активных сил:

$$S_i = S_i(K_y) = \frac{\frac{P_{yi}}{\cos(\alpha_i)} - \frac{c_i l_i}{K_y} \tan(\alpha_i)}{1 + \frac{\tan(\varphi_i) \tan(\alpha_i)}{K_y}}$$

$$K_y = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i(K_y) \cdot \tan(\varphi_i) + c_i l_i) \cos(\alpha_i)}{\sum_{i=1}^n P_{xi} + \sum_{i=1}^n S_i(K_y) \cdot \sin(\alpha_i)}$$

Учет анкеров и нагелей:

$$S_i = S_i(K_y) = \frac{\frac{P_{yi} + \frac{P_{yi}^{арм}}{K_y}}{\cos(\alpha_i)} - \frac{c_i l_i}{K_y} \tan(\alpha_i)}{1 + \frac{\tan(\varphi_i) \tan(\alpha_i)}{K_y}}$$

$$K_y = \frac{\sum_{i=1}^n \left(S_i(K_y) \cdot \tan(\varphi_i) + c_i l_i + \frac{P_{xi}^{арм}}{K_y} \right) \cos(\alpha_i)}{\sum_{i=1}^n P_{xi} + \sum_{i=1}^n S_i(K_y) \cdot \sin(\alpha_i)}$$

Метод Янбу предполагает возможность определения сил взаимодействия между отсеками, полагая, что эти усилия строго горизонтальны.

Все приведенные ранее соотношения останутся без изменений, так как:

- горизонтальные силы взаимодействия между отсеками не вносят вклад в уравнения равновесия в отсеках в проекции на вертикаль;
- силы в соседних отсеках разнонаправлены и равны по величине, следовательно, их суммарный вклад в общее уравнение равновесия в проекции на горизонталь равен нулю.

Силы взаимодействия между отсеками определяются из условия выполнения для каждого отсека уравнения равновесия в проекции на горизонтальную ось и условия равенства нулю данной силы на границе призмы.

Метод Бишопа

А. Бишоп предложил упрощенный метод, в котором силы, действующие на основание блока, имеют только нормальное направление, а касательные приравняются нулю [49].

Как правило, метод используется для анализа призм с круглоцилиндрической поверхностью скольжения. Метод требует выполнения суммарного уравнения моментов, а также уравнения равновесия в каждом отсеке в проекции на вертикаль.

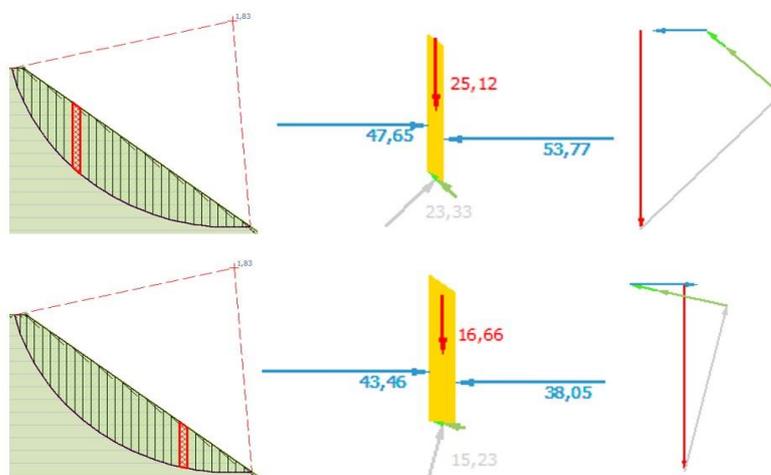


Рис. 24. Метод Бишопа.

$\sum M_i = 0$ - да; $\sum F_i = 0$ - нет; нормальные усилия между отсеками – да; касательные усилия между отсеками – нет.

С учетом того, что суммарные моменты сил внешней нагрузки и сил сопротивления имеют разные знаки, уравнение моментов может быть записано в виде:

$$\sum M_{\text{акт}} - \frac{\sum M_{\text{реакт}}}{K_y} = 0,$$

где $\sum M_{\text{акт}}$ – суммарный момент равнодействующих активных сил; $\sum M_{\text{реакт}}$ – суммарный момент сил сопротивления сдвигу; K_y – коэффициент устойчивости, определяющий долю реализации сил сопротивления.

Общая формула метода

Таким образом, коэффициент устойчивости определяется:

$$K_y = \frac{\sum M_{\text{реакт}}}{\sum M_{\text{акт}}}$$

Нормальные реакции основания в отсеках определяются из условий выполнения уравнения равновесия в каждом отсеке в проекции на вертикальную ось y . Все внешние силы, действующие на i -й отсек, приводятся к равнодействующей P_i . Последняя раскладывается на горизонтальную P_{xi} и вертикальную P_{yi} составляющие.

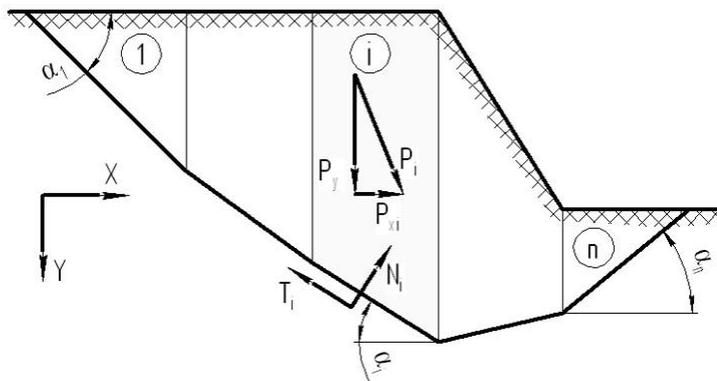


Рис. 25. Призма сдвига.

В случае отсутствия армирующих элементов уравнение равновесия i -го отсека в проекции на вертикаль принимает вид (рис. 25):

$$S_i \cos(\alpha_i) - P_{yi} + \frac{S_i \tan(\varphi_i) + c_i l_i}{K_y} \sin(\alpha_i) = 0$$

откуда:

$$S_i = S_i(K_y) = \frac{\frac{P_{yi}}{\cos(\alpha_i)} - \frac{c_i l_i}{K_y} \tan(\alpha_i)}{1 + \frac{\tan(\varphi_i) \tan(\alpha_i)}{K_y}}$$

С учетом влияния армирующих элементов (при устройстве анкеров и нагелей):

$$S_i \cos(\alpha_i) - P_{yi} - \frac{P_{yi}^{\text{арм}}}{K_y} + \frac{S_i \tan(\varphi_i) + c_i l_i}{K_y} \sin(\alpha_i) = 0$$

$$S_i = S_i(K_y) = \frac{P_{yi} + \frac{P_{yi}^{арм}}{K_y}}{\cos(\alpha_i)} - \frac{c_i l_i}{K_y} \tan(\alpha_i) \frac{1}{1 + \frac{\tan(\varphi_i) \tan(\alpha_i)}{K_y}}$$

Следует отметить, что S_i и, как следствие, силы сопротивления являются величинами, зависящими от K_y . Следовательно, выражение общей формулы принимает вид:

$$K_y = \frac{\sum M_{реакт}(K_y)}{\sum M_{акт}}$$

В результате мы получаем нелинейную алгебраическую задачу относительно K_y , решение которой выполняется с помощью итерационных методов.

Учет только веса:

$$S_i = S_i(K_y) = \frac{\frac{P_{yi}}{\cos(\alpha_i)} - \frac{c_i l_i}{K_y} \tan(\alpha_i)}{1 + \frac{\tan(\varphi_i) \tan(\alpha_i)}{K_y}}$$

$$K_y = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i(K_y) \cdot tg \varphi_i + c_i l_i)}{\sum_{i=1}^n G_i \sin \alpha_i}$$

Учет произвольных активных сил:

$$S_i = S_i(K_y) = \frac{\frac{P_{yi}}{\cos(\alpha_i)} - \frac{c_i l_i}{K_y} \tan(\alpha_i)}{1 + \frac{\tan(\varphi_i) \tan(\alpha_i)}{K_y}}$$

$$K_y = \frac{r_0 \sum_{i=1}^n (S_i(K_y) \cdot tg \varphi_i + c_i l_i)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (P_{ij} h_j)}$$

где P_{ij} – модули активных сил, принадлежащих i -ому отсеку; h_i – плечо активной силы P_{ij}

Учет анкеров и нагелей:

$$S_i = \frac{P_{yi} + \frac{P_{yi}^{арм}}{K_y}}{\cos(\alpha_i)} - \frac{c_i l_i}{K_y} \tan(\alpha_i) \frac{1}{\left(1 + \frac{\tan(\varphi_i) \tan(\alpha_i)}{K_y}\right)}$$

$$K_y = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i(K_y) \cdot tg \varphi_i + c_i l_i) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i^{арм}}{K_y} h_i^{арм}\right)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (P_{ij} h_j)}$$

где $P_{арм i}$ – модуль силы от удерживающей конструкции; $h_{арм i}$ – плечо силы $P_{арм i}$.

Метод Бишопа предполагает возможность определения сил взаимодействия между отсеками, полагая, что эти усилия строго горизонтальны. Все приведенные ранее соотношения останутся без изменений, так как:

- горизонтальные силы взаимодействия между отсеками не вносят вклад в уравнения равновесия в отсеках в проекции на вертикаль;
- силы в соседних отсеках разнонаправлены и равны по величине, следовательно, их суммарный момент равен нулю.

Силы взаимодействия между отсеками определяются из условия выполнения для каждого отсека уравнения моментов и условия равенства нулю данной силы на границе призмы.

Метод Е. Спенсера

Метод Е. Спенсера учитывает также силы между блоками. Блоки создаются путем деления участка грунта над потенциальной поверхностью скольжения плоскостями. Равнодействующие сдвигающих и удерживающих сил между блоками имеют постоянные направления. Метод Спенсера является более точным в том смысле, что он учитывает все три уравнения равновесия: уравнения сил равновесия в горизонтальном и вертикальном направлении, а также уравнение момента равновесия. Коэффициент надежности определяется через нахождение значения сил, действующих между блоками, и коэффициента устойчивости.

Метод Е. Спенсера используется для поверхности скольжения любой формы и в нем принимается допущение о постоянстве угла наклона боковых сил взаимодействия [50].

Силы, действующие на отдельные блоки, представлены на рисунке ниже:

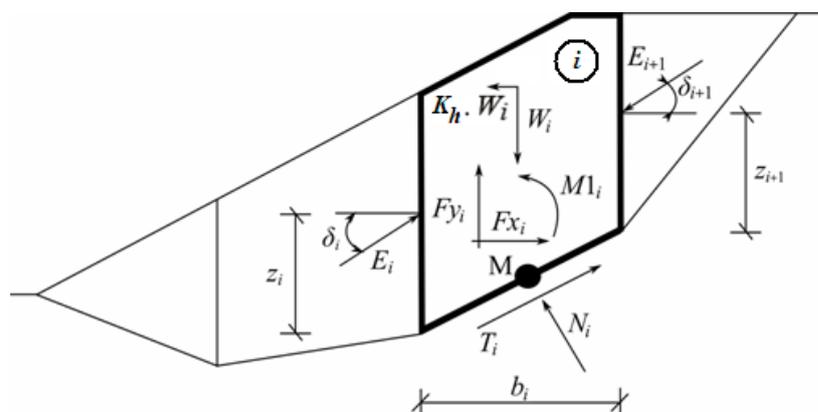


Рис. 26. Метод Е. Спенсера.

Предполагается, что каждый блок испытывает следующие усилия:

- W_i - вес блока, включая напряжение материала, имеющего свойство блока, в т.ч. воздействие коэффициента вертикального землетрясения K_v ;

- $K_h * W_i$ - горизонтальная инерционная сила, представляющая действие землетрясения, K_h - коэффициент горизонтального ускорения во время землетрясения;
- N_i - нормальная сила на поверхности скольжения;
- T_i - сила сдвига на поверхности скольжения;
- E_i, E_{i+1} - силы, приложенные соседними блоками, они наклонены от горизонтальной поверхности на угол δ ;
- F_{xi}, F_{yi} - другие горизонтальные и вертикальные силы, действующие на блок;
- M_{li} - момент сил $F_{xi}F_{yi}$, вращающихся вокруг точки M , которая является центром i -ого сегмента поверхности скольжения;
- U_i - равнодействующая порового давления на i -ом сегменте поверхности скольжения;

Для расчета предельного равновесия сил и моментов на отдельных блоках по методу Спенсера используются следующие допущения:

- плоскости раздела между блоками всегда вертикальны;
- линия действия веса блока W_i проходит через центр i -ого сегмента поверхности скольжения, представленного точкой M ;
- нормальная сила N_i действует в центре i -ого сегмента поверхности скольжения, в точке M ;
- наклонение сил E_i , действующих между блоками, является постоянной величиной для всех блоков и равно δ , только на крайних точках поверхности скольжения $\delta = 0$;

Решение принимает следующие выражения:

$$N_i = N'_i + U_i$$

$$T_i = (N_i - U_i) \tan \varphi_i + c_i \frac{b_i}{\cos \alpha_i} = N'_i \tan \varphi_i + c_i \frac{b_i}{\cos \alpha_i}$$

$$N'_i + U_i - W_i \cos \alpha_i + k_h W_i \sin \alpha_i + F_{yi} \cos \alpha_i - F_{xi} \sin \alpha_i + E_{i+1} \sin(\alpha_i - \delta_{i+1}) - E_i \sin(\alpha_i - \delta_i) = 0$$

$$N'_i \frac{\tan \varphi_i}{SF} + \frac{c_i}{SF} \frac{b_i}{\cos \alpha_i} - W_i \sin \alpha_i - k_h W_i \cos \alpha_i + F_{yi} \sin \alpha_i + F_{xi} \cos \alpha_i - E_{i+1} \cos(\alpha_i - \delta_{i+1}) + E_i \cos(\alpha_i - \delta_i) = 0$$

$$E_{i+1} \cos \delta_{i+1} \left(z_{i+1} - \frac{b_i}{2} \tan \alpha_i \right) - E_{i+1} \sin \delta_{i+1} \frac{b_i}{2} - E_i \cos \delta_i \left(z_i - \frac{b_i}{2} \tan \alpha_i \right) - E_i \sin \delta_i \frac{b_i}{2} + M_{li} - k_h W_i (y_M - y_{gi}) = 0$$

где: φ_i - угол внутреннего трения грунта на сегменте поверхности скольжения;

c_i - удельное сцепление грунта на сегменте поверхности скольжения;

α_i - уклон сегмента поверхности скольжения.

Первое уравнение представляет отношение между эффективным и общим значением нормальной силы, действующей на поверхность скольжения. Второе уравнение соответствует условию Мора-Кулона, представляющего отношение между нормальной и сдвиговой силами на данном сегменте поверхности скольжения. Третье уравнение представляет уравнение равновесия силы в направлении под прямым углом к i -ому сегменту поверхности скольжения, а четвертое уравнение представляет силу равновесия вдоль i -ого сегмента поверхности скольжения. SF - коэффициент надежности, который используется для приведения параметров грунта. Пятое уравнение соответствует уравнению момента равновесия вокруг точки M , где y_{gi} - вертикальная координата точки приложения веса блока, а y_M - вертикальная координата точки M . Изменяя третье и четвертое уравнения, получаем следующую рекурсивную формулу:

$$E_{i+1} = \frac{[(W_i - Fy_i)\cos\alpha_i - (K_R W_i - Fx_i)\sin\alpha_i - U_i + E_i \sin(\alpha_i - \delta_i)] \frac{\tan\varphi_i}{SF} + \frac{c_i}{SF} \frac{b_i}{\cos\alpha_i} - (W_i - Fy_i)\sin\alpha_i - (K_R W_i - Fx_i)\cos\alpha_i + E_i \cos(\alpha_i - \delta_i)}{\sin(\alpha_i - \delta_{i+1}) \frac{\tan\varphi_i}{SF} + \cos(\alpha_i - \delta_{i+1})}$$

На основе этого отношения можно для δ и SF постепенно вычислить все силы E_i между блоками, исходя при этом из факта, что в начале поверхности скольжения значение E известно: $E_1 = 0$. Из уравнения момента равновесия выводится дополнительная рекурсивная формула:

$$z_{i+1} = \frac{\frac{b_i}{2} [E_{i+1}(\sin\delta_{i+1} - \cos\delta_{i+1} \tan\alpha_i) + E_i(\sin\delta_i - \cos\delta_i \tan\alpha_i)] + E_i z_i \cos\delta_i - M1_i + K_R W_i (y_M - y_{gi})}{E_{i+1} \cos\delta_{i+1}}$$

Эта формула позволяет рассчитать для данных значений δ все плечи z сил, действующих между блоками, зная значение слева в начале поверхности скольжения, где $z_1 = 0$. Коэффициент надежности SF определяется при помощи следующего итерационного процесса:

1. Начальное значение δ устанавливается равным 0, $\delta = 0$.
2. Коэффициент надежности SF для данного значения δ следует из шестого уравнения, при этом допускается значение $E_{n+1} = 0$ в конце поверхности скольжения.
3. Значение δ рассчитывается седьмым уравнением с помощью значений E , определенных на предыдущем этапе при условии, что момент на последнем блоке равен 0. Седьмое уравнение не определяет значение z_{n+1} , поскольку оно равно 0. Для этого значения должно выполняться уравнение момента равновесия.

4. Этапы 2 и 3 повторяются до тех пор, пока значение δ не измениться.

Для обеспечения устойчивости процесса итерации необходимо избегать неустойчивых условий. Такие нестабильности появляются в точках, где имеет место деление на 0 в шестом и седьмом уравнениях. В седьмом уравнении деление на 0 принимается для $\delta = \pi/2$ или $\delta = -\pi/2$. Таким образом, значение угла δ должно находиться в интервале $(-\pi/2; \pi/2)$.

Деление на 0 в шестом уравнении имеет место, когда:

$$SF = \tan \varphi_i \tan(\delta_{i+1} - \alpha_i)$$

Еще одним способом предупредить цифровую нестабильность является проверка параметра m_α : должно выполняться следующее условие:

$$m_\alpha = \cos \alpha_i + \frac{\sin \alpha_i \tan \varphi_i}{SF} > 0,2$$

Таким образом, перед началом итерации необходимо найти наивысшие показатели критических значений (SF_{\min}), удовлетворяющих вышеуказанные условия. Значения ниже данного критического значения SF_{\min} находятся в области неустойчивого решения, таким образом, итерация начинается с установки SF на значение «слегка» выше SF_{\min} , и все получаемые значения SF из итерации выше, чем SF_{\min} .

В общем можно сказать, что сложные методы труднее подвергаются конвергенции чем более простые методы (Бишопа, Феллениуса). Проблемы с конвергенцией возникают напр., на участках поверхности скольжения повышенной крутизны, сложной геометрии, при резком увеличении пригрузки и т.п. В случае, что расчёт не даёт результата, рекомендуется немного изменить задание, например, уменьшить крутизну, в поверхность скольжения добавить больше точек и т.п. или выполнить расчёт по более простому методу.

Анализ методов

Для дальнейшего проектирования устойчивости плотины наиболее приемлемыми являются методы Бишопа, Ямбу и Спенсера. Для определения коэффициента устойчивости склона будет применяться круглоцилиндрическая поверхность скольжения, т.к. данный метод очень часто используется для проведения расчетов такого характера и является наиболее простым и быстрым методом.

4.1.2. Обоснование расчетных геотехнических схем (моделей) для техногенных массивов

На гидротехнические сооружения, согласно СП 20.13330.2011 [19], в зависимости от продолжительности действия нагрузок следует различать *постоянные* и *временные* (длительные, кратковременные и особые) нагрузки, влияющие на напряженно-деформированное состояние.

К *постоянным нагрузкам* относятся:

- напряжения от собственного веса сооружения;
- вес постоянного оборудования, местоположение которого не меняется в процессе эксплуатации сооружения (ЛЭП, прожекторные вышки);
- гидростатическое давление;
- взвешивающий эффект;

Напряжения от собственного веса грунта

Природное (бытовое) давление в неоднородной плотине вычисляется по формуле:

$$\sigma_{zg} = \sum_{i=1}^n y_i \cdot h_i$$

где y_i – удельный вес i -го слоя грунта, кН/м³;

n – число слоев грунта в пределах глубины плотины;

h_i – мощность i -го слоя грунта, м.

По полученным значениям строится эпюра вертикальных напряжений в зависимости от глубины плотины, имеющая вид ломанной линии. Расчет вертикальных напряжений от собственного веса грунта выполнен в гл. 3.3., на всех створах для максимальной, средней и минимальных абсолютных высот. По получившимся данным построены графики зависимости вертикальных напряжений от собственного веса грунта с учетом взвешивающего эффекта и без него, от высоты плотины (см. Приложение Б), из которых видно, что величина вертикальных напряжений от собственного веса грунта увеличивается пропорционально увеличению величины высоты плотины (максимальное напряжение = 1391,3 кН/м³ при глубине скважины 62,34 м. (створ 3, абс. выс. 184,43 м), минимальное = 327,76 кН/м³ при глубине скважины 14,63 м. (створ 4, абс. выс. 171,56 м).

Следовательно, можно сделать вывод о том, что чем выше высота плотины, тем больше будет вертикальная нагрузка от нижележащих грунтов действовать на плотину.

Вес постоянного оборудования, местоположение которого не меняется

Нормативная нагрузка от веса конструкций и оборудования заводского изготовления определяется по известной массе m :

$$G_i = m \cdot g$$

где G_i – вес постоянного оборудования, Н; m – масса оборудования, кг; g – ускорение свободного падения, м/с².

Количество опор УНт-ДД7.2 (ЛЭП) – 50 (через каждые 40 м).

Масса одной опор УНт-ДД7.2 (ЛЭП) – 540 кг.

$$G_{\text{ЛЭП}} = 540 \cdot 50 = 27 \text{ кН.}$$

Количество прожекторных вышек ПМС-24 – 10 (через каждые 200 м).

Масса одной прожекторной вышки – 2600 кг.

$$G_{\text{ПВ}} = 2600 \cdot 10 = 26 \text{ кН.}$$

Гидростатическое давление

Силу гидростатического давления воды определяют по формулам гидравлики. Эпюры гидростатического давления на верхнюю и нижнюю грани плотины имеют форму равнобедренного прямоугольного треугольника.

Горизонтальная составляющая силы гидростатического давления воды со стороны бьефа:

$$W = \frac{\rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot h^2}{2}, \text{ кН/м}$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

h – ур. НПУ - ур. ДНО, м; НПУ (нормальный подпорный уровень) - оптимальная наивысшая отметка водной поверхности водохранилища.

- НПУ=180,63 м;
- ДНО_{макс}=144,62 м;
- ДНО_{ср}=162,625 м.

$h = \text{НПУ} - \text{ДНО}_{\text{ср}} = 180.63 - 162.625 = 18,005 \text{ м};$

$\rho_{\text{ж}} = 1,05 \text{ т/м}^3$

$$W = \frac{1,05 \cdot 10 \cdot 18^2}{2} = 1701 \text{ кН/м}$$

Взвешивающий эффект

Если грунт находится в естественном состоянии ниже уровня грунтовых вод, то на него будут действовать взвешивающее действие воды:

$$\sigma = \frac{(Y_{gr} - Y_w)}{(1 + e)} \cdot h_{gr}$$

где Y_{gr} – удельный вес грунта, кН/м^3 ; Y_w – удельный вес воды, кН/м^3 ; e – коэффициент пористости; h_{gr} – мощность слоя грунта, м.

Расчет взвешивающего эффекта выполнен в гл. 3.3. на всех створах для максимальной, средней и минимальных высот. По получившимся данным построены графики зависимости вертикальных напряжений от собственного веса грунта с учетом взвешивающего эффекта и без него, от высоты плотины (см. Приложение Б), из которых видно, что взвешивающий эффект уменьшает величину вертикального напряжения от собственного веса грунта (максимальное уменьшение напряжений от взвешивающего эффекта = $423,78 \text{ кН/м}^3$ при глубине скважины 62,34 м. (створ 3, абс. выс. 184,43 м), минимальное = $117,15 \text{ кН/м}^3$ при глубине скважины 14,63 м. (створ 4, абс. выс. 171,56 м).

К ***кратковременным нагрузкам*** следует относить:

- Нагрузка от веса людей;
- нагрузки от транспортных средств и подвижного подъемно-транспортного оборудования (погрузчиков, экскаваторов, кранов, бульдозеров, включая вес транспортируемых грузов);
- климатические (снеговые, ветровые, температурные, гололедные) нагрузки, а также сезонное промерзание и пучинистость грунтов.

Нагрузка от веса людей

Таблица 40 – Работники, задействованные на территории плотины

№ п.п.	Наименования	Кол-во
Инженерно-технические работники		
1	Начальник участка	1
2	геолог участка	3
Буровая бригада		
1	Буровой мастер	1
2	Бурильщик	1
3	Помощник бурильщика	3
Общее количество		9

Формула для расчета нагрузки от веса людей:

$$G_p = m_i \cdot n \cdot g,$$

где m_i – масса одного человека; n – количество человек; g – ускорение свободного падения (9,81 м/с²).

Средняя масса человека – 80 кг.

$$G_p = 80 \cdot 9 \cdot 10 = 7,2 \text{ кН.}$$

Нагрузки от транспортных средств и подвижного подъёмно-транспортного оборудования

Существующие механизмы хвостового хозяйства, необходимые для безопасной эксплуатации сооружений, приведены в таблице ниже:

Таблица 41 – Механизмы хвостового хозяйства

№ п.п.	Наименования	Кол-во	Обоснование	Полная масса, кг
1	Автомобиль грузопассажирский Ford Ranger	1	для объезда хвостохранилища	3200
1	А/грейдер ДЗ-180	1	для очистки дорог	12500
1	Экскаватор ЭО с емкостью ковша до 1 м ³ ЭО-5126	1	для производства земляных работ	32000
1	Бульдозер ДЭТ-250	1	для возведения дамб и планировки откосов	37500
1	Самосвал на базе а/м КАМАЗ 55111	1	доставка щебня и скального грунта на ГТС	22400
1	Буровая установка CS-1000	1	выполнение буровых работ	3290

При расчете устойчивости плотины влияние транспортной нагрузки будет учитываться понижающим коэффициентом.

Климатические нагрузки

Снеговые нагрузки

Снежный покров предохраняет почву от глубокого промерзания, регулируя тепловое состояние верхних слоев почвы.

Устойчивый снежный покров на участке изысканий образуется в конце октября – начале ноября, а разрушение покрова отмечается во 2-3 декадах апреля. Снеготаяние начинается при установлении положительных температур воздуха в дневное время уже в третьей декаде марта, продолжаясь 25-30 дней.

По весу снегового покрова участок изысканий согласно СП 20.13330.2011 [19] (карта 1) принадлежит к IV району. Расчетное значение давления снегового покрова на 1 м² горизонтальной поверхности земли: $S_g=2.4\text{кПа}$ (240 кгс/м²).

Ветровые нагрузки

Ветровая нагрузка в соответствии со СП 20.13330.11 относится к кратковременным нагрузкам, не имеющим пониженного нормативного значения.

Господствующим направлением ветров в течение года является южное (см. гл. 1.1., рис. 4). Среднегодовая скорость ветра составляет 2,5 м/с. В течение года средняя скорость ветра изменяется незначительно: в пределах от 2,4 до 2,8 м/с (см. гл. 1.1., табл. 18, рис. 5). Более сильные ветры отмечаются в мае и октябре (2,8 м/с), слабые ветры – в январе, феврале, июле и августе (2,4 м/с).

По ветровому давлению участок изысканий согласно СП 20.13330.2011 [19] (карта 3) принадлежит к I району. Нормативное значение ветрового давления: $W_0=0,23\text{кПа}$ (23 кгс/м²). Число зимних дней с силой ветра более 4-х баллов по шкале Бофорта – 6,97%.

Атмосферные осадки

Питание грунтовых вод на участке изысканий осуществляется преимущественно за счет поступления воды из пульпопроводов, притока из нижележащих водоносных горизонтов, а также за счет *инфильтрации атмосферных осадков*.

Осадки в течение года выпадают неравномерно. Средняя многолетняя величина осадков за год составляет 588 мм. Большая часть осадков приходится на теплый период года: с мая по сентябрь выпадает в среднем 55 % годовой нормы. Минимальное среднемесячное количество осадков выпадает в марте и составляет 27 мм, максимальное – в июле – 85 мм (см. гл. 1.1. табл. 5, рис. 3). Прогнозируемое повышение уровня грунтовых вод в периоды снеготаяния и в дождливые сезоны года находится на уровне 0,5-0,7 м.

Для расчета изменения взвешивающего эффекта от изменения залегания уровня грунтовых вод были взяты самое близкое к дневной поверхности и самое глубокое от дневной

поверхности залегание уровня грунтовых вод (max=14,92 м – створ 3, абс. высота 184,43 м., min=1,10 м – створ 2, абс. высота 172,10 м.). По полученным данным построены графики зависимости взвешивающего эффекта от уровня подземных вод (рис. 27-28).

Разница значений вертикальных напряжений с учетом взвешенного эффекта между фактическим и прогнозируемым уровнями подземных вод (0,7 м) составляет:

- 5,38 кПа при максимальной глубине залегания уровня подземных вод;
- 5,91 кПа – при минимальном.

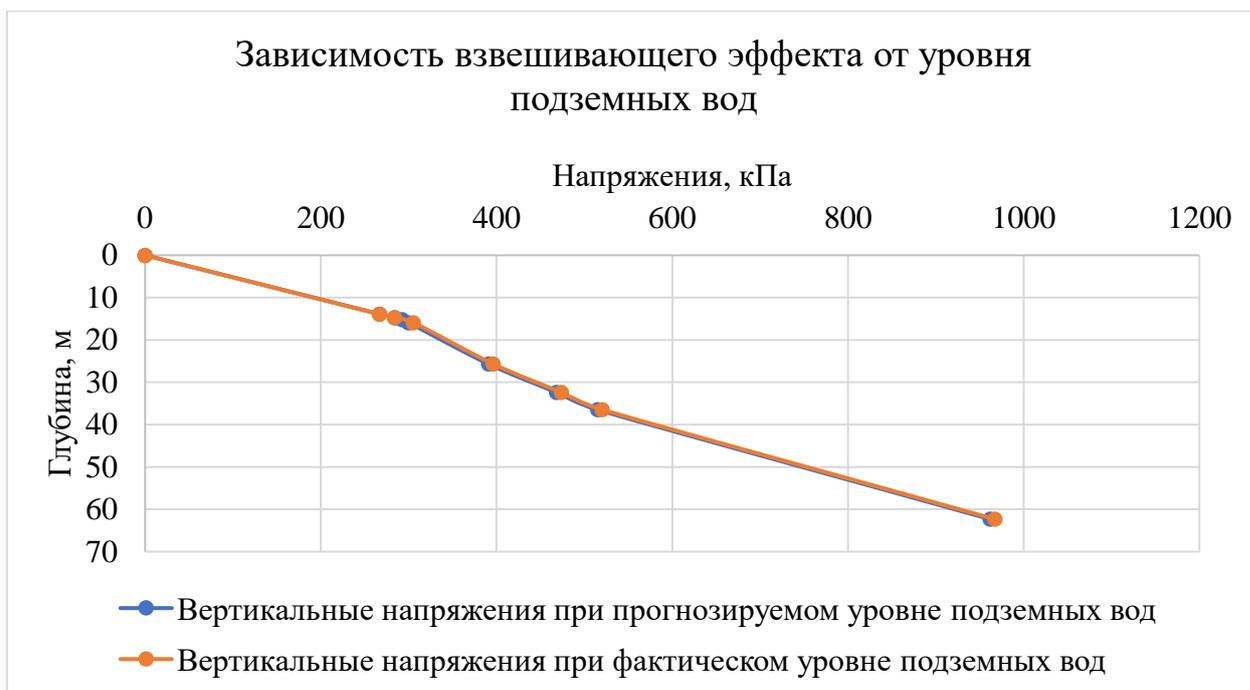


Рис. 27. График зависимости взвешивающего эффекта от уровня подземных вод (створ 3, абс. высота 184,43 м).

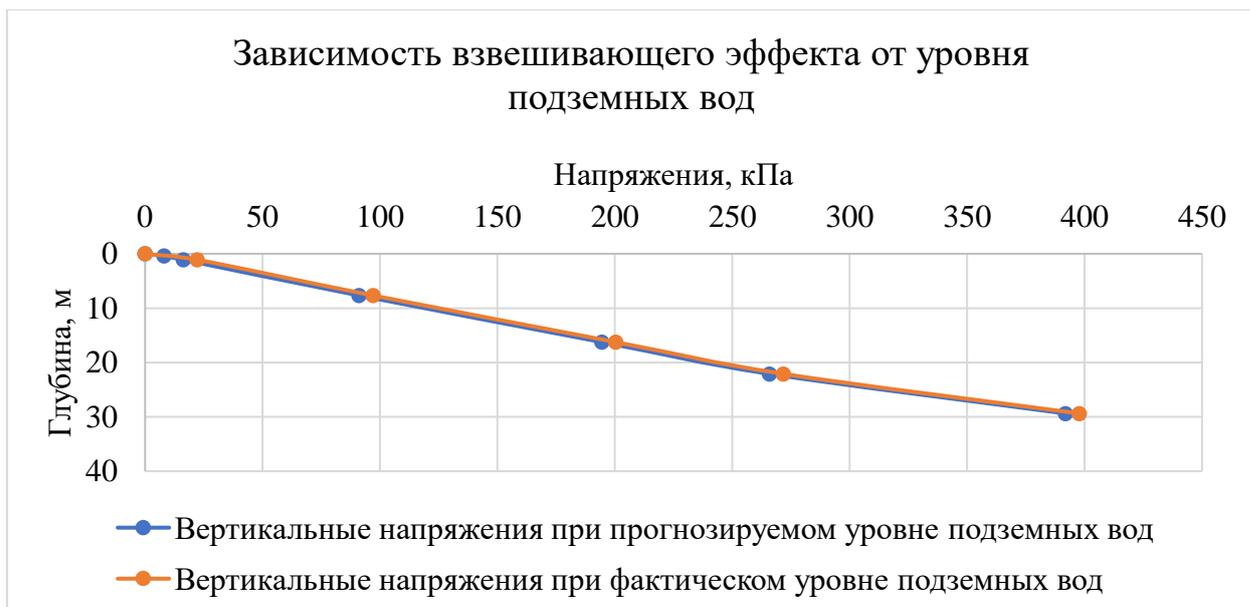


Рис. 28. График зависимости взвешивающего эффекта от уровня подземных вод (створ 2, абс. высота 172,10 м).

Температурные нагрузки

Определяются для года со средней амплитудой колебаний среднемесячных температур. Эти воздействия заключаются в определении напряжений в теле плотины вследствие колебаний температуры наружного воздуха.

Самым теплым месяцем в районе обследования является июль со средней месячной температурой плюс 16,1°С, самым холодным – январь с температурой минус 11,9° С. Годовая амплитуда среднемесячной температуры составляет 28,0° С. Среднегодовое значение температуры воздуха – плюс 1,5° С (см. гл. 1.1., табл. 1, рис. 2). Отрицательные среднемесячные температуры воздуха удерживаются с ноября по март, включительно.

Абсолютный минимум температуры воздуха составляет минус 44,5°С. Такая температура была зафиксирована в 1966 г. Абсолютный максимум температуры воздуха составляет 33,6°С. Данная температура была зафиксирована в 1972 г. Амплитуда температуры между абсолютным максимумом и минимумом составляет 78,1°С.

Продолжительность периода со среднесуточной температурой выше 0°С превышает продолжительность периода с отрицательными температурами и составляет 191 день (см. гл. 1.1., табл. 2). Средняя дата перехода среднесуточной температуры через 0°С в сторону повышения - 11 апреля. Как правило, вслед за этим переходом начинается активное снеготаяние и развитие паводка. Переход температуры через 0°С в сторону понижения происходит на стыке октября и ноября.

Средняя максимальная температура самого теплого месяца: +21,5°С

Средняя минимальная температура самого холодного месяца: -12,0°С

Расчетная температура наиболее холодной пятидневки: -31,6°С

Гололедные нагрузки

К гололедно-изморозевым явлениям относятся гололед и изморозь, фиксируемые как атмосферные явления.

По гололедным нагрузкам участок изысканий согласно СП 20.13330.2011 [19] (карта 4) принадлежит ко II району. Расчетная толщина стенки гололеда на элементах кругового сечения диаметром 10 мм, расположенных на высоте 10 м над поверхностью земли, возможная 1 раз в 5 лет, составляет 20 мм.

Сезонное промерзание грунтов

Расчет глубины сезонного промерзания произведен согласно СП 22.13330.2011 [20]. Глубина промерзания грунтов с учетом среднемесячных отрицательных температур по ГМС «Калевала» принимается равной:

- для насыпного грунта - 1,96 м;
- для супесей, песков мелких и пылеватых - 1,86 м;
- для песков средней крупности и крупных – 1,94 м;
- для песков гравелистых – 2,10 м;
- для крупнообломочных грунтов – 2,30 м.

При расчетах следует пользоваться следующими данными СП 131.13330.2012 [26]:

-средняя температура наружного воздуха наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 – минус 32,0°С;

- средняя температура наружного воздуха наиболее холодных суток обеспеченностью 0,92 – минус 29,0°С;

Пучинистость

Пучинистость пылевато-глинистых, песчаных и крупнообломочных грунтов рассчитана согласно СП 22.13330.2011 [20].

Пылевато-глинистые грунты на участке изысканий по степени пучинистости подразделяются согласно СП 22.13330.2011 [20]:

- ИГЭ-9 – сильнопучинистые;
- ИГЭ-10 –слабопучинистые;
- ИГЭ-17 – пучинистые.

Песчаные грунты по степени пучинистости подразделяются согласно СП 22.13330.2011 [20]:

- ИГЭ-1 – пучинистые;
- ИГЭ-2 – пучинистые;
- ИГЭ-3 – слабопучинистые;
- ИГЭ-4 – слабопучинистые;
- ИГЭ-5 – слабопучинистые;
- ИГЭ-6 – непучинистые;
- ИГЭ-7 – слабопучинистые;
- ИГЭ-14 – слабопучинистые;

- ИГЭ-15 – пучинистые.

Крупнообломочные грунты по степени пучинистости подразделяются согласно СП 22.13330.2011 [20]:

- ИГЭ-11 – преимущественно непучинистые;
- ИГЭ-12 – непучинистые;
- ИГЭ-18 – слабопучинистые.

К *особым нагрузкам* следует относить:

- а) сейсмические воздействия;
- б) взрывные воздействия;

Сейсмические воздействия

В соответствие с СП 20.13330.2011 [19] грунтовые условия исследуемого района по сейсмическим свойствам относятся к III категории.

Интенсивность сейсмических воздействий (сейсмичность) для района следует принимать на основе комплекта карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-2015, утвержденных Российской академией наук.

Интенсивность сейсмического воздействия (сейсмичность района) согласно СП 14.13330.2014 [18]:

- территория не сейсмична по карте ОСР-2015-А;
- территория не сейсмична по карте ОСР-2015-В;
- 6 баллов по карте ОСР-2015-С.

Сейсмичность района техногенного характера - связана с взрывными работами, проводимыми на карьерах АО «Карельский окатыш».

Взрывные воздействия

При массовых взрывах в вертикальных колонковых скважинах и в штольнях частичное дробление пород распространяется на расстояние до 60—70 м от места взрыва. При массовых взрывах под действием взрывной волны изменяется напряженное состояние массива, что уменьшает силы трения по наиболее слабой поверхности и при небольшом запасе устойчивости может привести к внезапным обрушениям бортов.

Расстояние, на котором колебания грунта, вызываемые однократным взрывом сосредоточенного заряда взрывчатых веществ, становятся безопасными для зданий и сооружений, согласно Приказу «Об утверждении федеральных норм и правил в области

промышленной безопасности "Правила безопасности при взрывных работах" (с изменениями на 30 ноября 2017 года)» [2], рассчитывается по формуле:

$$r_c = K_z \cdot K_c \cdot \alpha \cdot \sqrt[3]{Q},$$

где r_c - расстояние от места взрыва до охраняемого здания (сооружения), м;

K_z - коэффициент, зависящий от свойств грунта в основании охраняемого здания (сооружения);

K_c - коэффициент, зависящий от типа здания (сооружения) и характера застройки;

α - коэффициент, зависящий от условий взрывания; Q - масса заряда, кг.

Таблица 42 - Значения коэффициента K_z

Скальные породы плотные, ненарушенные	5
Скальные породы, нарушенные, неглубокий слой мягких грунтов на скальном основании	8
Необводненные песчаные и глинистые грунты глубиной более 10 м	12
почвенные обводненные грунты и грунты с высоким уровнем грунтовых вод	15
Водонасыщенные грунты	20

Таблица 43 - Значения коэффициента K_c

Одиночные здания и сооружения производственного назначения с железобетонным или металлическим каркасом	1
Одиночные здания высотой не более двух-трех этажей с кирпичными и подобными стенами	1,5
Небольшие жилые поселки	2

Таблица 44 - Значения коэффициента α

Камуфлетный взрыв и взрыв на рыхление	1
Взрыв на выброс	0,8
Взрыв полуглубленного заряда	0,5

Из таблиц выше принимаем, что $K_z=20$, $K_c=2$, $\alpha=1$. Масса заряда (Q)=10000 кг.

$$r_c = 20 \cdot 2 \cdot 1 \cdot \sqrt[3]{10000} = 40 \cdot 21,54 = 861,6 \text{ м}$$

Радиус сейсмической зоны влияния буровзрывных работ равен 861,6 м. Пионерная плотина находится на расстоянии около 9500 м от ближайшего карьера «Центральный», где ведутся буровзрывные работы. Т.к. плотина находится дальше этого радиуса, то буровзрывные работы не оказывают влияния на устойчивость ее сооружения.

4.3. Методика выполнения расчетов устойчивости

Для выполнения расчета устойчивости плотины была использована демонстрационная версия программы «RocScience Slide2». Программа и возможность работы с ней предоставлена Санкт-Петербургским Горным университетом.

«RocScience» — это программная система конечно-элементного анализа, используемая для решения задач инженерной геотехники и проектирования. Представляет собой пакет вычислительных программ для конечно-элементного расчёта напряжённо-деформированного состояния сооружений, фундаментов и оснований [59].

«Slide2» — это 2D-программа устойчивости откоса для оценки коэффициента безопасности или вероятности разрушения, круглых и некруглых поверхностей разрушения в почве или скальных откосах. Slide2 проста в использовании, можно быстро и легко создавать и анализировать сложные модели. Внешняя нагрузка, грунтовые воды и поддержка могут быть смоделированы различными способами.

«Slide2» анализирует устойчивость поверхностей скольжения с помощью вертикальных или невертикальных методов предельного равновесия среза, таких как метод Бишопа, Ямбу, Спенсера и др. Отдельные поверхности скольжения могут быть выбраны пользователем, или может быть выполнен автоматический поиск для определения местоположения критической поверхности скольжения для заданного угла наклона. Пользователи могут также проводить детерминистический (фактор безопасности) или вероятностный (вероятность отказа) анализ [60].

Вероятностная устойчивость склона со «Slide2»

«Slide2» также обладает обширными возможностями вероятностного моделирования и анализа. Почти все входные параметры модели можно определить как случайные переменные, что позволяет рассчитать вероятность отказа или индекс надежности. Также может быть проведен анализ чувствительности.

Создание модели

С легкостью создавайте и редактируйте сложную геометрию модели. Более десятка моделей прочности материала для почвы и горных пород (например, анизотропные, обобщенные Ноек-Brown, SHANSEP). Гибкие возможности импорта геометрии из различных форматов файлов, включая DXF, RS2, Slide3 и многие другие.

Методы анализа

«Slide2» предлагает все стандартные отраслевые методы предельного равновесия для анализа устойчивости откоса, в том числе:

- метод Феллениуса;
- упрощённый метод Бишопа;
- упрощённый метод Янбу;
- уточнённый метод Янбу;
- метод Спенсера;
- метод Моргенштерна-Прайса;
- метод Сарма.

Анализ фильтрации

«Slide2» превосходит все ожидания благодаря встроенному анализу конечных элементов фильтрации грунтовых вод, который поставляется в стандартной комплектации. В программе вы можете проводить анализ фильтрации в условиях насыщенного/ненасыщенного, стационарного или переходного потока. Функция может использоваться независимо или в сочетании с анализом устойчивости уклона.

Вероятностный анализ

Вероятностный анализ позволяет присвоить статистические распределения любому входному параметру, расширенную корреляцию параметров и анализ пространственной вариабельности.

«Slide2» включает в себя обширные возможности вероятностного анализа для статистического анализа устойчивости склонов. Практически любой входной параметр в модели может быть определен как случайная переменная.

Вероятностный анализ также может быть использован для проведения обратного анализа для определения свойств материала или условий грунтовых вод. Если у вас есть откос, который уже вышел из строя, вы можете использовать геометрию отказа и неявный фактор безопасности для определения свойств материала или условий грунтовых вод.

Независимо от того, требует ли ваша текущая работа проведения вероятностного анализа или вы просто хотите больше уверенности в своей конструкции, выполнение вероятностного анализа только улучшит анализ устойчивости откоса. Лучше всего, что вероятностные результаты могут быть легко экспортированы в Excel.

«Slide2» также поставляется с анализом пространственной вариабельности, что позволяет легко учитывать вариабельность в каждом материале.

Поддержка грунтов

В «Slide2» можно смоделировать многочисленные типы армирования откосов, в том числе:

- торцевая анкерная опора (например, анкерные болты для скальных пород с механическим концом);
- геотекстиль (также георешетки или полосовая арматура);
- врезанные лейбциги / наземные якоря;
- сваи / микросваи.

Оптимизация изменения поверхности

В «Slide2» используется эффективный метод поиска скользящей поверхности, известный как оптимизация поверхностного изменения («Surface Altering» (SA)). SA является мощным инструментом для получения более низких коэффициентов безопасности путем изменения геометрии заданной поверхности скольжения. Как было показано, в большинстве случаев этот метод намного быстрее (в 10-15 раз), чем алгоритм Монте-Карло, и является новым методом поиска по умолчанию для нециркулярных поверхностей скольжения.

Для проведения расчетов в программе «Slide2» задают физико-механические свойства грунтов – удельный вес грунта, сцепление и угол внутреннего трения, геометрические характеристики плотины, уровень подземных вод, а также начальные и граничные условия.

Краткая последовательность выполнения расчетов в программе «Slide2»:

- изображается геометрия сооружения и уровня грунтовых вод;
- полученный массив разделяется на ИГЭ, согласно инженерно-геологическим разрезам;
- каждому ИГЭ присваиваются его физико-механические свойства;
- после этого накладываются вертикальная и горизонтальная нагрузки;
- выполняется автоматический поиск поверхности скольжения;
- выполняется расчет устойчивости;
- в результате на экран выводится модель расчета устойчивости с круглоцилиндрической поверхностью, призмой обрушения и коэффициентом запаса устойчивости сооружения.

Расчет устойчивости плотины

Расчет устойчивости плотины проводился по линии разреза створов №1 и 4 (см. Приложение А), как наиболее опасные места с точки зрения надежности сооружения.

Участок изысканий, как было сказано выше, характеризуется 22 инженерно-геологическими элементами, физико-механические характеристики которых, необходимые для расчета устойчивости, приведены в таблице 37 (см. гл. 3.4.).

Поверхность скольжения была автоматически сконструирована в соответствии с горно-геологическими условиями створа плотины. Согласно разрезу, коренные кристаллические породы перекрыты четвертичными отложениями. Соответственно, поверхность скольжения будет проходить по контакту скальных и осадочных пород.

Для расчетов устойчивости плотины в программе «Slide2» реализованы инженерные методы расчетов устойчивости (Бишопа, Янбу и Спенсера) и алгоритм решения задачи по поиску наиболее опасной поверхности сдвига.

Все вышеуказанные инженерные методы оперируют с расчлененной на вертикальные элементы призмой обрушения с произвольной или круглоцилиндрической поверхностью сдвига и рекомендованы СП 39.13330.2012 [22].

Расчеты общей устойчивости низового откоса плотины выполнены по первой группе предельных состояния (потеря несущей способности системы «сооружение–основание») для поверхностей сдвига, отвечающих минимальным значениям коэффициента устойчивости в соответствии с СП 39.13330.2012 [22].

Расчеты устойчивости выполнены для условий плоской задачи, для круглоцилиндрических поверхностей сдвига. Расчетная модель включает в себя профиль сооружения с привязкой к конкретному участку основания в наиболее опасном (с точки зрения надежности сооружения) месте с учетом технологии возведения сооружения.

Программа «Slide2» использует для вычисления коэффициента устойчивости метод снижения параметров прочности грунта.

В соответствии с СП 58.13330.2012 [24] при расчетах гидротехнических сооружений, их конструкций и оснований надлежит соблюдать следующее условие, обеспечивающее недопущение наступления предельных состояний:

$$\gamma_{lc} F \leq \frac{R}{\gamma_n},$$

где γ_{lc} – коэффициент сочетания нагрузок, принимаемый при расчетах по первой группе предельных состояний: для основного сочетания нагрузок и воздействий в период нормальной эксплуатации – 1,00; то же, для периода строительства и ремонта – 0,95;

F – расчетное значение обобщенного силового воздействия (сила, момент, напряжение), деформации или другого параметра, по которому производится оценка предельного состояния, определенное с учетом коэффициента надежности по нагрузке γ_f ;

R – расчетное значение обобщенной несущей способности, деформации или другого параметра (при расчетах по первой группе предельных состояний – расчетное значение; при расчетах по второй группе предельных состояний – нормативное значение), устанавливаемого нормами проектирования отдельных видов гидротехнических сооружений, определенное с учетом коэффициентов надежности по материалу γ_m или грунту γ_g и условий работы γ_c ;

γ_n – коэффициент надежности.

В соответствии с СП 39.13330.2012 (СНиП 2.06.05-84*) [22] при поиске опасной поверхности сдвига для коэффициента устойчивости K_s может быть использована зависимость:

$$K_s = \frac{R}{F} \geq \frac{\gamma_n \gamma_{lc}}{\gamma_c},$$

где R – расчётное значение обобщённой несущей способности системы «сооружение-основание»; F – расчётное значение обобщенного силового воздействия; γ_n – коэффициент надежности $\gamma_n = 1.2$ для сооружений II класса; γ_c – коэффициент условий работ (для методов, удовлетворяющих условиям равновесия – 1,0, для упрощенных методов расчета – 0,95); γ_{lc} – коэффициент сочетания нагрузок.

Нормативный коэффициент устойчивости для сооружений II класса для основного сочетания нагрузок и воздействий в период нормальной эксплуатации:

для упрощенных методов расчета:

$$K_s = \frac{1,2 \cdot 1,0}{0,95} = 1,26$$

точных методов расчета – методов, удовлетворяющих условиям равновесия (по программе «Slide2»):

$$K_s = \frac{1,2 \cdot 1,0}{1,0} = 1,2$$

Нормативный коэффициент устойчивости для сооружений II класса при особой нагрузке для упрощенных методов расчета:

$$K_s = \frac{1,2 \cdot 0,95}{0,95} = 1,2$$

Нормативный коэффициент устойчивости для сооружений II класса при особой нагрузке для методов, удовлетворяющих условиям равновесия:

$$K_s = \frac{1,2 \cdot 0,95}{1,0} = 1,14$$

Генеральное заложение низового откоса первичной плотины 1:2-1:2,5, заложение верхового откоса 1:2. В расчетных схемах принято 9 ИГЭ, отличных по своим физико-механическим характеристикам. Расчетные характеристики грунтов приняты по данным инженерно-геологических изысканий [44] и лабораторным анализам [37].

Основным вариантом расчетной модели сооружения рассматривается вариант, когда принято, что в основании хвостохранилища залегают скальные грунты – гнейсо-граниты.

Расчет устойчивости плотины по фактическим данным

Расчет проводился по данным инженерно-геологических изысканий [44], физико-механические свойства грунтов приняты по результатам лабораторных исследований [39], сводная таблица которых приведена в гл. 3.4. Средняя отметка гребня – 182,3 м.

Результаты расчета устойчивости плотины по фактическим данным в расчетных створах приведены на рисунках 29-30.

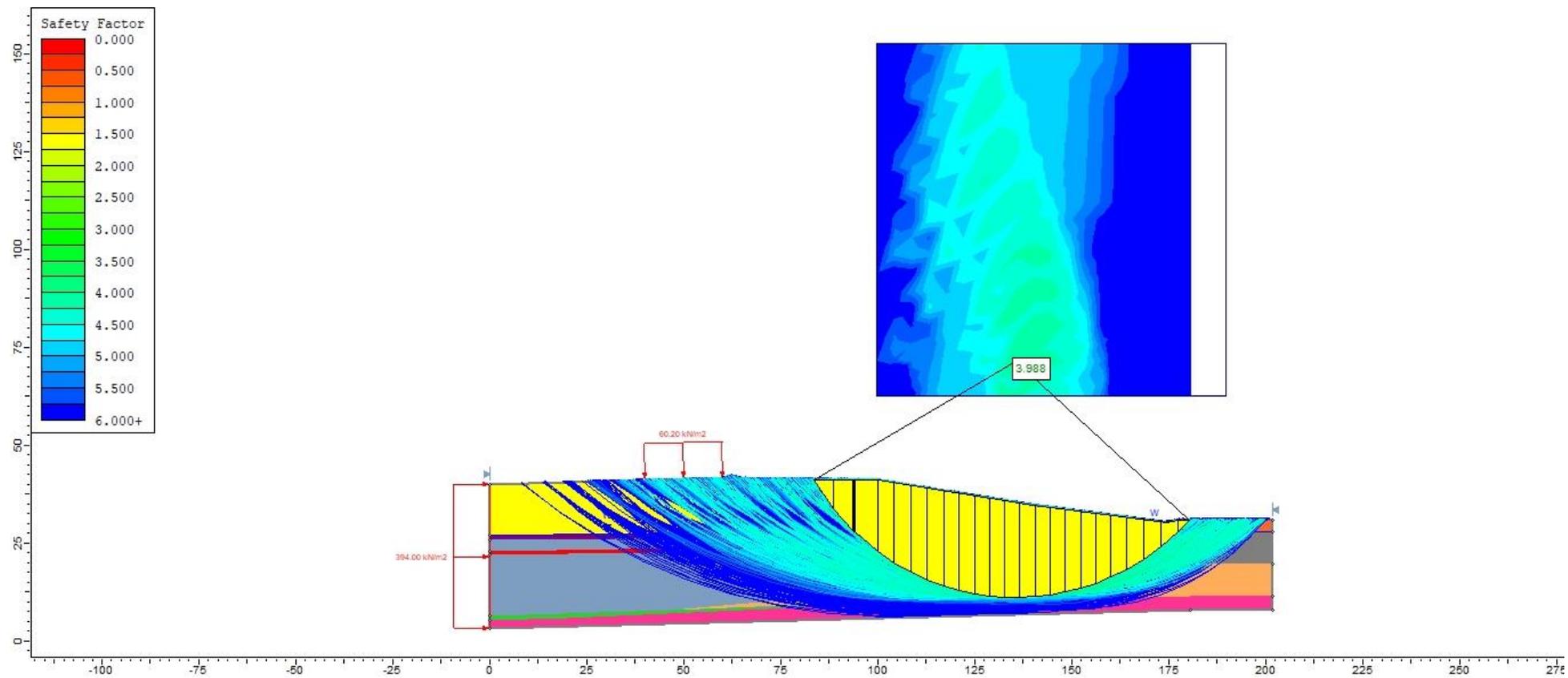


Рис. 29. Расчет устойчивости плотины (створ №1) по методу Ямбу.

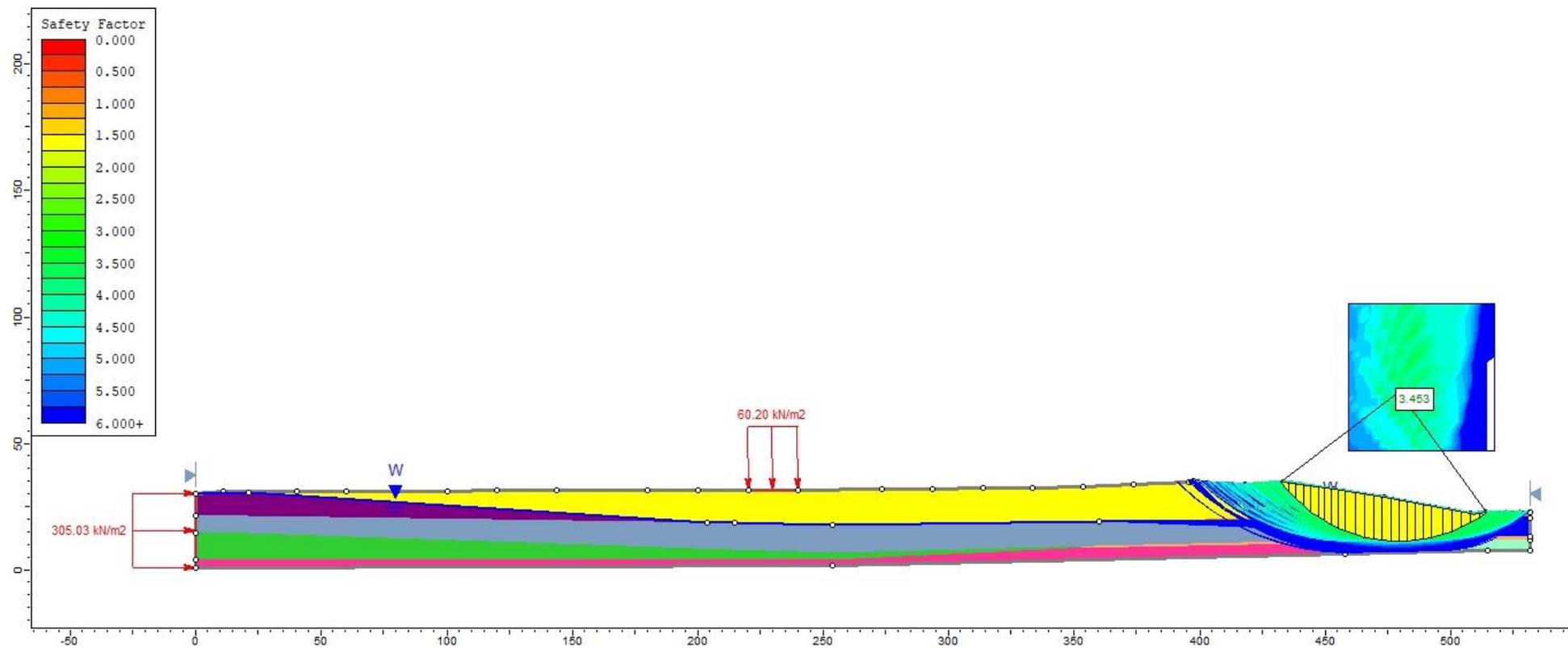


Рис. 30. Расчет устойчивости плотины (створ №4) по методу Бишопа.

Коэффициент запаса устойчивости (КЗУ) по методам представлен в таблице ниже:

Таблица 45 – Результаты расчетов устойчивости по фактическим данным

КЗУ	Метод Бишопа	Метод Ямбу	Метод Спенсера
Створ 1	4,429	3,988	4,426
Створ 4	3,453	3,165	3,457

Расчеты устойчивости плотины при наращивании

Наращивание плотины предусматривается до средней отметки 192,3 м (на 10 м) отсыпкой поперечных ограждающих дамб из крупнозернистых хвостов на намытый пляж дамбы предыдущего яруса. Для расчета устойчивости при наращивании плотины, значения физико-механических свойств хвостов приняты следующими:

- удельный вес грунта (γ_{uns}) = 21,50 кН/м³;
- сцепление (c) = 8 кПа;
- угол внутреннего трения (φ) = 33°.

Результаты расчета устойчивости плотины при наращивании в расчетных створах приведены на рисунках 31-32.

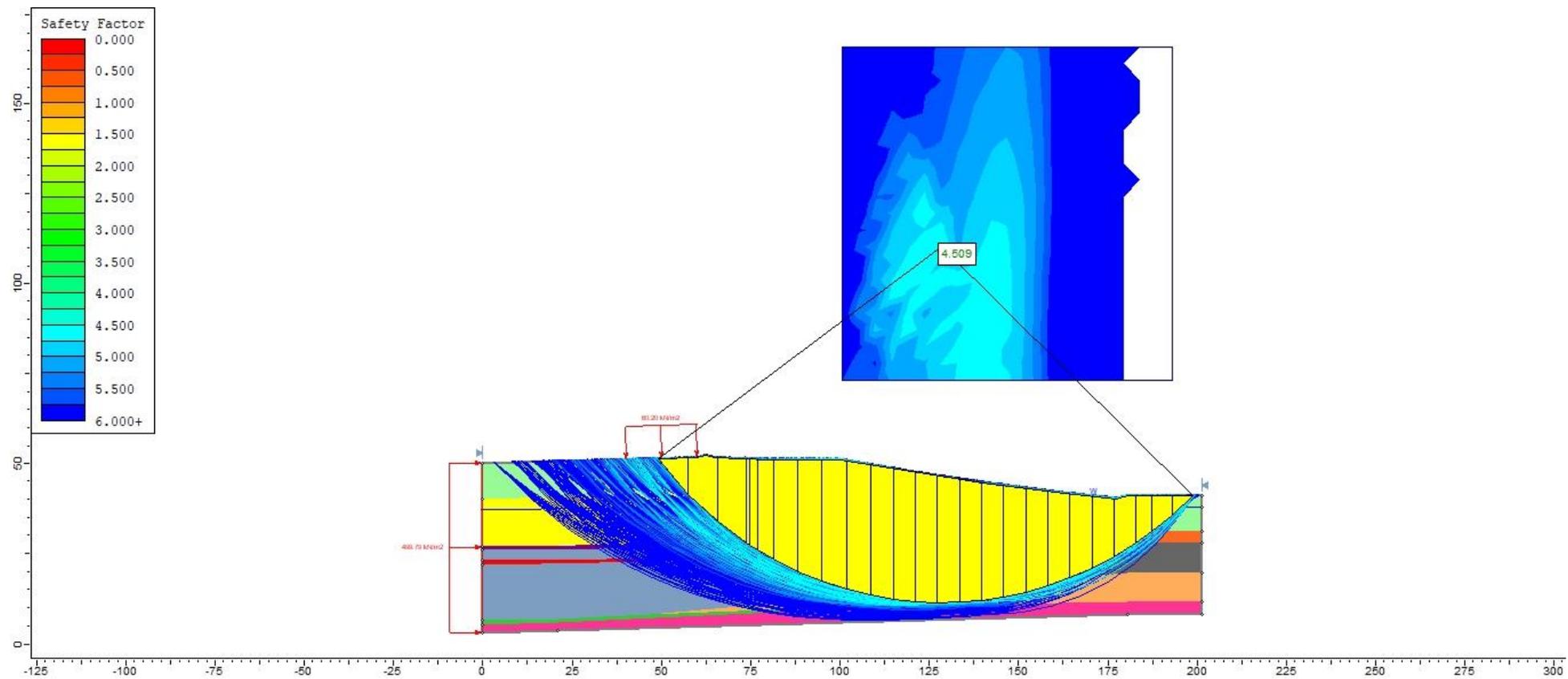


Рис. 31. Расчет устойчивости плотины (створ №1) по методу Ямбу.

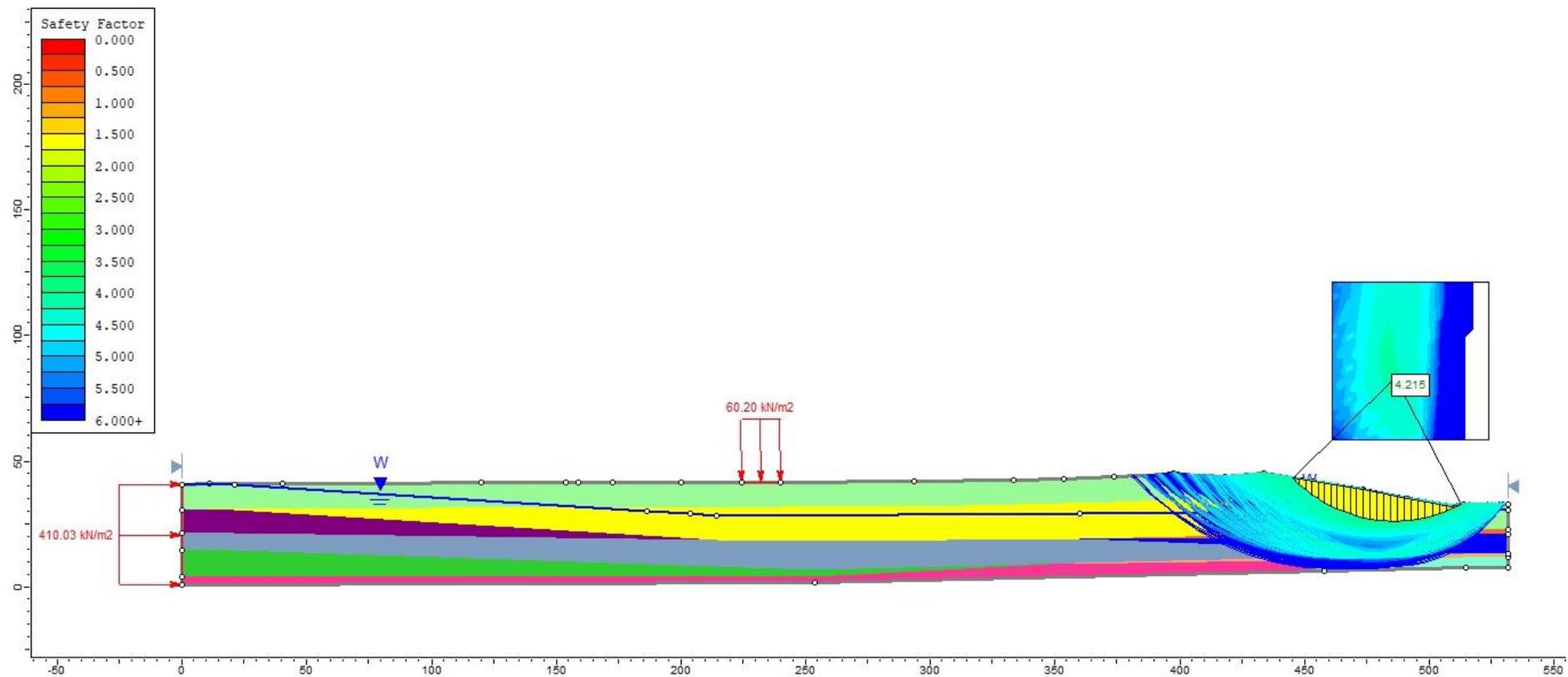


Рис. 32. Расчет устойчивости плотины (створ №4) по методу Бишопа.

Коэффициент запаса устойчивости по методам:

Таблица 46 – Результаты расчетов устойчивости при наращивании плотины

КЗУ	Метод Бишопа	Метод Янбу	Метод Спенсера
Створ 1	4,952	4,609	4,951
Створ 4	4,215	3,659	4,214

4.1.4. Результаты расчетов устойчивости

Расчетные исследования устойчивости плотины хвостохранилища проводились с использованием программного комплекса «RocScience Slide2». Данная программа предназначена для определения минимального коэффициента устойчивости сооружения, который определяется по следующим методам:

- метод Бишопа;
- метод Ямбу;
- метод Спенсера и др.

В программе предусмотрен автоматический поиск наиболее опасной поверхности обрушения по методу «Surface Altering», который заключается в варьировании параметров кривой обрушения (x_0 , y_0 , R_0) и определении кривой обрушения с минимальным коэффициентом устойчивости.

Расчеты устойчивости подтвердили, что при проектном наращивании на 10 м (до средней отметки 192,3 м) в расчетных створах (№1 и 4) позволит сохранить устойчивость сооружения при условии сохранения физико-механических характеристик техногенных грунтов в теле плотины, а также технологии ее возведения и эксплуатации. Минимальные расчетные коэффициенты устойчивости плотины получились больше нормативных для точных и упрощенных методов расчета.

Физико-механические характеристики хвостов обогащения позволяют использовать их для строительства вторичных ограждающих дамб (дамб обвалования).

При этом существенно сокращается дальность автомобильных перевозок, а, следовательно, и затраты на перевозку грунта для строительства вторичных дамб обвалования.

Для получения наиболее точного коэффициента запаса устойчивости вводится поправочный коэффициент безопасности (Кб), учитывающий динамическое воздействие механизмов, колебания уровней вод и различные неучтенные факторы (в данной работе принят равным 0,85). Полученный в результате расчетов КЗУ умножается на Кб для получения итогового коэффициента запаса устойчивости. Его расчет приведен в таблицах ниже:

Таблица 47 – Расчет итогового коэффициента устойчивости по фактическим данным

Устойчивость по фактическим данным				Кб	Итоговый КЗУ по фактическим данным		
КЗУ	Метод Бишопа	Метод Ямбу	Метод Спенсера		Метод Бишопа	Метод Ямбу	Метод Спенсера
Створ 1	4,429	3,988	4,426	0,85	3,765	3,390	3,762
Створ 4	3,453	3,165	3,457		2,935	2,690	2,938

Таблица 48 – Расчет итогового коэффициента устойчивости при наращивании плотины

Устойчивость при наращивании плотины				Кб	Итоговый КЗУ при наращивании плотины		
КЗУ	Метод Бишопа	Метод Янбу	Метод Спенсера		Метод Бишопа	Метод Янбу	Метод Спенсера
Створ 1	4,952	4,609	4,951	0,85	4,209	3,918	4,208
Створ 4	4,215	3,659	4,214		3,583	3,110	3,582

По результатам выполнения расчета устойчивости можно сделать следующие выводы:

- плотина хвостохранилища в расчетных створах (№1 и 4), эксплуатируемая на средней отметке 182,3 м - устойчива по фактическим данным (т.е. на данный момент);
- плотина хвостохранилища в расчетных створах (№1 и 4), при проектном наращивании до средней отметки 192,3 м (на 10 м) – устойчива.

4.2. Выводы по главе 4.

Пионерная плотина расположена в 8 км от производственной площадки АО «Карельский Окамыш», конструктивно представляет собой однородную насыпную каменно-земляную плотину из моренного грунта, с пригрузкой низового и верхового откосов скальным грунтом толщиной 1-2 м, и относится ко II классу ГТС [1].

За время эксплуатации Пионерной плотины (с 1982 г.) была проведена пригрузка откосов скальными грунтами шириной 2м, а также возведены вторичные дамбы обвалования до отметки 182,3 м. Отсыпка производилась из крупнозернистых хвостов (свойства грунта приведены в гл. 3.3). Насыпные грунты слежавшиеся, отсыпаны с применением гидромеханизации. Возраст отсыпки более 10 лет. Процессы самоуплотнения насыпных грунтов в верхней части насыпных грунтов не завершены.

Наращивание плотины в связи с увеличением сброса пульпы в хвостохранилище, и соответственно для увеличения его емкости, планируется выполнить на 10 м в среднем до отметки 192,3 м из крупнозернистых хвостов, как и в подобных работах ранее.

Согласно расчетам, приведенным в табл. 39, такое наращивание увеличит:

- вертикальные напряжения без взвешивающего эффекта на 215 кПа (до 1606,3);
- вертикальные напряжения с учетом взвешивающего эффекта на 133,59 кПа (до 1101,1);
- горизонтальные напряжения на 105 кПа (до 759,57).

Для дальнейшего расчета устойчивости плотины и построения наиболее опасной поверхности скольжения, согласно проведенному обзору и анализу существующих методов расчета, предлагается рассмотреть следующие методы: Бишопа, Ямбу и Спенсера.

На гидротехнические сооружения, согласно СП 20.13330.2011 [19], в зависимости от продолжительности действия нагрузок следует различать *постоянные* и *временные* (длительные, кратковременные и особые) нагрузки, влияющие на напряженно-деформированное состояние.

Величина вертикальных напряжений от собственного веса грунта увеличивается пропорционально увеличению величины высоты плотины (максимальное напряжение = 1391,3 кН/м³ при глубине скважины 62,34 м. (створ 3, абс. выс. 184,43 м), минимальное = 327,76 кН/м³ при глубине скважины 14,63 м. (створ 4, абс. выс. 171,56 м).

Вес постоянного оборудования равняется 53 кН. Гидростатическое давление по расчетам составляет 1701 кН/м. Взвешивающий эффект уменьшает величину вертикального напряжения от собственного веса грунта (максимальное уменьшение напряжений от взвешивающего эффекта = 423,78 кН/м³ при глубине скважины 62,34 м. (створ 3, абс. выс.

184,43 м), минимальное = 117,15 кН/м³ при глубине скважины 14,63 м. (створ 4, абс. выс. 171,56 м).

Нагрузка от веса людей = 7,2 кН. Расчетное значение давления снегового покрова на 1 м² горизонтальной поверхности земли: $S_g=2.4$ кПа (240 кгс/м²). По ветровому давлению участок изысканий согласно СП 20.13330.2011 (карта 3) принадлежит к I району. Нормативное значение ветрового давления: $W_0=0,23$ кПа (23 кгс/м²). Число зимних дней с силой ветра более 4-х баллов по шкале Бофорта – 6,97%.

Прогнозируемое повышение уровня грунтовых вод в периоды снеготаяния и в дождливые сезоны года находится на уровне 0,5-0,7 м. Разница значений вертикальных напряжений с учетом взвешенного эффекта между фактическим и прогнозируемым уровнями подземных вод (0,7 м) составляет:

- 5,38 кПа при максимальной глубине залегания уровня подземных вод;
- 5,91 кПа – при минимальном.

По гололедным нагрузкам участок изысканий согласно СП 20.13330.2011 [19] (карта 4) принадлежит ко II району. Расчетная толщина стенки гололеда на элементах кругового сечения диаметром 10 мм, расположенных на высоте 10 м над поверхностью земли, возможная 1 раз в 5 лет, составляет 20 мм.

Глубина промерзания грунтов с учетом среднемесячных отрицательных температур по ГМС «Калевала» принимается равной:

- для насыпного грунта - 1,96 м;
- для супесей, песков мелких и пылеватых - 1,86 м;
- для песков средней крупности и крупных – 1,94 м;
- для песков гравелистых – 2,10 м;
- для крупнообломочных грунтов – 2,30 м.

Радиус сейсмической зоны влияния буровзрывных работ равен 861,6 м. Пионерная плотина находится на расстоянии около 9500 м от ближайшего карьера «Центральный», где ведутся буровзрывные работы. Т.к. плотина находится дальше этого радиуса, то буровзрывные работы не оказывают влияния на устойчивость ее сооружения.

Для выполнения расчета устойчивости плотины была использована демонстрационная версия программы «RocScience Slide2». «RocScience» — это программная система конечно-элементного анализа, используемая для решения задач инженерной геотехники и проектирования. Представляет собой пакет вычислительных программ для конечно-

элементного расчёта напряжённно-деформированного состояния сооружений, фундаментов и оснований [59].

По результатам выполнения расчета устойчивости можно сделать следующие выводы:

- плотина хвостохранилища в расчетных створах (№1 и 4), эксплуатируемая на средней отметке 182,3 м - устойчива по фактическим данным (т.е. на данный момент);
- плотина хвостохранилища в расчетных створах (№1 и 4), при проектном наращивании до средней отметки 192,3 м (на 10 м) – устойчива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения работ была достигнута цель и выполнены все поставленные задачи.

Выполненный в магистерской диссертации обзор показал, что эксплуатация хвостохранилища, и входящих в него сооружений, осуществляется согласно правилам безопасности, в соответствии с проектом эксплуатации и рабочим проектом сооружения.

Техническое состояние гидротехнических сооружений хвостового хозяйства АО «Карельский окатыш» соответствует требованиям действующих нормативных и законодательных актов в области промышленной безопасности Российской Федерации, обеспечивают безаварийную работу и защиту эксплуатационного персонала от чрезвычайных ситуаций.

Технология складирования хвостов по результатам проведенного анализа соответствует рабочему проекту и проекту эксплуатации хвостового хозяйства. Для складирования хвостов используется гидротранспортная система доставки в пульпонасосную станцию, откуда часть хвостов перекачивается в хвостохранилище, где пульпа осаждается, а другая часть подается на сгущение и затем перекачивается в хвостохранилище. Твердая фаза уплотняется под собственным весом и консолидируется, а осветленная вода сгустителей подается обратно в технологический процесс.

На основании проведенного обзора и дополнительного изучения проектной документации, эксплуатационно-техническое состояние хвостохранилища АО «Карельский окатыш» в целом оценивается как работоспособное.

В геологическом строении района изысканий («Пионерная плотина») пределах вскрытых скважинами глубин принимают участие биогенные (bQ_{IV}), техногенные (tQ_{IV}), верхневалдайские ледниковые ($gQ_{III_{vd}}$) отложения четвертичного возраста и коренные архейские отложения (AR) [44].

Всего в процессе полевых и камеральных работ был выделено 22 инженерно-геологических элемента (ИГЭ), условия залегания и развития которых отражено на инженерно-геологических разрезах и показаны в колонках геологических выработок (см. Приложение Б).

По результатам статистической обработки физико-механических свойств составлена сводная таблица расчетных физико-механических характеристик грунтов дамбы, значения которых использованы для выполнения расчета устойчивости дамбы.

По результатам визуальной оценки местности и результатам бурения признаки опасных инженерно-геологических процессов (карст, оползни) выявлены не были.

Из неблагоприятных инженерно-геологических процессов можно отметить подтопление и процессы морозного пучения грунтов.

В ходе выполнения работы изучены факторы, оказывающие влияние на устойчивость массива, которыми являются напряжения от собственного веса грунта, вес постоянного оборудования, гидростатическое давление, взвешивающий эффект, нагрузки от транспортных средств, климатические нагрузки, сейсмические и буровзрывные воздействия, а также посчитаны величины их влияния на плотину:

- величина вертикальных напряжений от собственного веса грунта увеличивается пропорционально увеличению величины высоты дамбы (максимальное напряжение = $1391,3 \text{ кН/м}^3$ при глубине скважины 62,34 м. (створ 3, абс. выс. 184,43 м), минимальное = $327,76 \text{ кН/м}^3$ при глубине скважины 14,63 м. (створ 4, абс. выс. 171,56 м);
- вес постоянного оборудования, местоположение которого не меняется в процессе эксплуатации сооружения (ЛЭП, прожекторные вышки) – 53 кН;
- гидростатическое давление – 1701 кН/м;
- взвешивающий эффект уменьшает величину вертикального напряжения от собственного веса грунта (максимальное уменьшение напряжений от взвешивающего эффекта = $423,78 \text{ кН/м}^3$ при глубине скважины 62,34 м. (створ 3, абс. выс. 184,43 м), минимальное = $117,15 \text{ кН/м}^3$ при глубине скважины 14,63 м. (створ 4, абс. выс. 171,56 м);
- нагрузка от веса людей – 7,2 кН;
- при расчете устойчивости плотины влияние транспортной нагрузки учитывалось понижающим коэффициентом;
- по весу снегового покрова участок изысканий согласно СП 20.13330.2011 [19] принадлежит к IV району. Расчетное значение давления снегового покрова на 1 м^2 горизонтальной поверхности земли: $S_g=2,4 \text{ кПа}$ (240 кгс/м^2);
- по ветровому давлению участок изысканий согласно СП 20.13330.2011 [19] принадлежит к I району. Нормативное значение ветрового давления: $W_0=0,23 \text{ кПа}$

(23 кгс/м²). Число зимних дней с силой ветра более 4-х баллов по шкале Бофорта – 6,97%;

- разница значений вертикальных напряжений с учетом взвешенного эффекта между фактическим и прогнозируемым уровнями подземных вод (0,7 м) составляет: 5,38 кПа при максимальной глубине залегания уровня подземных вод; 5,91 кПа – при минимальном;
- по гололедным нагрузкам участок изысканий согласно СП 20.13330.2011 [19] принадлежит ко II району. Расчетная толщина стенки гололеда на элементах кругового сечения диаметром 10 мм, расположенных на высоте 10 м над поверхностью земли, возможная 1 раз в 5 лет, составляет 20 мм;
- глубина промерзания грунтов с учетом среднемесячных отрицательных температур по ГМС «Калевала» принимается равной: для насыпного грунта - 1,96 м; для супесей, песков мелких и пылеватых - 1,86 м; для песков средней крупности и крупных – 1,94 м; для песков гравелистых – 2,10 м; для крупнообломочных грунтов – 2,30 м;
- в соответствие с СП 20.13330.2011 [19] грунтовые условия исследуемого района по сейсмическим свойствам относятся к III категории. Интенсивность сейсмического воздействия (сейсмичность района) согласно СП 14.13330.2014 [18]: территория не сейсмична по карте ОСР-2015-А; территория не сейсмична по карте ОСР-2015-В; 6 баллов по карте ОСР-2015-С;
- плотина находится находится на расстоянии около 9500 м от ближайшего карьера «Центральный», где ведутся буровзрывные работы, что дальше радиуса сейсмической зоны влияния буровзрывных работ (861,6 м), это означает, что буровзрывные работы не оказывают влияния на устойчивость ее сооружения.

В работе проведен анализ существующих методов для выполнения расчета устойчивости. Для расчета устойчивости плотины наиболее приемлемыми являются методы Бишопа, Ямбу и Спенсера. Для определения коэффициента устойчивости склона применена круглоцилиндрическая поверхность скольжения, т.к. данный метод очень часто используется для проведения расчетов такого характера и является наиболее простым и быстрым методом.

Для выполнения расчета устойчивости плотины была использована демонстрационная версия программы «RocScience Slide2» — это программная система конечно-элементного анализа, используемая для решения задач инженерной геотехники и проектирования.

Расчет устойчивости плотины проводился по линии разреза створов №1 и 4 (см. Приложение А), т.к. это наиболее опасные места с точки зрения надежности сооружения, для двух условий – по фактическим данным и при проектном наращивании на 10 м.

Участок изысканий характеризуется 22 инженерно-геологическими элементами, физико-механические характеристики которых, необходимые для расчета устойчивости, приведены в таблице 37 (см. гл. 3.4.).

Расчеты устойчивости, выполненные с использованием программного комплекса «RocScience Slide2», показали, что плотина хвостохранилища, на данный момент возведенная до средней отметки 182,3 м – устойчива.

Расчеты устойчивости подтвердили, что при проектном наращивании на 10 м (до средней отметки 192,3 м) в расчетных створах (№1 и 4) позволит сохранить устойчивость сооружения при условии сохранения физико-механических характеристик техногенных грунтов в теле дамбы, а также технологии ее возведения и эксплуатации.

Список использованной литературы

Перечень нормативных документов

Номер	Шифр документа	Наименование
1		Постановление Правительства РФ от 2 ноября 2013 г. N 986 "О классификации гидротехнических сооружений".
2		Приказ «Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Правила безопасности при взрывных работах", 2017.
3	ГОСТ 9.602-2005.	Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии.
4	ГОСТ 5180-2015.	Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик.
5	ГОСТ 12071.	Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов.
6	ГОСТ 12536-2014.	Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микро агрегатного состава» ареометрическим методом.
7	ГОСТ 16350-80.	Климат СССР. Госстандарт СССР. М., 1981.
8	ГОСТ 20276-2012.	Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости.
9	ГОСТ 21153.2-84.	Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии.
10	ГОСТ 21153.5-88.	Породы горные. Метод определения прочности при срезе со сжатием.
11	ГОСТ 25100-2011.	Грунты. Классификация.
12	ГОСТ 28985-91.	Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии.
13		Методика оценки прочности и сжимаемости крупнообломочных грунтов с пылеватым и глинистым заполнителем. ДальНИИС Госстрой СССР. - М., 1989г.
14	РД 34.20.508.	Инструкция по эксплуатации силовых кабельных линий. Часть 1 Кабельные линии напряжением до 35кВ. – М., 1980.
15	РД 34.20.509.	Инструкция по эксплуатации силовых кабельных линий Ч. 2 Кабельные линии напряжением 110 - 500 кВ. – М., 1980.
16	СП 11-103-97.	Инженерно-гидрометеорологические изыскания для строительства. М.: Госстрой РФ, 1997.
17	СП 11-105-97.	Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. II. Правила производства работ в районах развития

		опасных геологических и инженерно-геологических процессов. – М., 2000.
18	СП 14.13330.2014.	Строительство в сейсмических районах СНиП II-7-81* (пересмотр СП 14.13330.2011), - М., 2014.
19	СП 20.13330.2011.	Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. – М., 2011.
20	СП 22.13330.2011.	Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* – М., Технический комитет по стандартизации (ТК 465) «Строительство», 2011.
21	СП 28.13330.2017.	Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85. – М., 2017.
22	СП 39.13330.2012.	Плотины из грунтовых материалов. Актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84, 2012.
23	СП 47.13330.2012.	Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96. – М., 2012.
24	СП 58.13330.2012.	Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003, 2012.
25	СП 119.13330.2012.	Железные дороги. Колеи 1520 мм.
26	СП 131.13330.2012.	Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*– М., 2012.
27		Методические указания по составлению научно-прикладного справочника по агроклиматическим ресурсам СССР. Серия 2, ч. 1 и 2. Л.: Гидрометеиздат, 1986.
28		Наставление гидрометеорологическим станциям и постам» (часть 1, выпуск 3, Л.: Гидрометеиздат. 1985.
29		Рекомендации по выбору методов расчета коэффициента устойчивости склона и оползневого давления, М, 1986 г.

Перечень использованной литературы

Номер	Наименование
30	Борисова Р.И., Леонтьев А.Г., Корсунова О.О. Отчет по составлению комплекта карт геологического содержания масштаба 1:50000 Костомукшского железорудного района (листы Q-36-110-ВГ, Q-36-122-АБ), проведенному в 1989 - 2001 г.г., ГУП РК «Карельская геологическая экспедиция», Петрозаводск, 2001.
31	Биндеман Н. Н. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод. М.: Госгеолтехиздат, 1963 г., 203 с.

32	Горьковец В. Я., Раевская М. Б., Белоусов Е.Ф., Инина К.А. Геология и метаморфизм железисто-кремнистых формаций Карелии. Л., 1991 г, 173 с.
33	Горьковец В. Я, Раевская М. Б., Белоусов Е. Ф., Инина К. А. Геология и металлогения района Костомукшского железорудного месторождения. Петрозаводск: КФ АН СССР, 1981 г., 143 с.
34	Горьковец В.Я., Раевская М.Б. Железные руды Карелии (железисто-кремнистые формации). Петрозаводск.: КФ АН СССР 1986 г., 54 с.
35	Горьковец В. Я., Шаров Н. В. Костомукшский рудный район (геология, глубинное строение и минерагения). Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015 г., 322 с.
36	Иванов П. Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений, М., «Высшая школа», 1985 г.
37	Комплекс лабораторных исследований пород по определению физико-механических свойств скальных и рыхлых горных пород участка по проекту «Развитие сооружений хвостового хозяйства УПКиО АО «Карельский окатыш» на период 2018-2043 гг.»: отчет / ФГБОУ «Санкт-Петербургский Горный Университет». Санкт-Петербург, 2019 г.
38	«Мониторинг геологической среды в районе Костомукшского месторождения в 1999-2002 гг.»: отчет / АО «Карельский окатыш». Костомукша, 2013 г.
39	О проведении работ по инженерно-геологическим изысканиям на Пионерной плотине согласно проекту «Развитие сооружений хвостового хозяйства УПКиО АО «Карельский окатыш» на период 2018-2043 гг.»: отчет / АО «Карельский окатыш». Костомукша, 2019 г., 104 с.
40	О производстве инженерно-геологических изысканий для разработки проектной документации по объекту: «Установка для сгущения хвостов на АО «Карельский окатыш»: технический отчет / АО «Карельский окатыш». Костомукша, 2015 г.
41	По результатам инженерно-геологических изысканий на объекте: «Опытно-промышленный комплекс сухой магнитной сепарации для переработки руд в карьере «Центральный» производительностью 4 млн. тонн в год»: технический отчет / ООО «ГЕОКАРТ». Санкт-Петербург, 2011 г.
42	Проект отработки запасов центрального участка карьера Костомукшского месторождения железистых кварцитов.

	Оценка воздействия на окружающую среду. / ООО СПб-Гипрошахт. Санкт-Петербург, 2018 г.
43	Проект реконструкции Костомукшского рудника на базе новых технологий. / АО "Гипроруда", 1995 г.
44	Развитие сооружений хвостового хозяйства УПКиО АО «Карельский окатыш» на период 2018-2043 гг.: отчет / ФГБОУ «Пермский Государственный национальный исследовательский университет». Пермь, 2018 г., 306 с.
45	Развитие сооружений хвостового хозяйства УПКиО АО «Карельский окатыш» на период 2018-2043 гг. Том 5.6.1.: отчет / АО «МЕХАНОБР ИНЖИНИРИНГ». Санкт-Петербург, 2018 г.
46	«Разработка критериев и установление факторов алмазности лампроитов Карело-Кольского региона»: отчет / В.А., Шульга Т.Ф., Путинцева Е.В. Костомукша, 1994 г.
47	Строительство рудно-вскрышного комплекса оборудования циклично-проточной технологии для центрального участка карьера Костомукшского месторождения железистых кварцитов. Оценка воздействия на окружающую среду. / ООО СПб-Гипрошахт, Санкт-Петербург, 2019 г.
48	Тушевский Е. Открытие и разведка Костомукшского железорудного месторождения в Карельской АССР // Ежегодник БСЭ, 1986. — М., Вып. 30. — С. 524—525.
49	Чугаев, Р. Р. Расчёт устойчивости земляных откосов и бетонных плотин на нескальном основании по методу круглоцилиндрических поверхностей обрушения / Р. Р. Чугаев. — Москва: ГЭИ, 1963. — 144 с
50	Spencer, E. A method of analysis of the stability of embankment assuming parallel inter-slice forces / E. Spencer // Geotechnique. — Vol. 17. — 1967. — Pp. 11.

Перечень электронных ресурсов

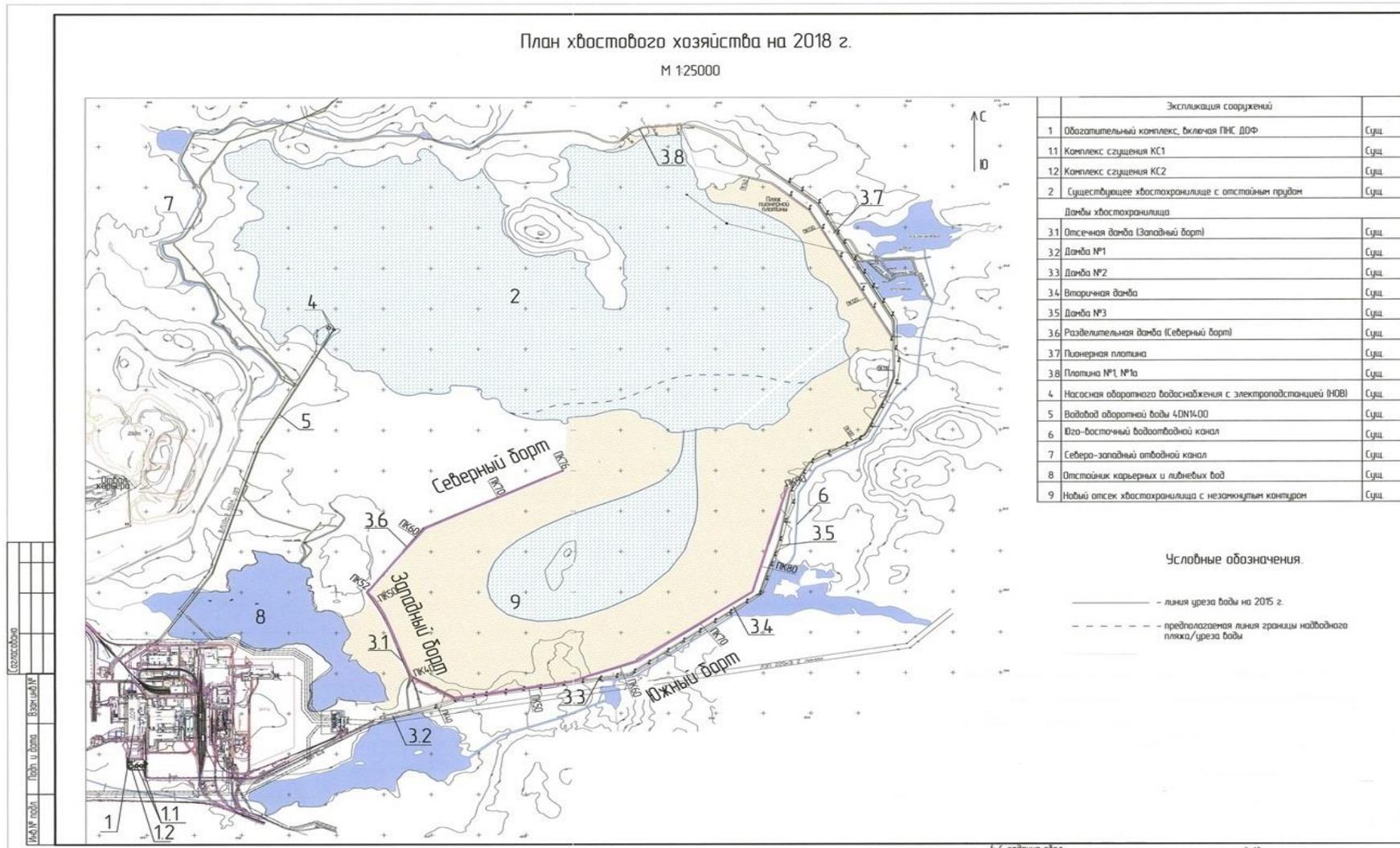
Номер	Наименование
51	Бентонит для производства железорудных окатышей [Электронный ресурс] // Режим доступа: https://bentonit.ru/products/metallurgy/ , свободный. Дата обращения: 12.12.2019.

52	Карельский окатыш [Электронный ресурс] // Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Карельский_окатыш , свободный. Дата обращения: 29.10.2019.
53	О компании (АО «Карельский окатыш») [Электронный ресурс] //Режим доступа: http://karelskyokatysh.severstal.com/rus/about/index.phtml , свободный. Дата обращения: 29.10.2019.
54	Основные факторы, влияющие на перераспределение напряжений в массивах горных пород [Электронный ресурс] // Режим доступа: https://studwood.ru/1267727/geografiya/osnovnye_factory_vliyayuschie_pereraspredelenie_napryazheniy_massivah_gornyh_pород , свободный. Дата обращения: 14.01.2020
55	Продукция АО «Карельский окатыш» [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://karelskyokatysh.severstal.com/rus/customers/products/index.phtml , свободный. Дата обращения: 23.12.2019.
56	Торгоев И.А. Экологические последствия катастрофических аварий на хвостохранилищах Кыргызстана [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://mognovse.ru/vzc-ekologicheskie-posledstviya-katastroficheskikh-avarij-na-hv.html , свободный. Дата обращения: 02.11.2019.
57	Флюсы [Электронный ресурс] // Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Флюсы , свободный. Дата обращения: 12.12.2019.
58	Чем чревато пренебрежение безопасностью хвостохранилищ [Электронный ресурс] // Режим доступа: https://www.geoinfo.ru/product/analiticheskaya-sluzhba-geoinfo/po-sledam-katastrofy-v-brazilii-chem-chrevato-

	prenebrezhenie-bezopasnostyu-hvostohranilishch-40102.shtml, свободный. Дата обращения: 15.10.2019.
59	Rocscience [Электронный ресурс] // Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Rocscience , свободный. Дата обращения: 24.04.2020.
60	Slide2 [Электронный ресурс] // Режим доступа: https://www.rocscience.com/software/slide2 , свободный. Дата обращения: 24.04.2020.

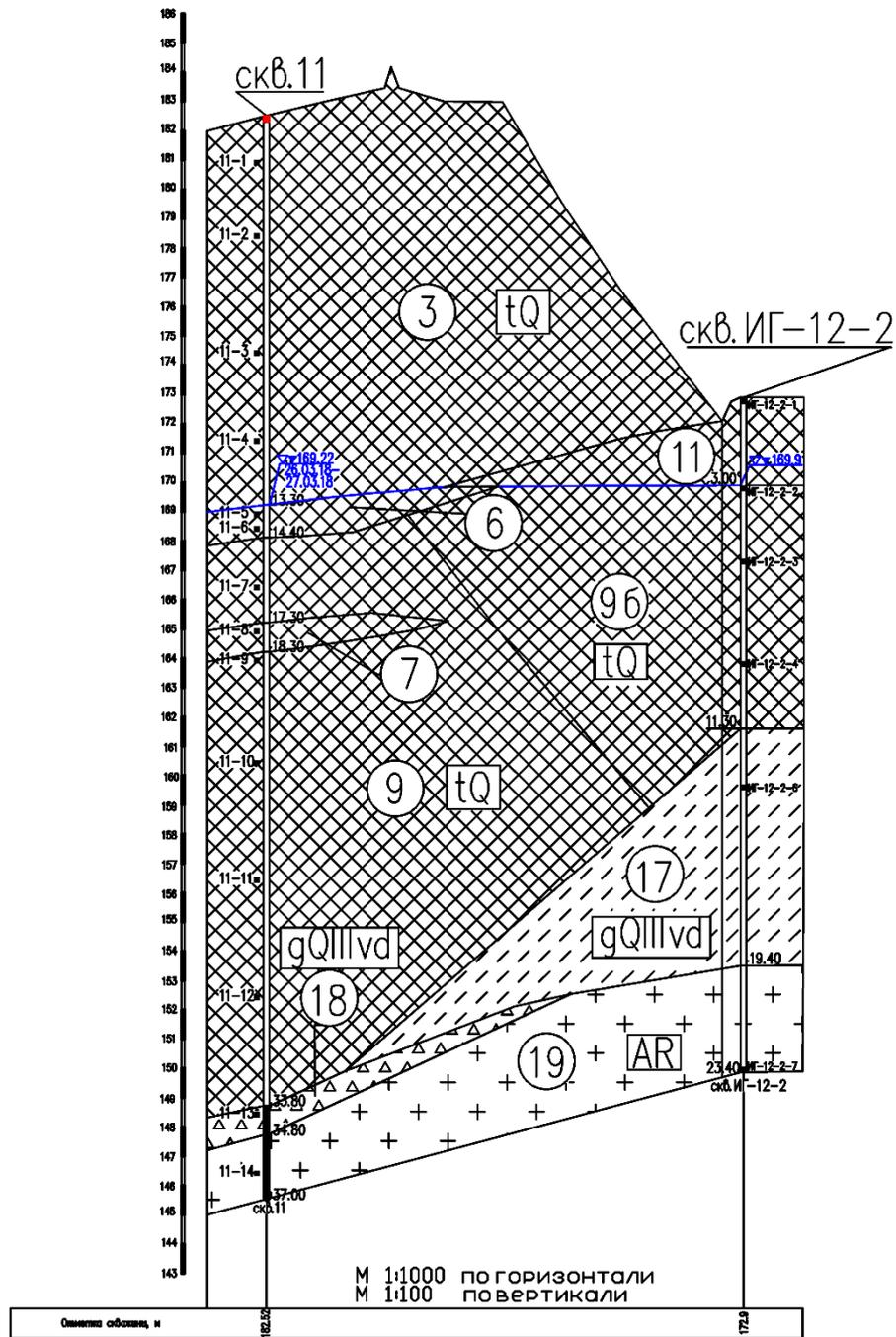
ПРИЛОЖЕНИЯ

План хвостового хозяйства на 2018 г.



Инженерно-геологический разрез створа №1 плотины «Пионерная»

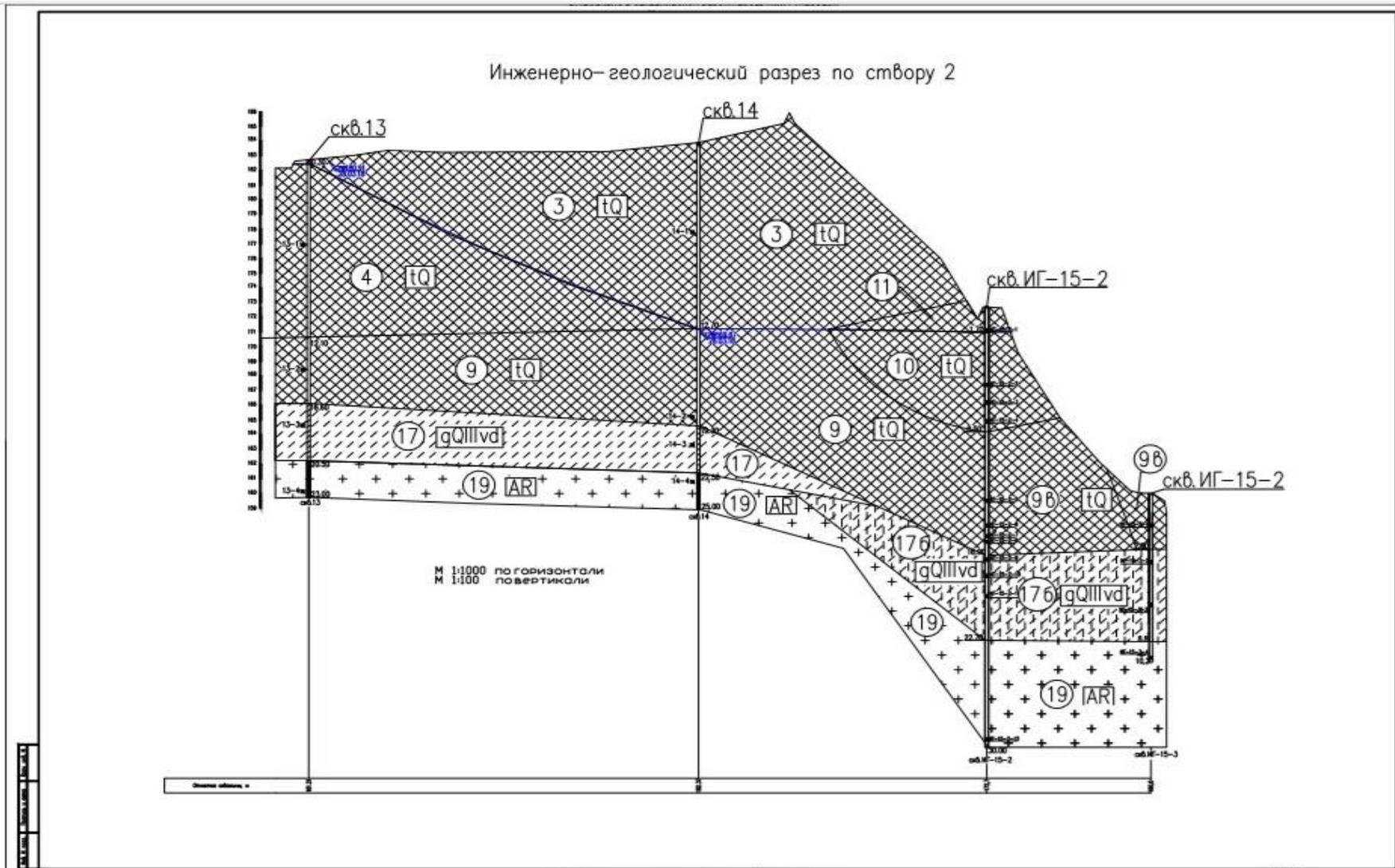
Инженерно-геологический разрез по створу 1



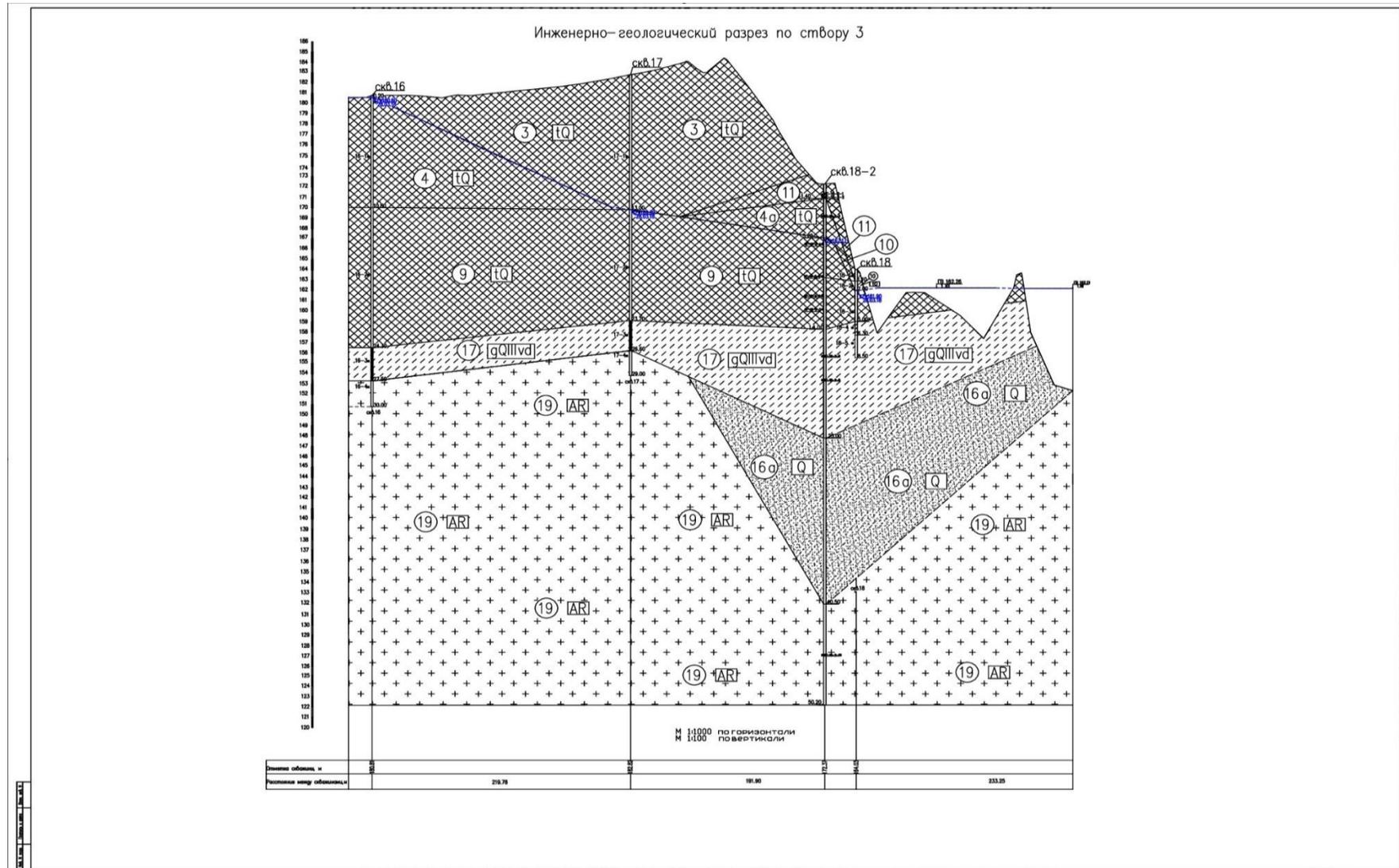
Имя, И. гос.
 Должность и дата
 Визитная печать

Формат А2

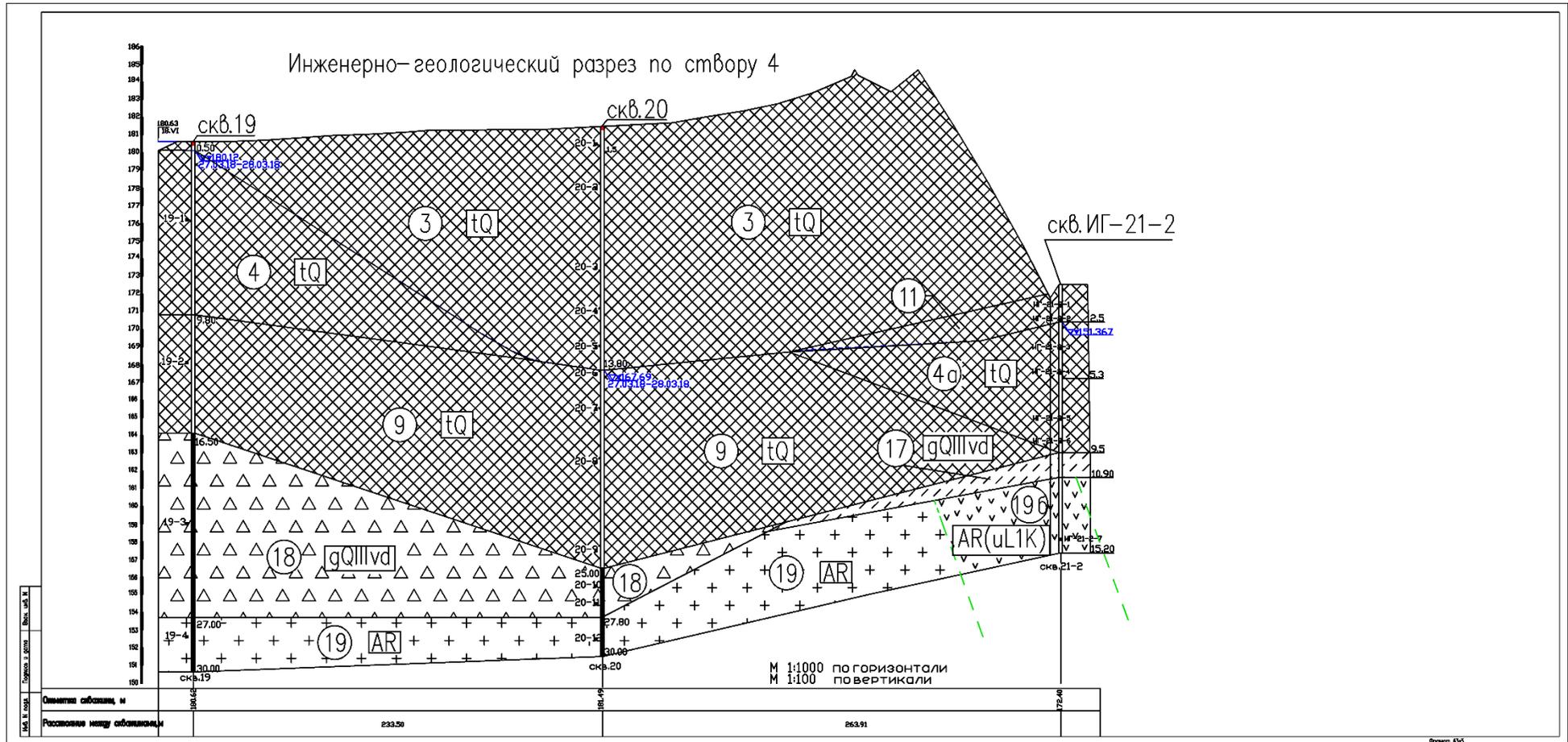
Инженерно-геологический разрез створа №2 плотины «Пионерная»



Инженерно-геологический разрез створа №3 плотины «Пионерная»



Инженерно-геологический разрез створа №4 плотины «Пионерная»



Условные обозначения к инженерно-геологическим разрезам

Номер ИГЭ	Наименование грунтов и включений	Обозначение
НТГ	Насыпной техногенный грунт (обозначение на разрезах)	
ИГЭ-16а	Песок желтого цвета, гравелистый, водонасыщенный	
ИГЭ-17	Супесь древесная, пластичная	
ИГЭ-17б	Супесь, песчанистая, твердая	
ИГЭ-18	Древсяный грунт с песчаным заполнителем, заполнителя до 50%	
ИГЭ-19	Гнейсо-гранит	
ИГЭ-19б	Габбро-диабаз плотный	
	Проба грунта	
	Номер скважины на плане (пробурены ЦПГР, 2019г.) Абсолютная отметка устья скважины, м	Скв ИГ-169 172.40
	Номер скважины на разрезе	ск8, ИГ-171

УСЛОВНЫЕ ГРАФИЧЕСКИЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И ИЗОБРАЖЕНИЯ	
Наименование	Обозначение
Консистенция супесчаных грунтов	
Пластичная	
Твердая	
Степень водонасыщения песков	
Средней степени водонасыщения	
Водонасыщенный	
Стратиграфический возраст и генетический индекс	
Техногенные четвертичные отложения	IQ
Верхнечетвертичные верхневалдайские ледниковые отложения	gQIIIvd
Архейские отложения	AR

УСЛОВНЫЕ ГРАФИЧЕСКИЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И ИЗОБРАЖЕНИЯ	
Наименование	Обозначение
Абсолютная отметка появившегося и установившегося уровней подземных вод дата замера	 182.65 01.03.18
Граница геологических слоев	—
Инженерно-геологический элемент и его номер	6
Местоположение скважины, ее номер Абсолютная отметка устья скважины, м	Скв. 13 189.45

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Расчеты напряжений от вертикальных и горизонтальных нагрузок (створ 1, выс. 184.18)

Створ_1 / высота 184.18							без взвеш. эффекта		со взвеш. эфф.				
							вертикальные напряжения				горизонтальные напряжения		
ИГЭ	h, м	$\rho_{гр}, \text{т/м}^3$	$\rho_{с}, \text{т/м}^3$	e	$\gamma \text{ воды, кН/м}^3$	g, м/с ²	$\gamma \text{ грунта, кН/м}^3$	$s_{zg}, \text{кПа}$	$\gamma \text{ взвеш.гр., кН/м}^3$	$s_{zg}, \text{кПа}$	$\rho \text{ пульпы}$	$\gamma \text{ пульпы, кН/м}^3$	$s_{xg}, \text{кПа}$
3	14,50	1,92	2,83	0,66	10,00	10,00	19,20	278,40	19,20	278,40	1,05	10,50	152,25
уровень грунтовых вод													
6	0,97	2,04	2,83	0,65	10,00	10,00	20,41	298,20	11,14	289,21	1,05	10,50	162,44
9	3,24	1,80	2,82	0,96	10,00	10,00	18,03	356,53	9,29	319,27	1,05	10,50	196,40
7	0,66	2,02	2,81	0,66	10,00	10,00	20,20	369,82	10,90	326,45	1,05	10,50	203,31
9	13,55	1,80	2,82	0,96	10,00	10,00	18,03	614,23	9,29	452,42	1,05	10,50	345,63
17	0,76	2,11	2,84	0,55	10,00	10,00	21,14	630,31	11,85	461,44	1,05	10,50	353,62
18	0,90	2,05	2,84	0,63	10,00	10,00	20,50	648,84	11,26	471,62	1,05	10,50	363,11
19	3,02	2,64	2,91	0,10	10,00	10,00	26,40	728,48	17,29	523,78	1,05	10,50	394,79

Расчеты напряжений от вертикальных и горизонтальных нагрузок (створ 1, выс. 178.13)

Створ_1 / высота 178.13							без взвеш. эффекта		со взвеш. эфф.				
							вертикальные напряжения				горизонтальные напряжения		
ИГЭ	h, м	$\rho_{гр}, \text{т/м}^3$	$\rho_{с}, \text{т/м}^3$	e	$\gamma \text{ воды, кН/м}^3$	g, м/с ²	$\gamma \text{ грунта, кН/м}^3$	$s_{zg}, \text{кПа}$	$\gamma \text{ взвеш.гр., кН/м}^3$	$s_{zg}, \text{кПа}$	$\rho \text{ пульпы}$	$\gamma \text{ пульпы, кН/м}^3$	$s_{xg}, \text{кПа}$
3	6,93	1,92	2,83	0,66	10	10	19,20	133,06	19,20	133,06	1,05	10,5	72,77
11	1,33	2,02	2,82	0,55	10	10	20,20	159,82	20,20	159,82	1,05	10,5	86,68
уровень грунтовых вод													
96	8,62	2,29	2,73	0,32	10	10	22,93	357,41	13,16	273,25	1,05	10,5	177,15
9	4,13	1,80	2,82	0,96	10	10	18,03	431,85	9,29	311,61	1,05	10,5	220,49
17	4,49	2,11	2,84	0,55	10	10	21,14	526,83	11,85	364,86	1,05	10,5	267,67
19	4,16	2,64	2,91	0,10	10	10	26,40	636,58	17,29	436,75	1,05	10,5	311,33

продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Расчеты напряжений от вертикальных и горизонтальных нагрузок (створ 1, выс. 172.09)

Створ_1 / высота 172.09							без взвеш. эффекта	со взвеш. эфф.					
							вертикальные напряжения				горизонтальные напряжения		
ИГЭ	h, м	$\rho_{гр}, т/м^3$	$\rho_s, т/м^3$	e	Y воды, кН/м ³	g, м/с ²	Y грунта, кН/м ³	$s_{zg}, кПа$	Y взвеш.гр., кН/м ³	$s_{zg}, кПа$	рпульты	Y пульпы, кН/м ³	$s_{xg}, кПа$
11	2,19	2,02	2,82	0,55	10	10	20,20	44,20	20,20	44,20	1,05	10,5	22,97
уровень грунтовых вод													
96	8,84	2,29	2,73	0,32	10	10	22,93	246,93	13,16	160,57	1,05	10,5	115,79
17	7,66	2,11	2,84	0,55	10	10	21,14	408,85	11,85	251,35	1,05	10,5	196,22
19	3,88	2,64	2,91	0,10	10	10	26,40	511,27	17,29	318,43	1,05	10,5	236,96

Расчеты напряжений от вертикальных и горизонтальных нагрузок (створ 2, выс. 185.92)

Створ_2 / высота 185.92							без взвеш. эффекта	со взвеш. эфф.					
							вертикальные напряжения				горизонтальные напряжения		
ИГЭ	h, м	$\rho_{гр}, т/м^3$	$\rho_s, т/м^3$	e	Y воды, кН/м ³	g, м/с ²	Y грунта, кН/м ³	$s_{zg}, кПа$	Y взвеш.гр., кН/м ³	$s_{zg}, кПа$	рпульты	Y пульпы, кН/м ³	$s_{xg}, кПа$
3	14,74	1,92	2,83	0,66	10,00	10,00	19,20	283,01	19,20	283,01	1,05	10,50	154,77
уровень грунтовых вод													
9	9,34	1,80	2,82	0,96	10,00	10,00	18,03	451,43	9,29	369,82	1,05	10,50	252,84
17	1,60	2,11	2,84	0,55	10,00	10,00	21,14	485,25	11,85	388,78	1,05	10,50	269,64
19	2,99	2,64	2,91	0,10	10,00	10,00	26,40	564,17	17,29	440,47	1,05	10,50	301,04

продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Расчеты напряжений от вертикальных и горизонтальных нагрузок (створ 2, выс. 172.10)

Створ_2 / высота 172.10							без взвеш. эффекта	со взвеш. эфф.					
							вертикальные напряжения				горизонтальные напряжения		
ИГЭ	h, м	$\rho_{гр}, \text{т/м}^3$	$\rho_s, \text{т/м}^3$	e	Y воды, кН/м ³	g, м/с ²	Y грунта, кН/м ³	$s_{zg}, \text{кПа}$	Y взвеш.гр., кН/м ³	$s_{zg}, \text{кПа}$	рпульты	Y пульпы, кН/м ³	$s_{xg}, \text{кПа}$
11	1,10	2,02	2,82	0,55	10,00	10,00	20,20	22,22	20,20	22,22	1,05	10,50	11,55
уровень грунтовых вод													
10	6,57	1,95	2,84	0,62	10,00	10,00	19,50	150,34	11,39	97,05	1,05	10,50	80,54
9в	8,58	2,20	2,75	0,45	10,00	10,00	21,98	338,88	12,05	200,45	1,05	10,50	170,63
176	5,84	2,15	2,74	0,43	10,00	10,00	21,48	464,29	12,21	271,74	1,05	10,50	231,95
19	7,29	2,64	2,91	0,10	10,00	10,00	26,40	656,73	17,29	397,77	1,05	10,50	308,49

Расчеты напряжений от вертикальных и горизонтальных нагрузок (створ 2, выс. 159.48)

Створ_2 / высота 159.48							без взвеш. эффекта	со взвеш. эфф.					
							вертикальные напряжения				горизонтальные напряжения		
ИГЭ	h, м	$\rho_{гр}, \text{т/м}^3$	$\rho_s, \text{т/м}^3$	e	Y воды, кН/м ³	g, м/с ²	Y грунта, кН/м ³	$s_{zg}, \text{кПа}$	Y взвеш.гр., кН/м ³	$s_{zg}, \text{кПа}$	рпульты	Y пульпы, кН/м ³	$s_{xg}, \text{кПа}$
уровень грунтовых вод													
9а	3,29	2,29	2,74	0,33	10,00	10,00	22,90	75,34	13,08	43,04	1,05	10,50	34,55
176	6,30	2,15	2,74	0,43	10,00	10,00	21,48	210,63	12,21	119,94	1,05	10,50	100,70
19	7,20	2,64	2,91	0,10	10,00	10,00	26,40	400,69	17,29	244,42	1,05	10,50	176,30

продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Расчеты напряжений от вертикальных и горизонтальных нагрузок (створ 3, выс. 184.43)

Створ_3 / высота 184.43							без взвеш. эффекта		со взвеш. эфф.		горизонтальные напряжения		
							вертикальные напряжения						
ИГЭ	h, м	$\rho_{гр}, \text{т/м}^3$	$\rho_{с}, \text{т/м}^3$	e	У воды, кН/м ³	g, м/с ²	У грунта, кН/м ³	$s_{zg}, \text{кПа}$	У взвеш.гр., кН/м ³	$s_{zg}, \text{кПа}$	$\rho_{пульпы}$	У пульпы, кН/м ³	$s_{xg}, \text{кПа}$
3	13,91	1,92	2,83	0,66	10	10	19,2	267,07	19,2	267,07	1,05	10,5	146,06
11	0,84	2,02	2,82	0,55	10	10	20,2	284,04	20,2	284,04	1,05	10,5	154,88
4a	1,17	1,83	2,74	0,64	10	10	18,32	305,47	18,32	305,47	1,05	10,5	167,16
уровень грунтовых вод													
9	9,78	1,80	2,82	0,96	10	10	18,03	481,82	9,29	396,37	1,05	10,5	269,85
17	6,54	2,11	2,84	0,55	10	10	21,14	620,07	11,85	473,88	1,05	10,5	338,52
16a	4,24	2,09	2,68	0,53	10	10	20,90	708,69	10,98	520,43	1,05	10,5	383,04
19	25,86	2,64	2,91	0,10	10	10	26,40	1391,30	17,29	967,52	1,05	10,5	654,57

Расчеты напряжений от вертикальных и горизонтальных нагрузок (створ 3, выс. 171.18)

Створ_3 / высота 171.18							без взвеш. эффекта		со взвеш. эфф.		горизонтальные напряжения		
							вертикальные напряжения						
ИГЭ	h, м	$\rho_{гр}, \text{т/м}^3$	$\rho_{с}, \text{т/м}^3$	e	У воды, кН/м ³	g, м/с ²	У грунта, кН/м ³	$s_{zg}, \text{кПа}$	У взвеш.гр., кН/м ³	$s_{zg}, \text{кПа}$	$\rho_{пульпы}$	У пульпы, кН/м ³	$s_{xg}, \text{кПа}$
11	3,48	2,02	2,82	0,55	10	10	20,2	70,30	20,2	70,30	1,05	10,5	36,54
10	1,87	1,95	2,84	0,62	10	10	19,5	106,76	19,5	106,76	1,05	10,5	56,18
уровень грунтовых вод													
9	7,16	1,80	2,82	0,96	10	10	18,03	235,87	9,29	173,31	1,05	10,5	131,36
17	10,30	2,11	2,84	0,55	10	10	21,14	453,60	11,85	295,38	1,05	10,5	239,51
16a	15,52	2,09	2,68	0,53	10	10	20,90	777,97	10,98	465,79	1,05	10,5	402,47
19	10,70	2,64	2,91	0,10	10	10	26,40	1060,41	17,29	650,78	1,05	10,5	514,82

продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Расчеты напряжений от вертикальных и горизонтальных нагрузок (створ 3, выс. 157.93)

Створ_3 / высота 157.93							без взвеш. эффекта		со взвеш. эфф.		горизонтальные напряжения		
							вертикальные напряжения						
ИГЭ	h, м	$\rho_{гр}, т/м^3$	$\rho_s, т/м^3$	e	Y воды, кН/м ³	g, м/с ²	Y грунта, кН/м ³	$s_{zg}, кПа$	Y взвеш.гр., кН/м ³	$s_{zg}, кПа$	рпутьпы	Y пульпы, кН/м ³	$s_{xg}, кПа$
уровень грунтовых вод													
17	7,99	2,11	2,84	0,55	10	10	21,14	168,90	11,85	94,69	1,05	10,5	83,90
16a	13,91	2,09	2,68	0,53	10	10	20,90	459,62	10,98	247,43	1,05	10,5	229,95
19	14,00	2,64	2,91	0,10	10	10	26,40	829,17	17,29	489,47	1,05	10,5	376,95

Расчеты напряжений от вертикальных и горизонтальных нагрузок (створ 4, выс. 184.72)

Створ_4 / высота 184.72							без взвеш. эффекта		со взвеш. эфф.		горизонтальные напряжения		
							вертикальные напряжения						
ИГЭ	h, м	$\rho_{гр}, т/м^3$	$\rho_s, т/м^3$	e	Y воды, кН/м ³	g, м/с ²	Y грунта, кН/м ³	$s_{zg}, кПа$	Y взвеш.гр., кН/м ³	$s_{zg}, кПа$	рпутьпы	Y пульпы, кН/м ³	$s_{xg}, кПа$
уровень грунтовых вод													
3	14,32	1,92	2,83	0,66	10	10	19,2	274,94	19,2	274,94	1,05	10,5	150,36
11	1,19	2,02	2,82	0,55	10	10	20,2	298,98	20,2	298,98	1,05	10,5	162,86
уровень грунтовых вод													
4a	3,15	1,83	2,74	0,64	10	10	18,32	356,68	10,63	332,47	1,05	10,5	195,93
9	4,99	1,80	2,82	0,96	10	10	18,03	446,66	9,29	378,85	1,05	10,5	248,33
17	0,86	2,11	2,84	0,55	10	10	21,14	464,84	11,85	389,04	1,05	10,5	257,36
19	4,54	2,64	2,91	0,10	10	10	26,40	584,68	17,29	467,53	1,05	10,5	305,03

Расчеты напряжений от вертикальных и горизонтальных нагрузок (створ 4, выс. 178.14)

Створ_4 / высота 178.14							без взвеш. эффекта		со взвеш. эфф.		горизонтальные напряжения		
							вертикальные напряжения						
ИГЭ	h, м	$\rho_{гр}, т/м^3$	$\rho_s, т/м^3$	e	Y воды, кН/м ³	g, м/с ²	Y грунта, кН/м ³	$s_{zg}, кПа$	Y взвеш.гр., кН/м ³	$s_{zg}, кПа$	рпульты	Y пульпы, кН/м ³	$s_{xg}, кПа$
3	6,87	1,92	2,83	0,66	10	10	19,20	131,90	19,2	131,90	1,05	10,5	72,14
11	1,8	2,02	2,82	0,55	10	10	20,20	168,26	20,2	168,26	1,05	10,5	91,04
уровень грунтовых вод													
4а	4,98	1,83	2,74	0,64	10	10	18,32	259,48	10,63	221,20	1,05	10,5	143,33
9	2,51	1,80	2,82	0,96	10	10	18,03	304,74	9,29	244,53	1,05	10,5	169,68
17	1,13	2,11	2,84	0,55	10	10	21,14	328,63	11,85	257,92	1,05	10,5	181,55
196	4,42	3,07	3,09	0,07	10	10	30,67	464,19	19,62	344,66	1,05	10,5	227,96

Расчеты напряжений от вертикальных и горизонтальных нагрузок (створ 4, выс. 171.56)

Створ_4 / высота 171.56							без взвеш. эффекта		со взвеш. эфф.		горизонтальные напряжения		
							вертикальные напряжения						
ИГЭ	h, м	$\rho_{гр}, т/м^3$	$\rho_s, т/м^3$	e	Y воды, кН/м ³	g, м/с ²	Y грунта, кН/м ³	$s_{zg}, кПа$	Y взвеш.гр., кН/м ³	$s_{zg}, кПа$	рпульты	Y пульпы, кН/м ³	$s_{xg}, кПа$
11	1,48	2,02	2,82	0,55	10	10	20,20	29,90	20,2	29,90	1,05	10,5	15,54
уровень грунтовых вод													
4а	7,08	1,83	2,74	0,64	10	10	18,32	159,58	10,63	105,16	1,05	10,5	89,88
9	0,39	1,80	2,82	0,96	10	10	18,03	166,61	9,29	108,78	1,05	10,5	93,98
17	1,37	2,11	2,84	0,55	10	10	21,14	195,57	11,85	125,02	1,05	10,5	108,36
196	4,31	3,07	3,09	0,07	10	10	30,67	327,76	19,62	209,60	1,05	10,5	153,62

График зависимости вертикальных напряжений собственного веса грунта с учетом взвешивающего эффекта и без него, от высоты плотины (створ 1, выс. 184.18)

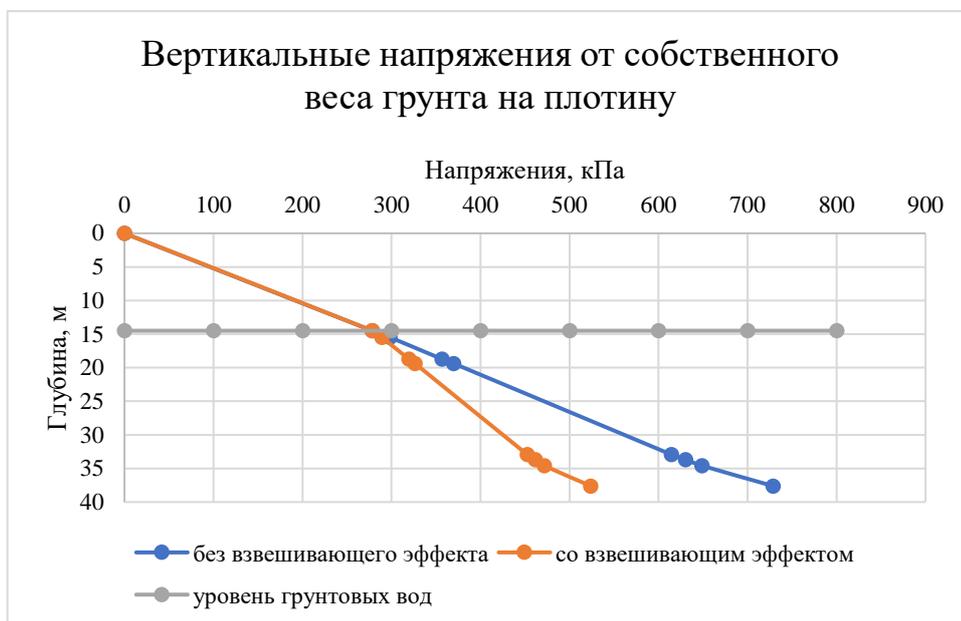


График зависимости горизонтальных напряжений от высоты плотины (створ 1, выс. 184.18)

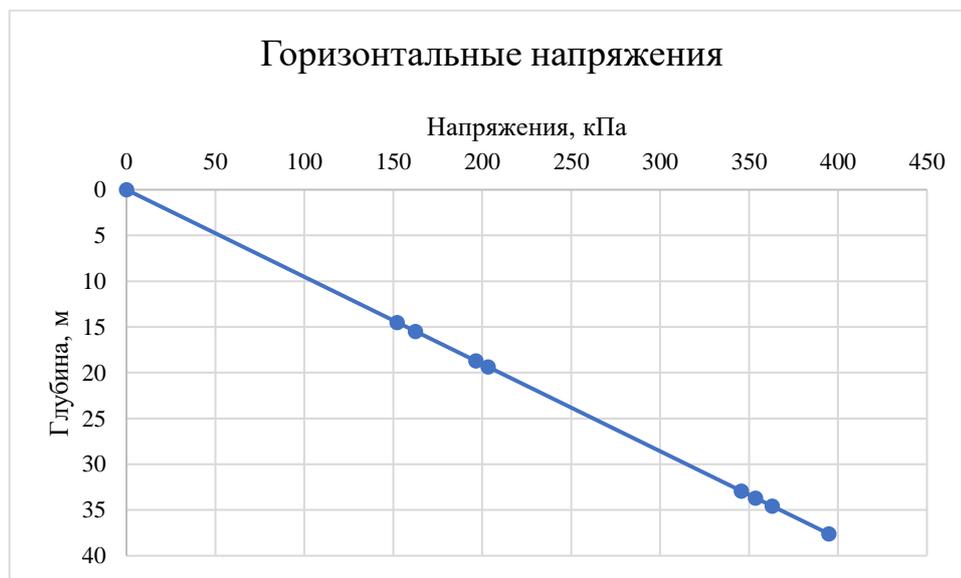


График зависимости вертикальных напряжений собственного веса грунта с учетом взвешивающего эффекта и без него, от высоты плотины (створ 1, выс. 178.13)

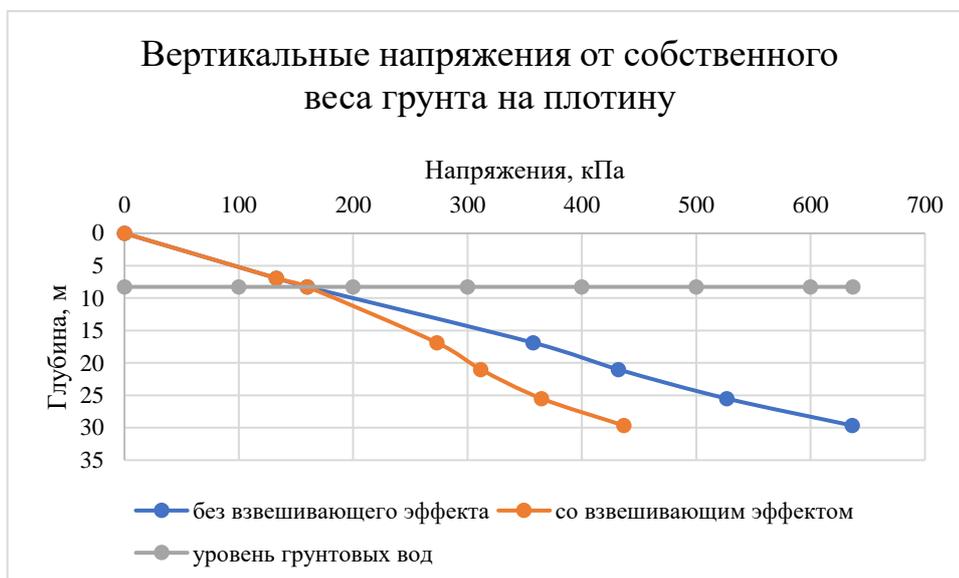


График зависимости горизонтальных напряжений от высоты плотины (створ 1, выс. 178.13)



График зависимости вертикальных напряжений собственного веса грунта с учетом взвешивающего эффекта и без него, от высоты плотины (створ 1, выс. 172.09)

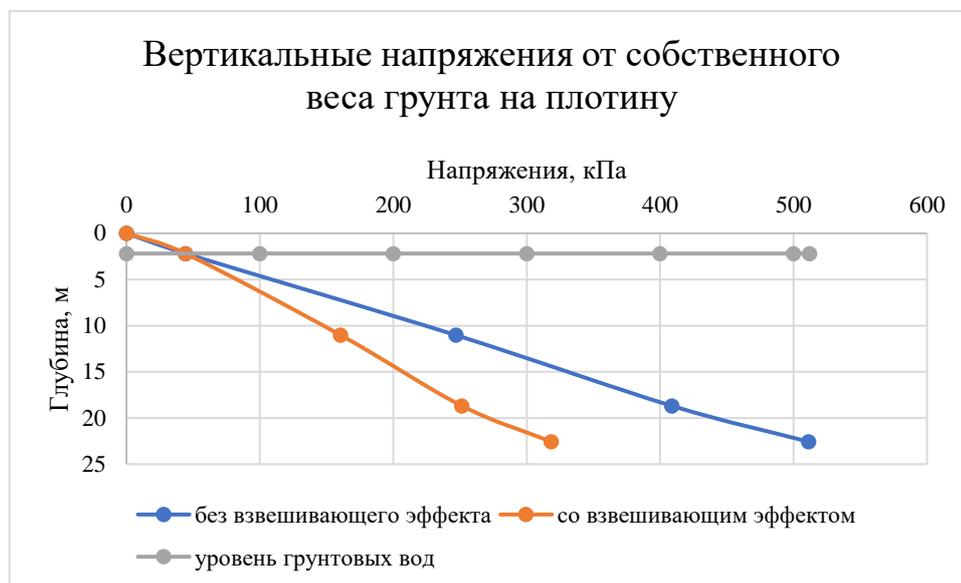


График зависимости горизонтальных напряжений от высоты плотины (створ 1, выс. 172.09)

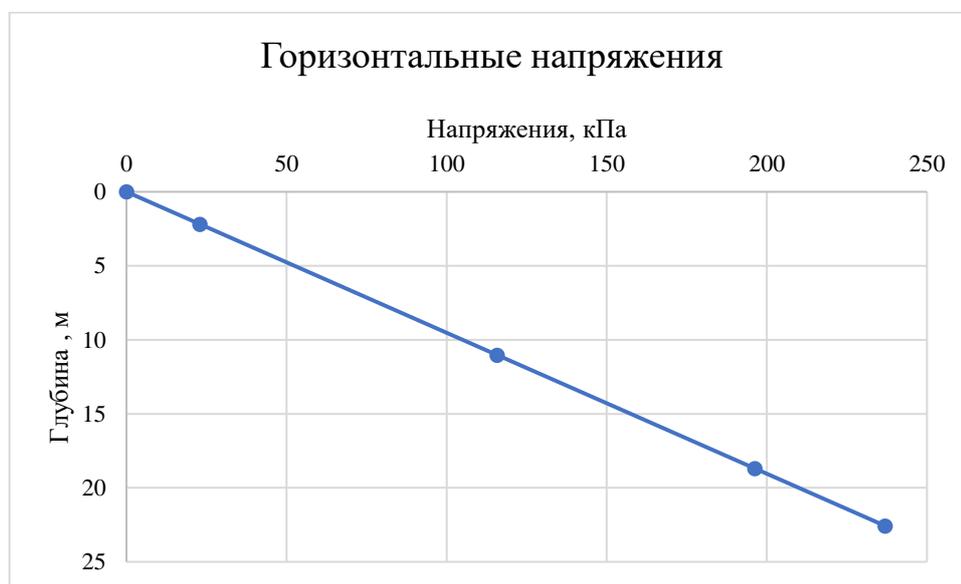


График зависимости вертикальных напряжений собственного веса грунта с учетом взвешивающего эффекта и без него, от высоты плотины (створ 2, выс. 185.92)

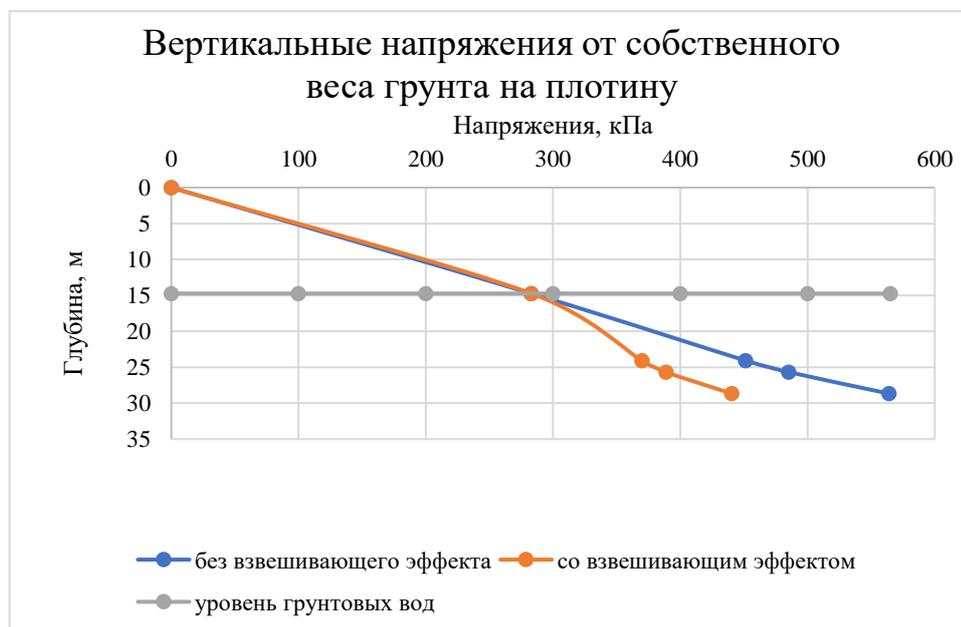


График зависимости горизонтальных напряжений от высоты плотины (створ 2, выс. 185.92)

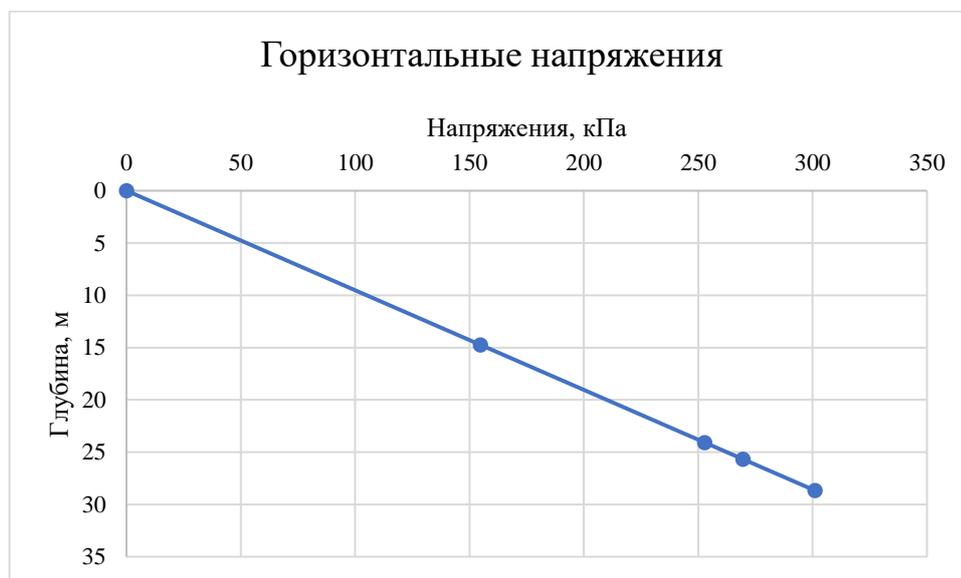


График зависимости вертикальных напряжений собственного веса грунта с учетом взвешивающего эффекта и без него, от высоты плотины (створ 2, выс. 172.10)

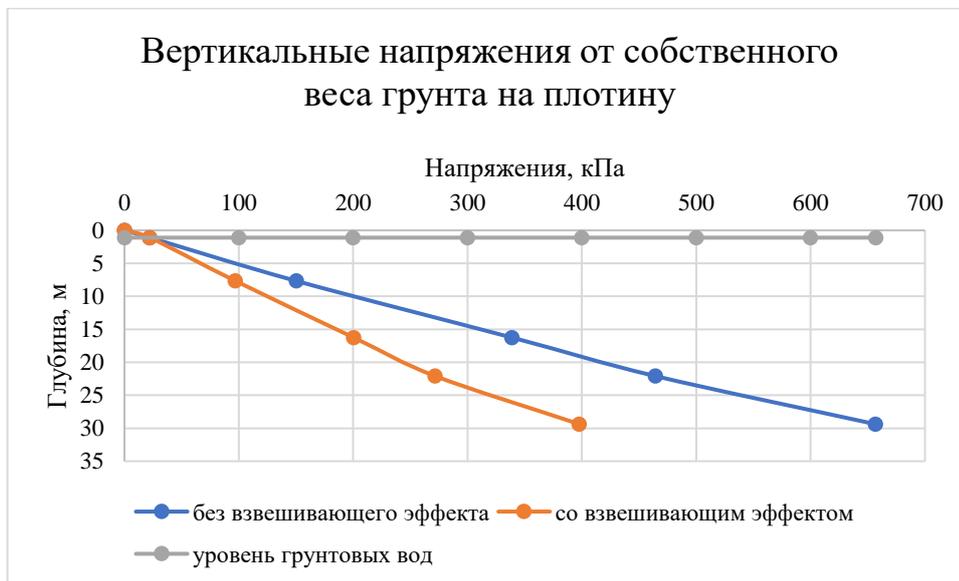


График зависимости горизонтальных напряжений от высоты плотины (створ 2, выс. 172.10)



График зависимости вертикальных напряжений собственного веса грунта с учетом взвешивающего эффекта и без него, от высоты плотины (створ 2, выс. 159.48)

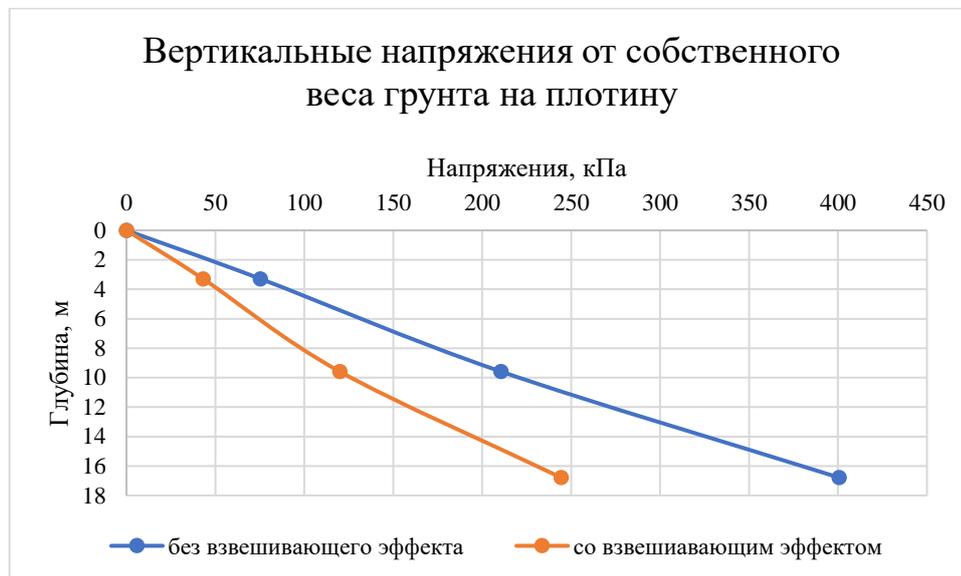


График зависимости горизонтальных напряжений от высоты плотины (створ 2, выс. 159.48)



График зависимости вертикальных напряжений собственного веса грунта с учетом взвешивающего эффекта и без него, от высоты плотины (створ 3, выс. 184.43)

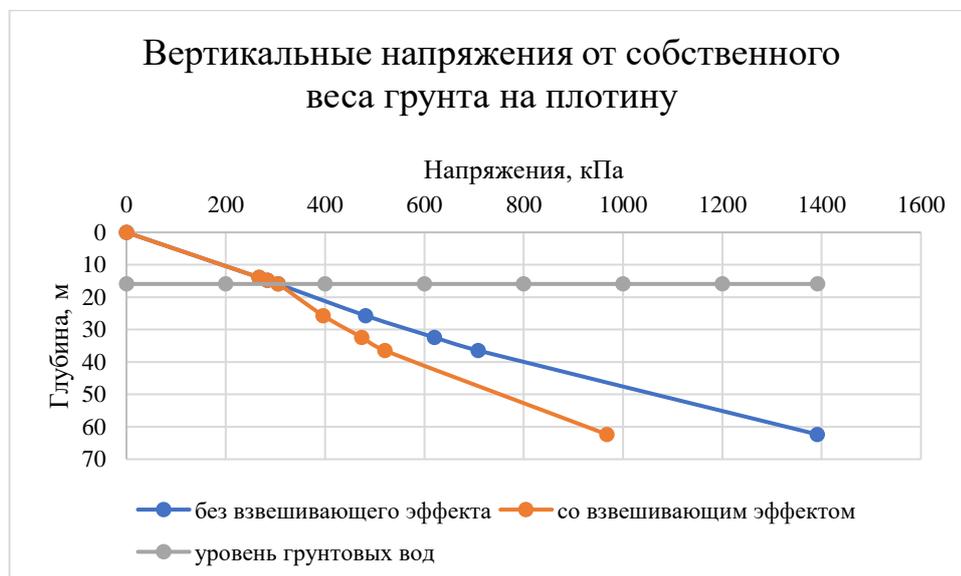


График зависимости горизонтальных напряжений от высоты плотины (створ 3, выс. 184.43)

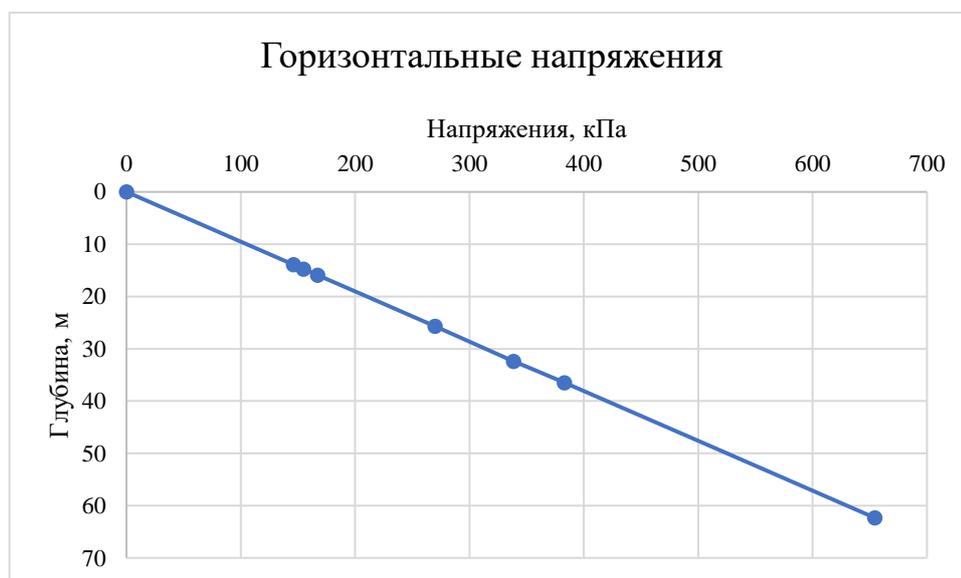


График зависимости вертикальных напряжений собственного веса грунта с учетом взвешивающего эффекта и без него, от высоты плотины (створ 3, выс. 171.18)

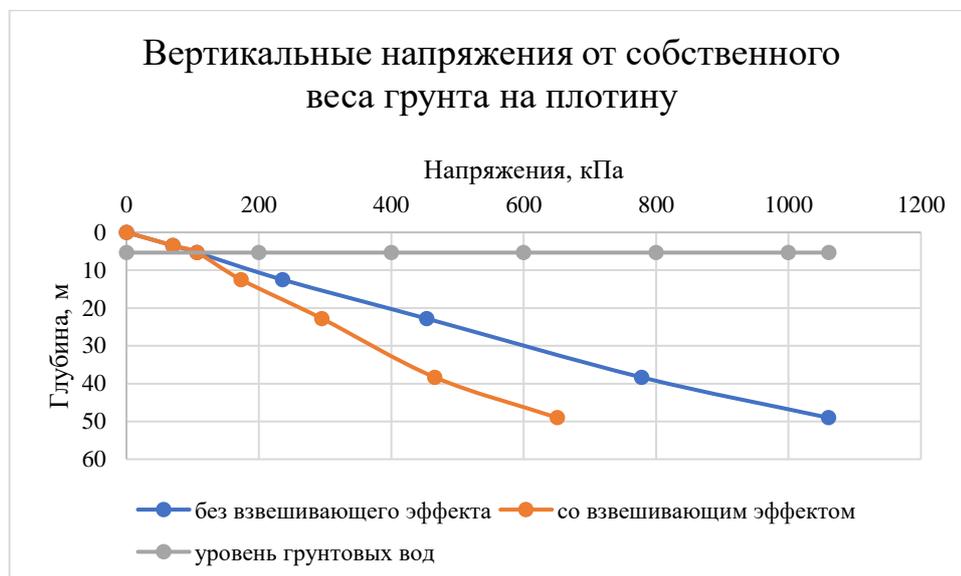


График зависимости горизонтальных напряжений от высоты плотины (створ 3, выс. 171.18)

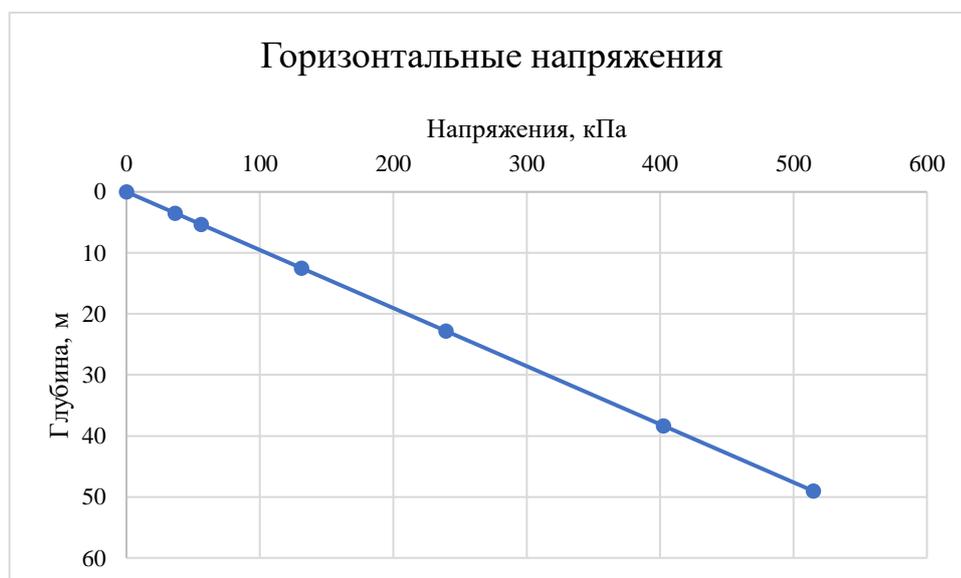


График зависимости вертикальных напряжений собственного веса грунта с учетом взвешивающего эффекта и без него, от высоты плотины (створ 3, выс. 157.93)

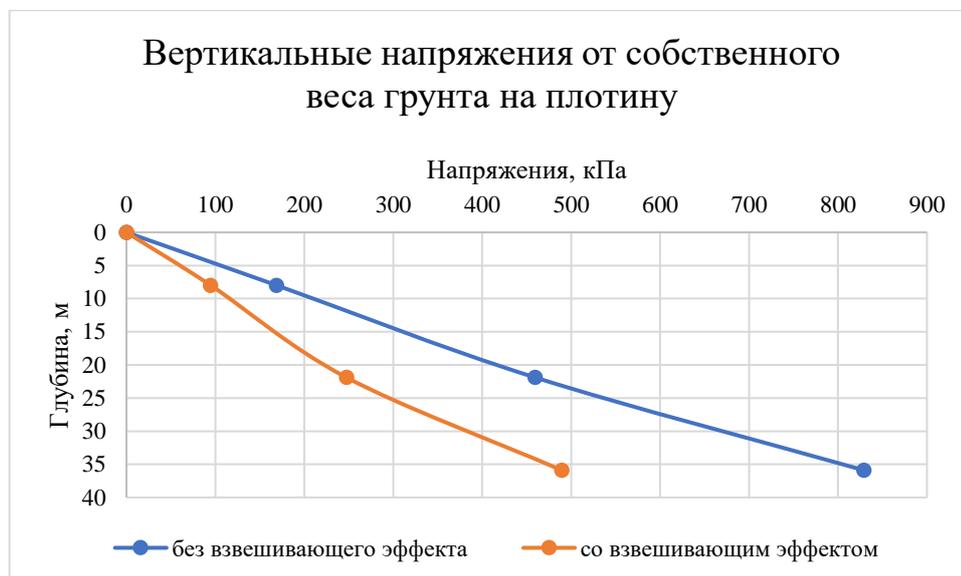


График зависимости горизонтальных напряжений от высоты плотины (створ 3, выс. 157.93)

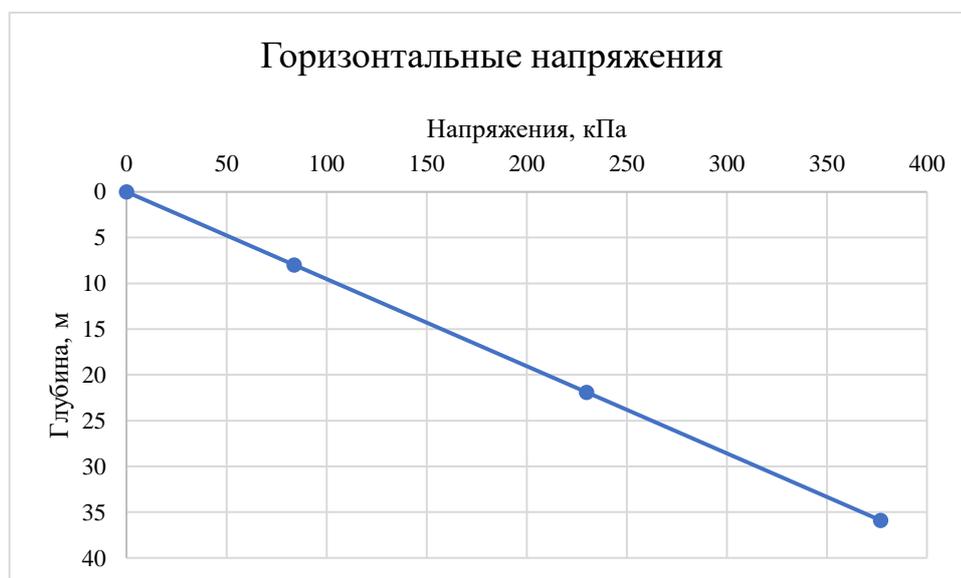


График зависимости вертикальных напряжений собственного веса грунта с учетом взвешивающего эффекта и без него, от высоты плотины (створ 4, выс. 184.72)

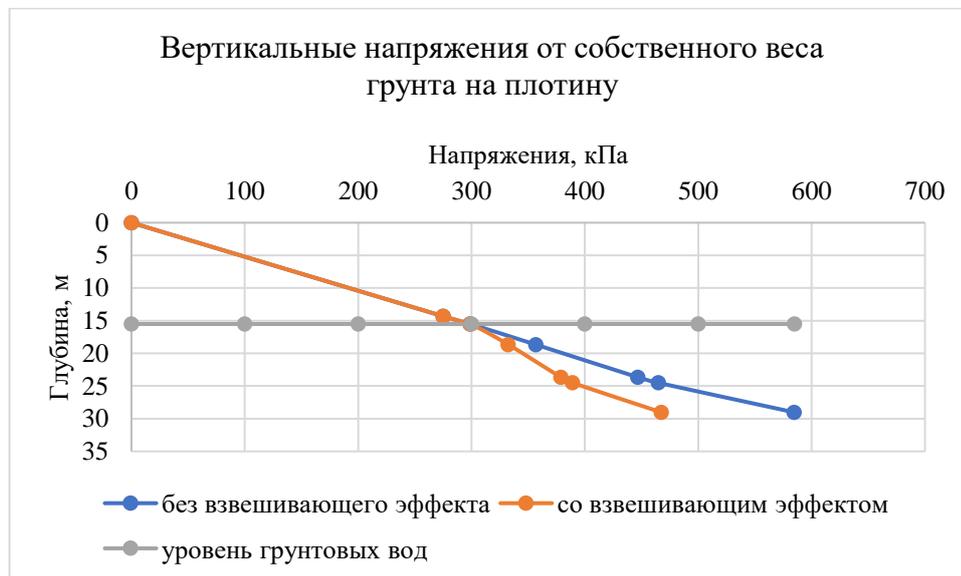


График зависимости горизонтальных напряжений от высоты плотины (створ 4, выс. 184.72)

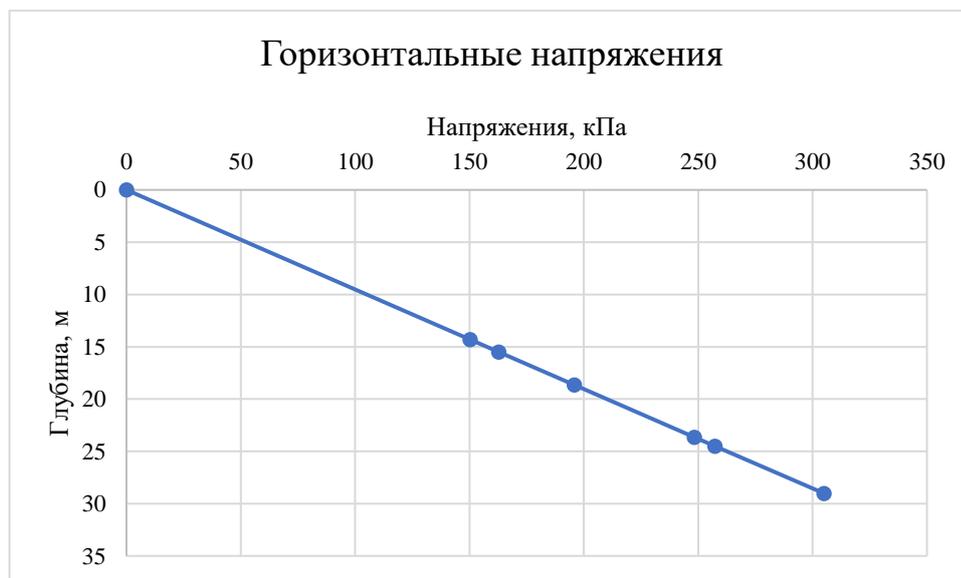


График зависимости вертикальных напряжений собственного веса грунта с учетом взвешивающего эффекта и без него, от высоты плотины (створ 4, выс. 178.14)

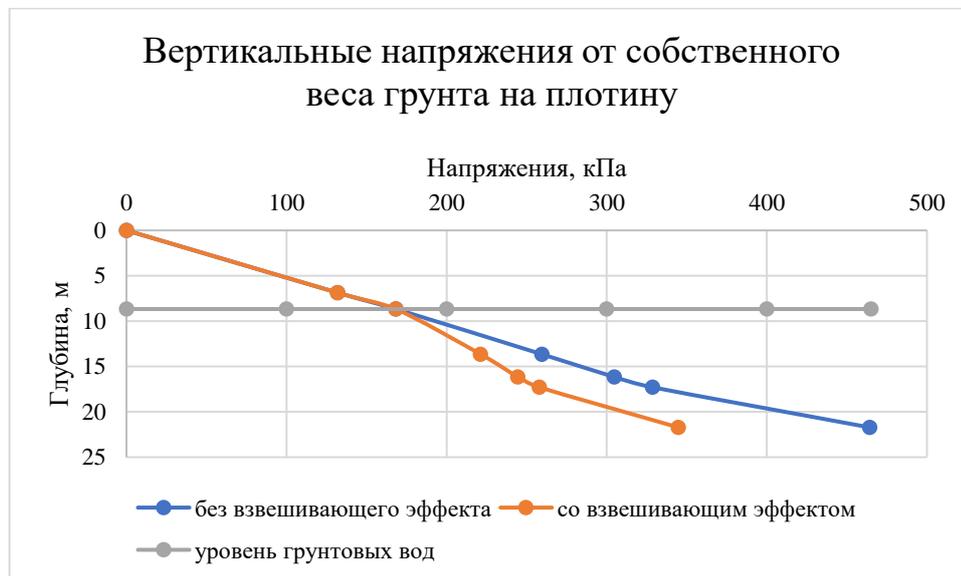


График зависимости горизонтальных напряжений от высоты плотины (створ 4, выс. 178.14)

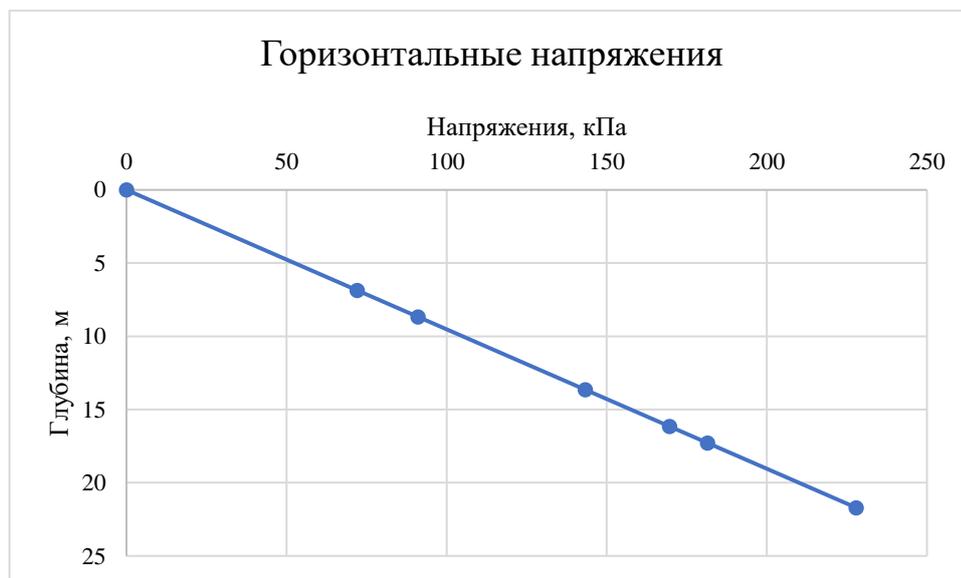


График зависимости вертикальных напряжений собственного веса грунта с учетом взвешивающего эффекта и без него, от высоты плотины (створ 4, выс. 171.56)

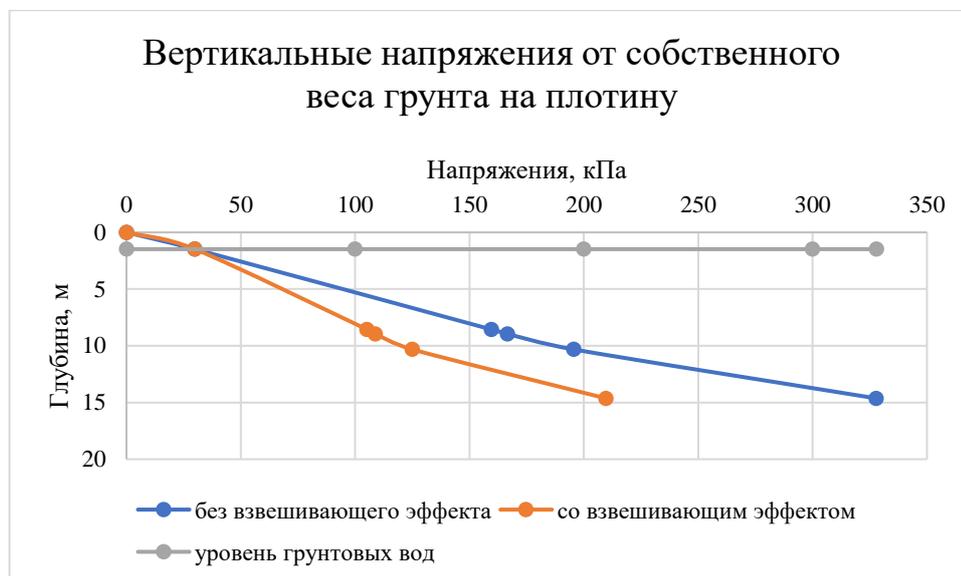
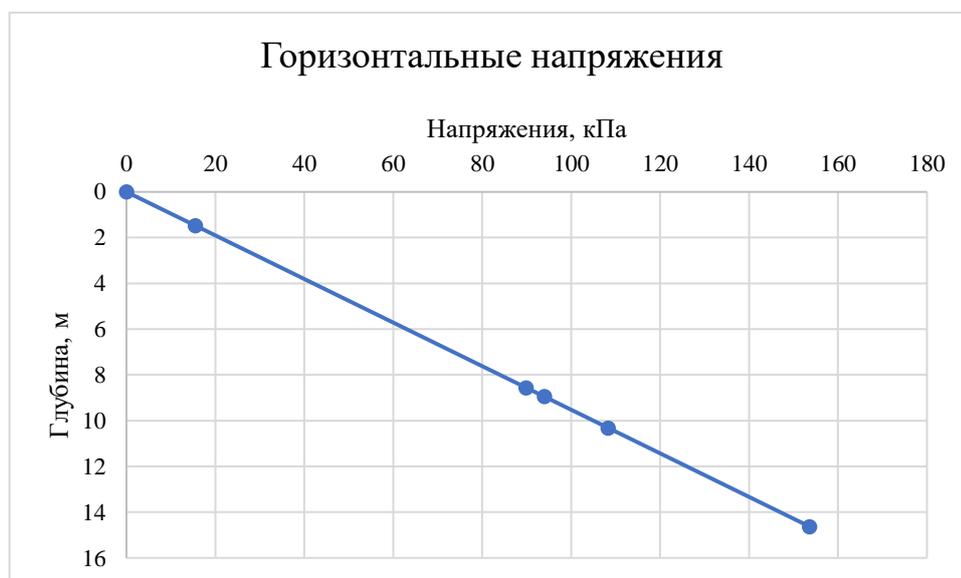
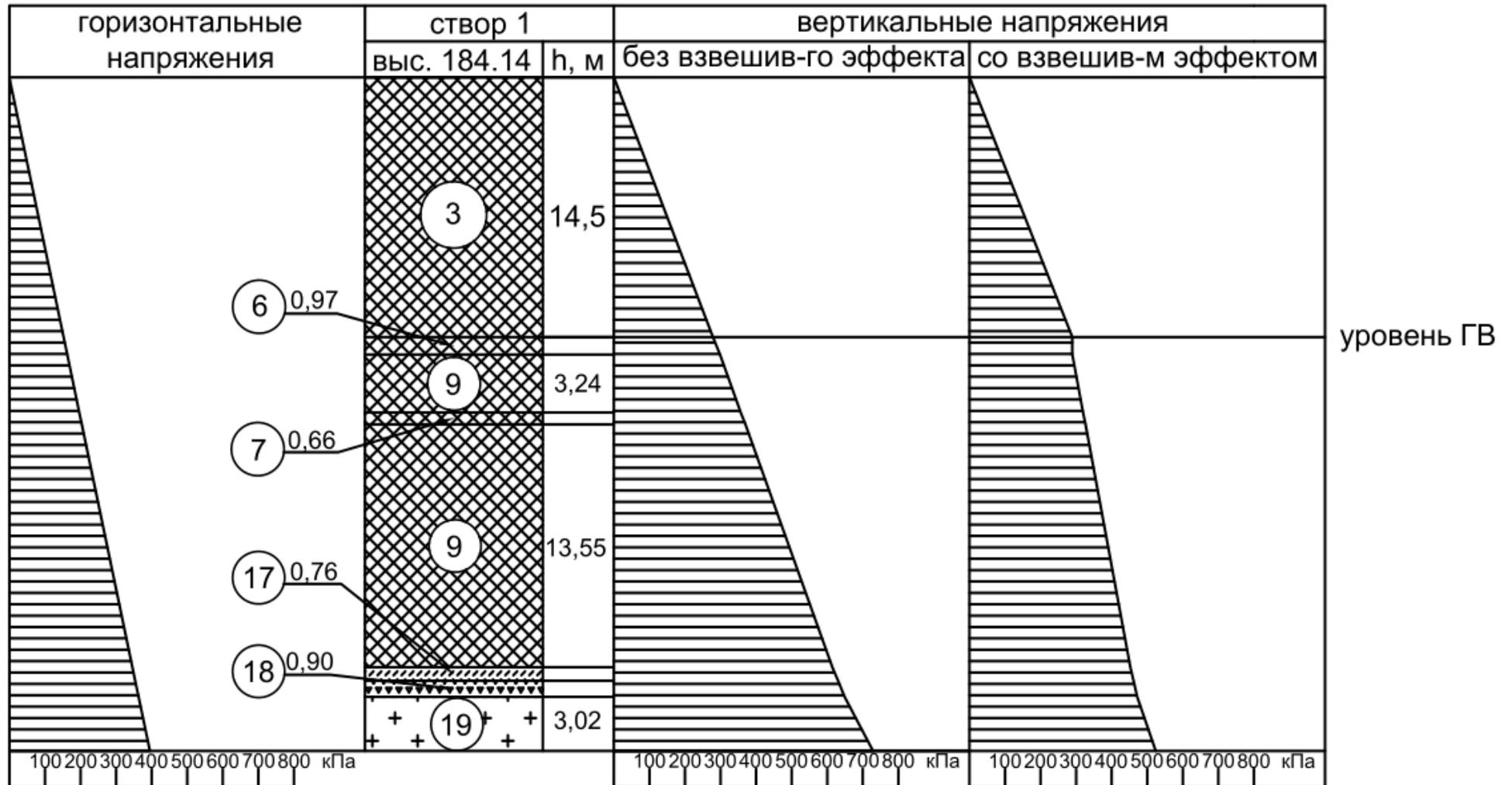


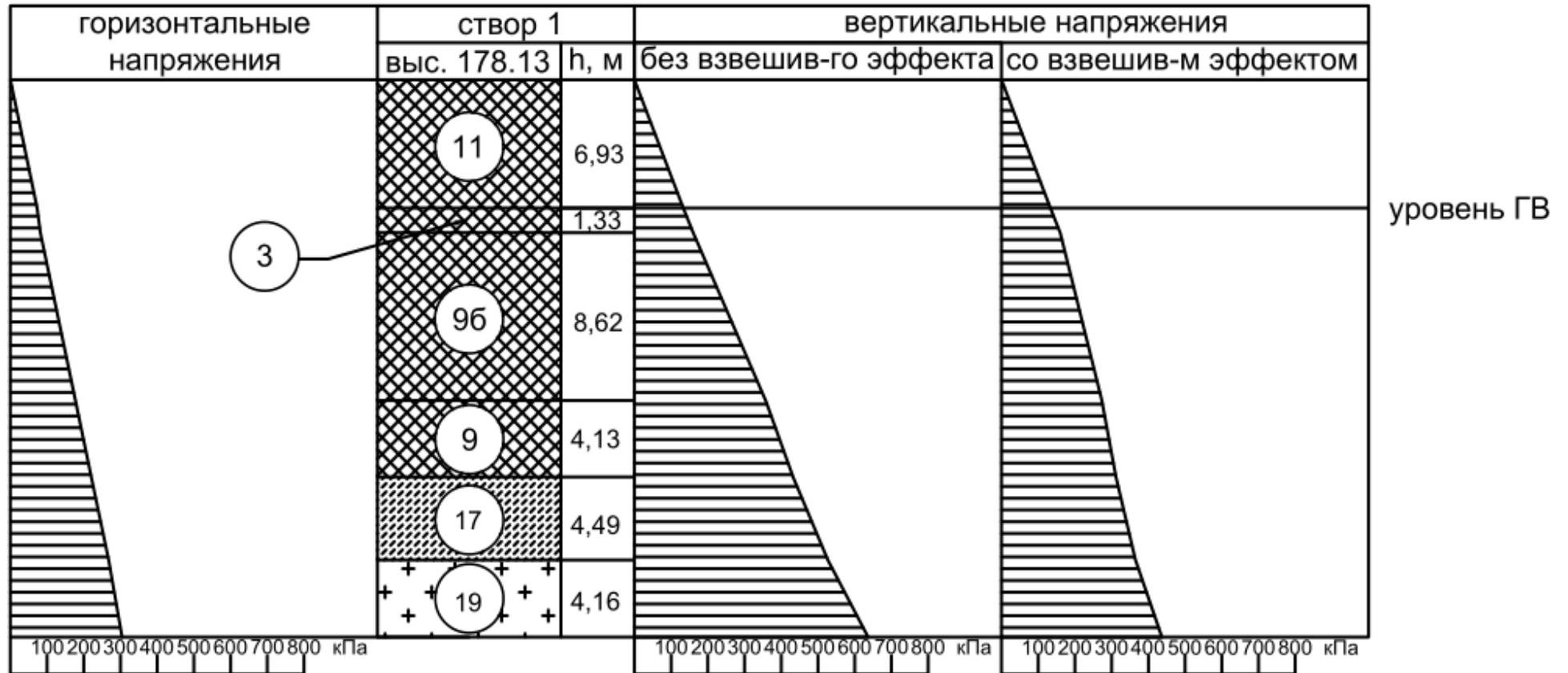
График зависимости горизонтальных напряжений от высоты плотины (створ 4, выс. 171.56)



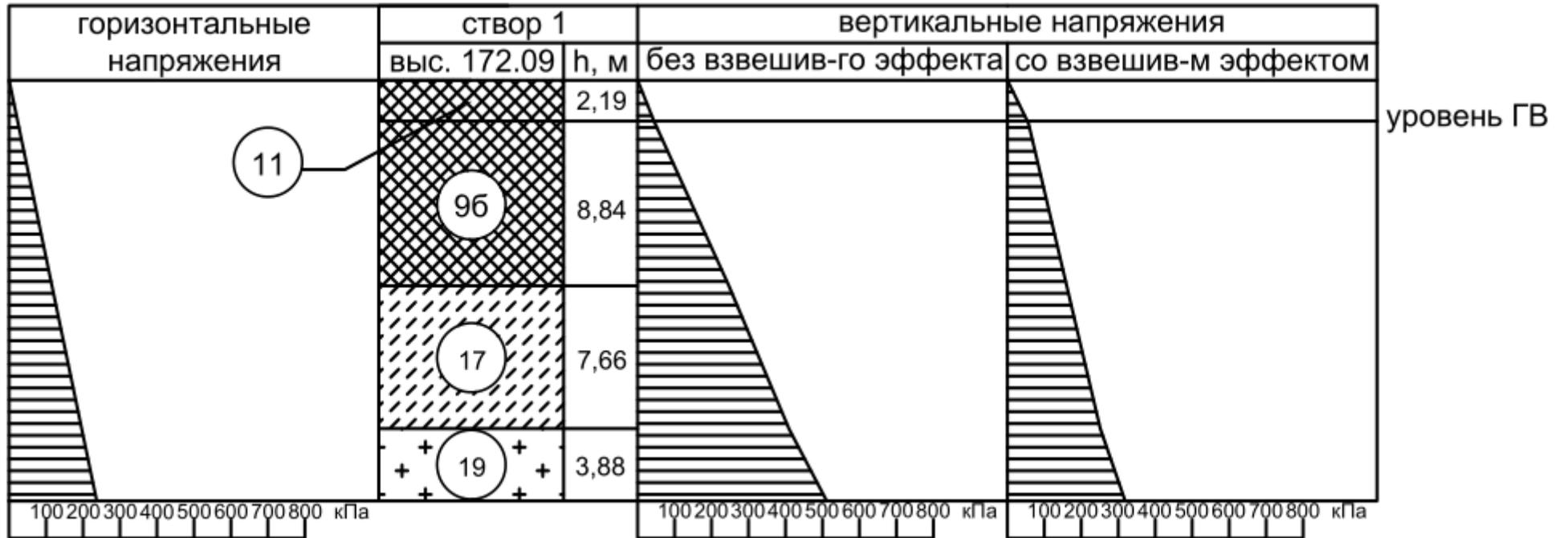
Эпюры вертикальных и горизонтальных напряжений (створ 1, выс. 184.14)



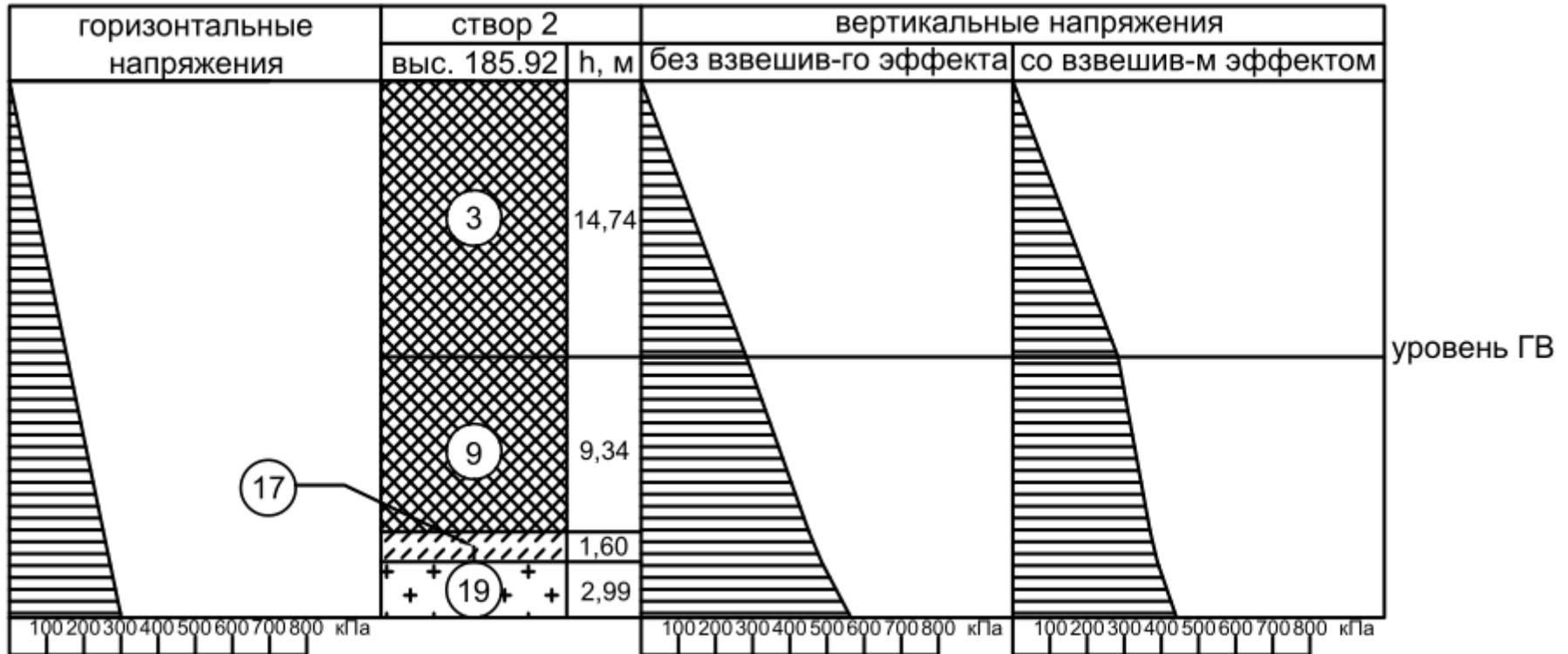
Эпюры вертикальных и горизонтальных напряжений (створ 1, выс. 178.13)



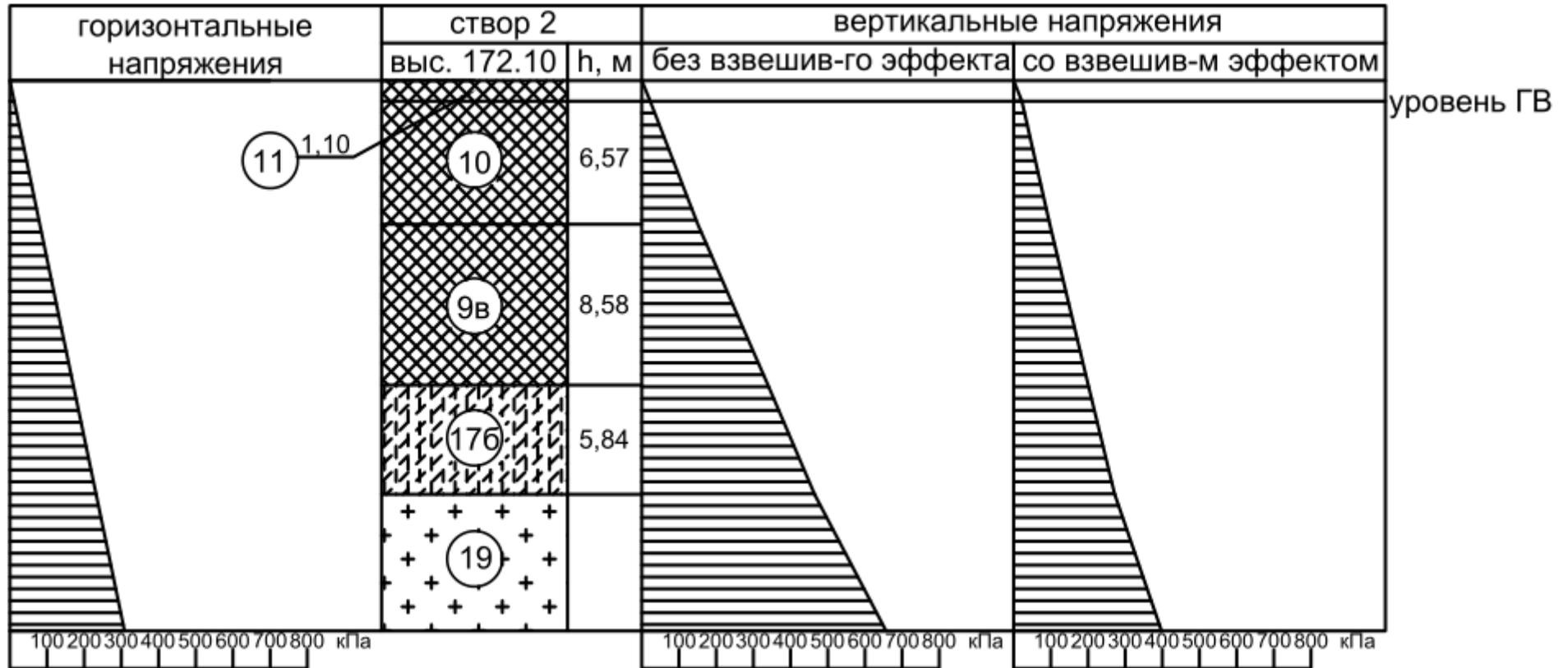
Эпюры вертикальных и горизонтальных напряжений (створ 1, выс. 172.09)



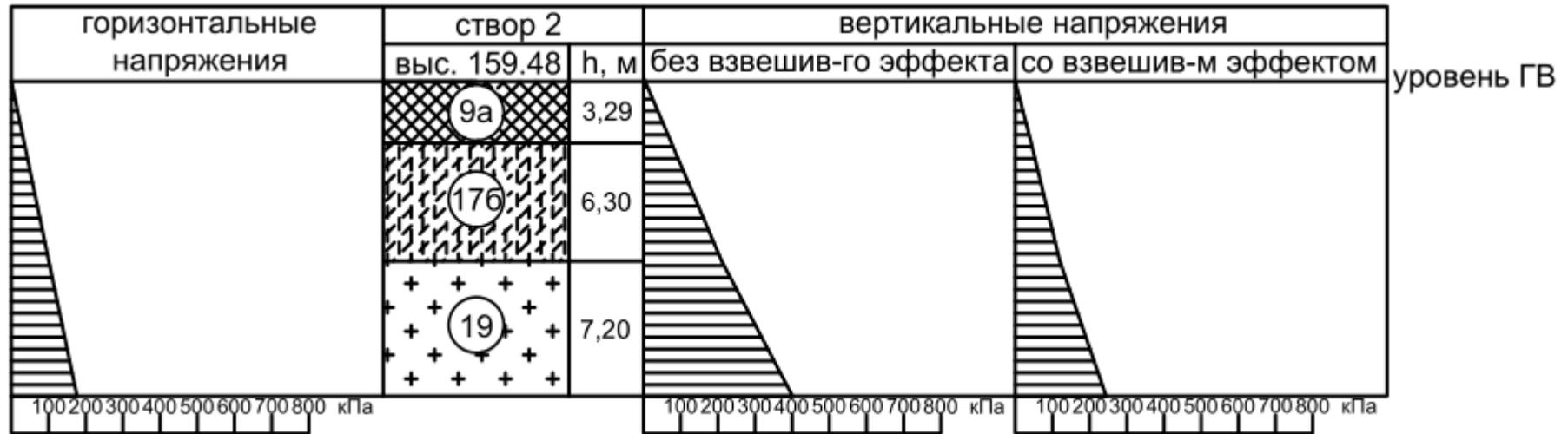
Эпюры вертикальных и горизонтальных напряжений (створ 2, выс. 185.92)



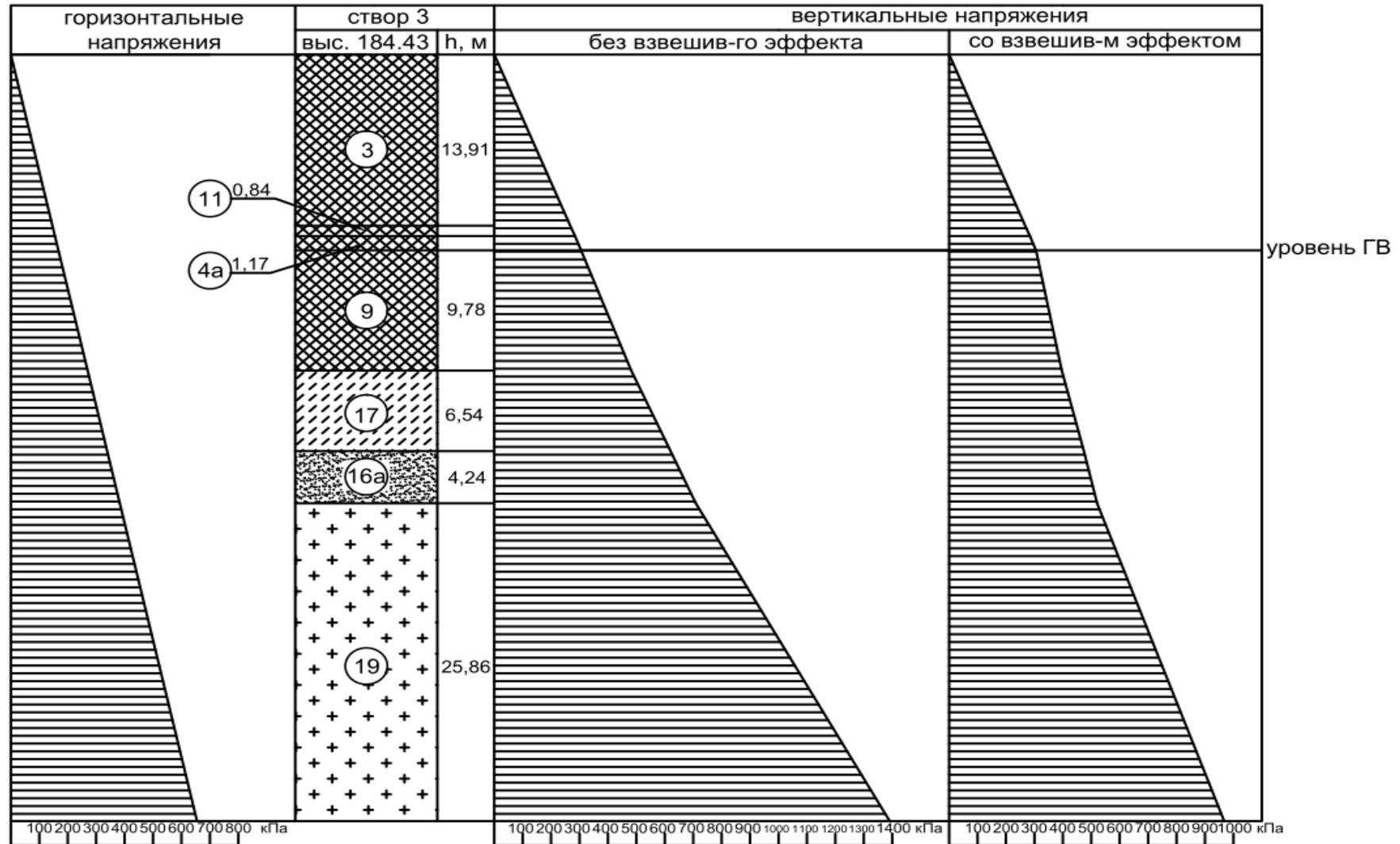
Эпюры вертикальных и горизонтальных напряжений (створ 2, выс. 172.10)



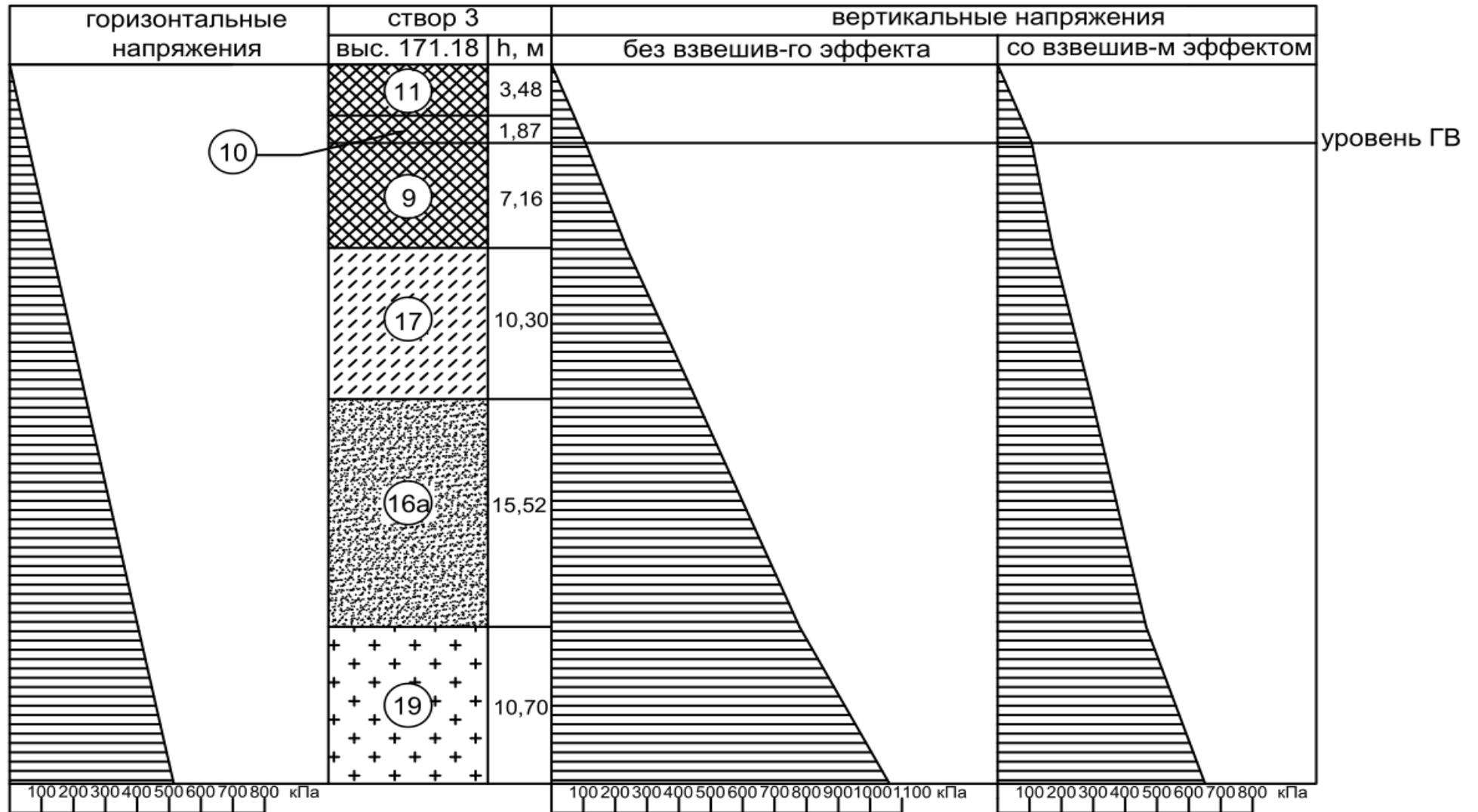
Эпюры вертикальных и горизонтальных напряжений (створ 2, выс. 159.48)



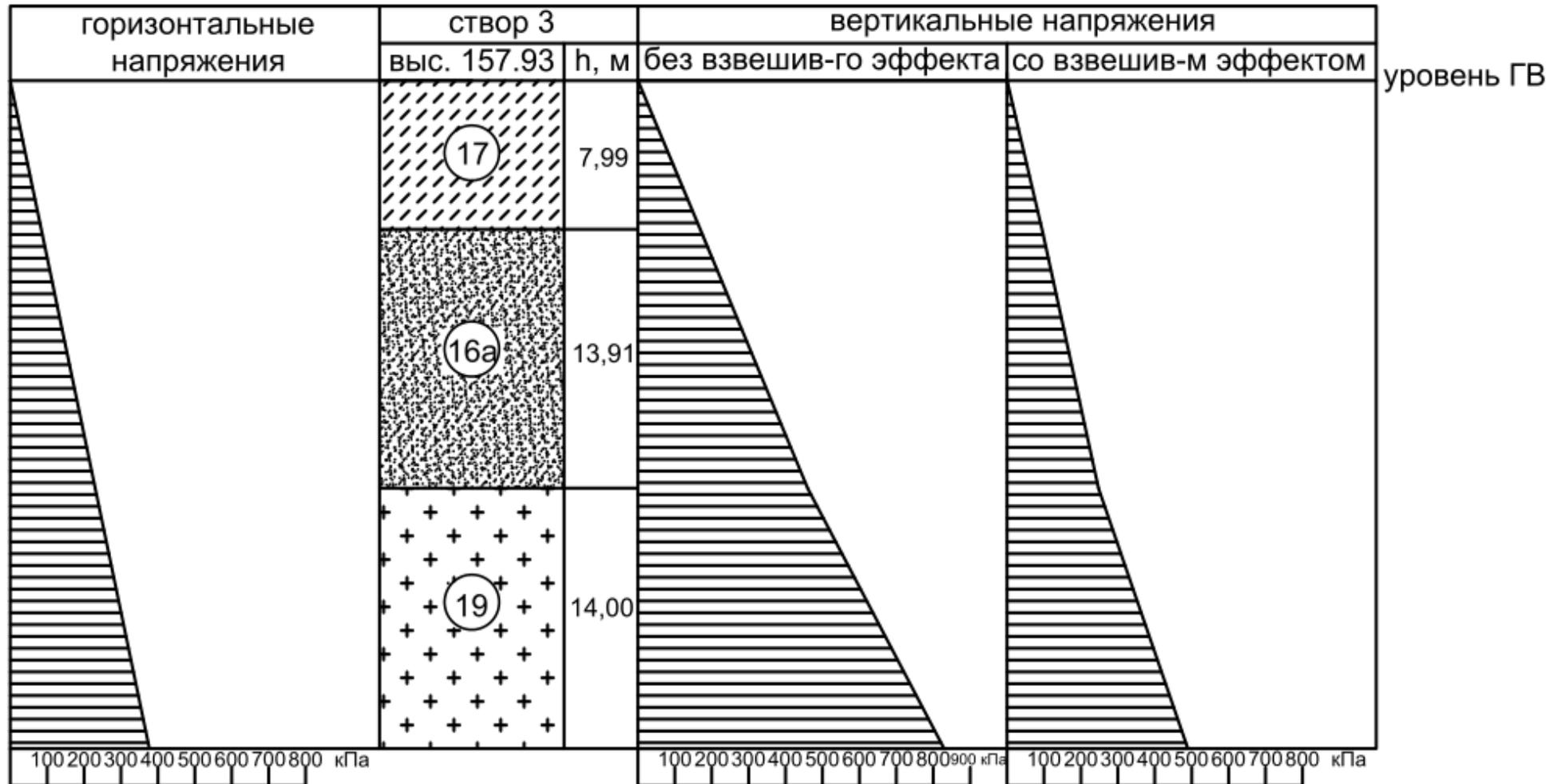
Эпюры вертикальных и горизонтальных напряжений (створ 3, выс. 184.43)



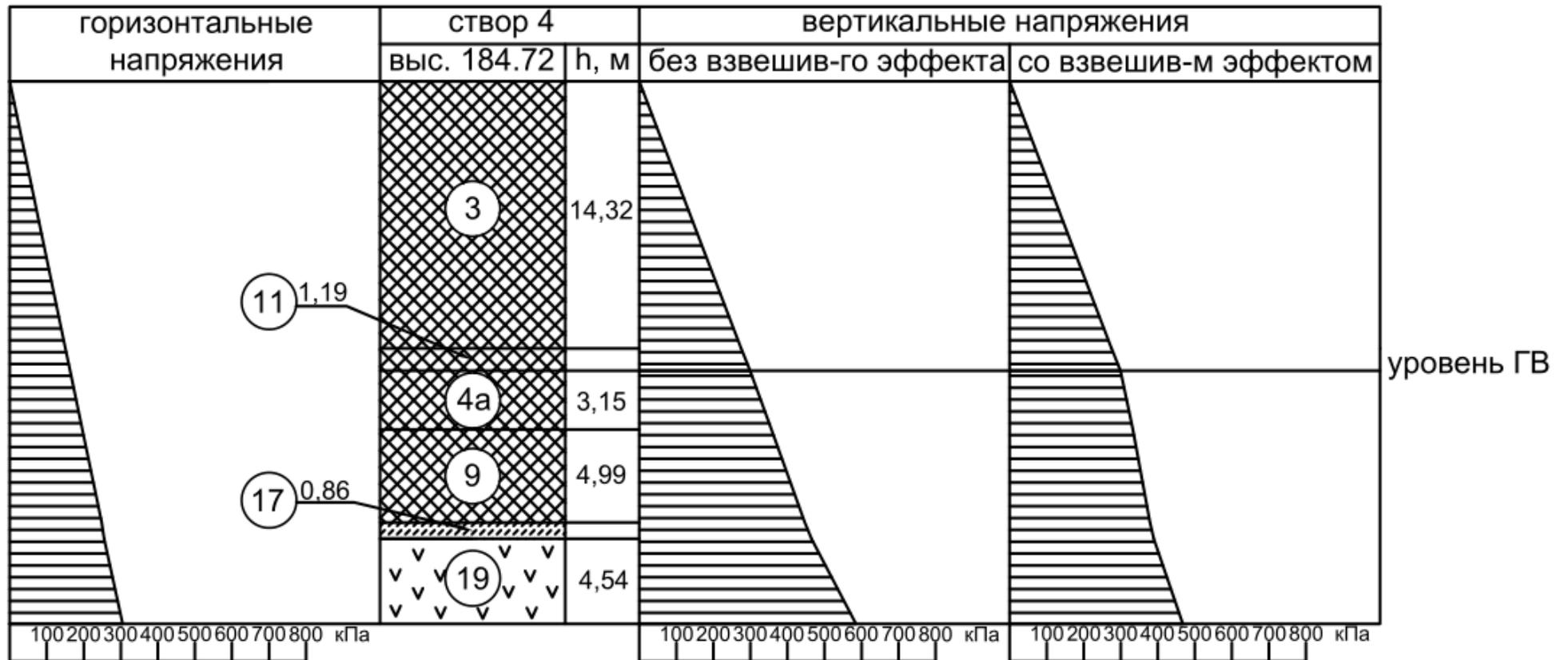
Эпюры вертикальных и горизонтальных напряжений (створ 3, выс. 171.18)



Эпюры вертикальных и горизонтальных напряжений (створ 3, выс. 157.93)



Эпюры вертикальных и горизонтальных напряжений (створ 4, выс. 184.72)



Эпюры вертикальных и горизонтальных напряжений (створ 4, выс. 178.14)



Эпюры вертикальных и горизонтальных напряжений (створ 4, выс. 171.56)

