

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Институт наук о Земле

Кафедра грунтоведения и инженерной геологии

**Пантелеева Екатерина Сергеевна**

**Исследование взаимодействий ММП (многолетнемерзлых пород) с  
сооружениями инфраструктуры на трассе магистрального  
газопровода Ямал-центр в Большеземельской тундре**

Магистерская диссертация

По направлению 05.04.01 «Геология»

«К ЗАЩИТЕ»

Научный руководитель:  
к.г.-м.н., доц. В. А. Усов

---

«    » \_\_\_\_\_ 2016

Санкт-Петербург

2016

## Оглавление

Введение .....	3
Глава 1. Геолого-геоморфологический очерк.....	5
1.1 Физико-географическая характеристика района.....	5
1.2 Геологическое строение территории.....	8
1.2.1 Стратиграфия .....	8
1.2.2 Тектоника .....	14
1.3. Гидрогеологическая характеристика района.....	17
1.4. Геокриологические условия района исследования .....	18
Глава 2. Инженерно-геокриологические условия участка строительства.....	24
2.1 Характеристика участка изысканий .....	24
2.2 Геолого-литологическое строение и структуризация разреза .....	24
2.3 Геокриологические условия участка.....	29
2.4. Криогенные процессы.....	30
Глава 3. Прогнозные инженерно-геологический расчеты.....	31
3.1. Теплофизические характеристики .....	31
3.2 Расчет нормативной глубины сезонного оттаивания по СП 25.13330.2012.....	35
3.3 Расчет глубин сезонного протаивания в естественных условиях по методике В. А. Кудрявцева.....	38
3.4 Прогноз изменения кровли ММП под дорожной насыпью .....	43
3.5 Устойчивость сваи мостового перехода через речку на правом берегу реки .....	47
3.6 Оценка вероятности термокарста.....	51
3.6.1. Расчёт глубины протаивания грунтов при увеличении мощности снежного покрова под дренажными канавами .....	51
3.6.2. Расчёт глубины протаивания грунтов под дном мелкого водоёма.....	51
3.7 Глубина протаивания под домом для дорожных рабочих .....	57
Заключение .....	61
Список литературы .....	62
Приложения .....	64

## Введение

Изыскиваемая территория расположена в республике Коми, в северо-восточной части Большеземельской тундры, в 50 км южнее г. Воркуты (рис. 1). Данная территория характеризуется сложными инженерно-геологическими условиями, в связи с приуроченностью к зоне распространения многолетнемерзлых пород (ММП).

В качестве исходных данных для выполнения расчётов были использованы материалы, предоставленные ПАО «Ленгипротранс».



Рис. 1. Схема расположения района работ (<https://yandex.ru/maps>).

**Актуальность работы.** Составление прогноза на основании изучения взаимодействия ряда сооружений инфраструктуры с многолетнемерзлыми породами (ММП) и особая актуальность состоит в том, что вся инфраструктура приурочена к магистральному газопроводу.

**Объект исследования.** Отложения Казанцевской террасы верхнего неоплейстоцена  $Q_{III}$  северо-восточной части Большеземельской тундры.

Целью данной дипломной работы является изучение инженерно-геокриологических условий территории и прогноз их изменения.

Для этого были поставлены следующие задачи:

- 1) Сбор и анализ литературных данных;
- 2) Построение инженерно-геологического разреза в графической среде AutoCAD 2013;
- 3) Расчет нормативной глубины сезонного оттаивания согласно СП 25.13330.2012;
- 4) Расчет глубины сезонного протаивания грунтов в естественных условиях по методике В.А. Кудрявцева;
- 5) Прогноз изменения кровли ММП под дорожной насыпью по методике Л. Н. Хрусталева;
- 6) Расчет устойчивости свай мостового перехода через речку;
- 7) Оценка вероятности развития термокарста под дренажными канавами и под дном мелких водоёмов;
- 8) Расчет глубины протаивания грунтов под зданием - тепловыделителем.

# Глава 1. Геолого-геоморфологический очерк

## 1.1 Физико-географическая характеристика района

В физико-географическом отношении рассматриваемая территория относится к западному склону Полярного Урала, а именно к Передовому прогибу Урала, Косью-Роговской впадине (Ершов и др., 1988).

Большая часть описываемой территории представляет собой пологоволнистую низменность (рис. 2). Четко выделяются в рельефе возвышенности Уральского хребта, Пай-Хоя и Тимана (Сидоренко, 1970).

Район изысканий расположен в северо-восточной части Большеземельской тундры, в 50 км южнее г. Воркуты. Рассматриваемая территория практически не обжита, за исключением поселка Елецкий в восточной части рассматриваемой территории.

Относительная выровненность рельефа, характерная для большей части рассматриваемой территории, препятствует быстрому стоку атмосферных осадков, что значительно улучшает условия питания подземных вод.

### Климат

Климат территории формируется в условиях малого количества солнечной радиации под воздействием северных морей и интенсивного западно-восточного переноса. Океаническое влияние преобладает над материковым и континентальность климата возрастает по мере продвижения вглубь континента.

На климате рассматриваемой территории сказалось ее положение на окраине Европейского материка, граничащего на севере с бассейном холодных морей, а на востоке – с Уральским хребтом. Характерной особенностью этой части России является суровость климата, которая возрастает как с юга на север, так и с запада на восток, является продолжительная холодная зима, сменяющаяся коротким и прохладным летом. Преобладающее направление ветров – юго-западное и западное.

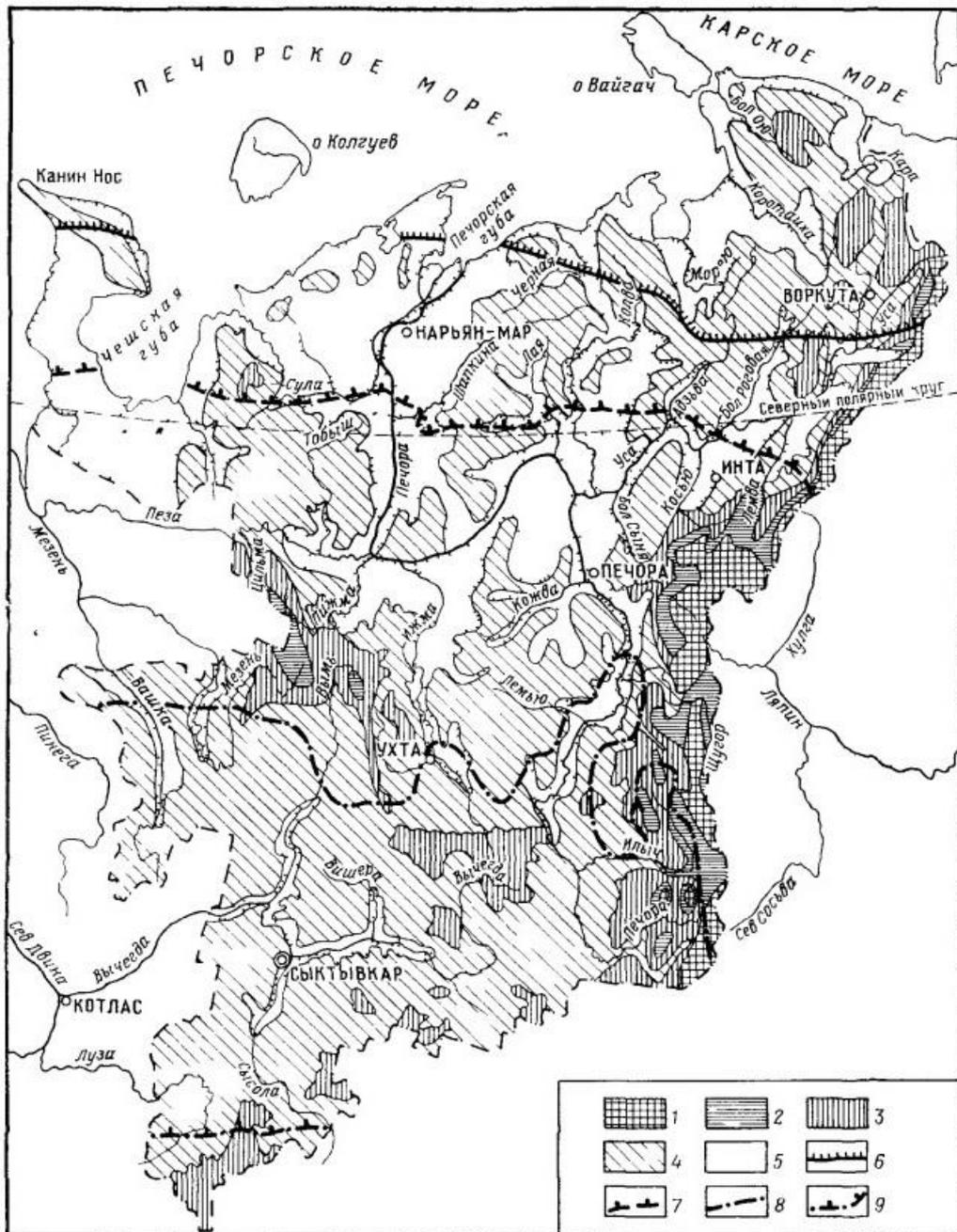


Рис. 2. Схематическая карта рельефа и географической зональности растительности республики Коми и Ненецкого автономного округа Архангельской области (Сидоренко, 1970).

Условные обозначения: Абсолютные высоты (в м) 1 – свыше 500, 2 – 300-500, 3 – 200-300, 4 – 100-200, 5 – 0-100. Южные границы зон растительности, 6 – тундры, 7 – лесотундры, 8 – северной тайги, 9 – средней тайги.

Зима в Коми, с округлением календарных месяце, продолжается с ноября по апрель. Лето продолжается три месяца (июнь-август). Первые ночные морозы, указывающие на начало осени, наблюдаются на севере во второй половине августа.

Переход от летнего режима погоды к зимнему происходит на протяжении одного месяца и оканчивается к началу октября.

Самым холодным месяцем является январь, средняя температура в котором составляет минус 20,1 °С. Абсолютный минимум температуры воздуха – минус 52,5 °С отмечен в декабре.

В зимние месяцы при скоростях ветра более 5 м/сек снег на открытых участках подвергается сносу и уплотнению. Мощность снежного покрова колеблется от 0,2-0,3 м на открытых возвышенных участках до 1,5-2 м и более в межблочных понижениях, полосах стока и др. В летние месяцы ведущее значение в формировании климата приобретают радиационные факторы. В зимний период радиационный баланс отрицателен и его приходной статьей становится теплотокки из атмосферы и почвогрунтов.

Характерные значения температур для данной территории приведены в таблице:

*Табл.1. Средняя месячная и годовая температура воздуха:*

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
П. Елецкий	-20,1	-19,3	-14,3	-9,7	-1,9	7,3	13,4	10,0	4,3	-4,5	-13,4	-17,1	-5,5

**Орогидрография.** Регион представляет собой полого-холмистую равнину, опускающуюся на север серией морских террас. Средние абсолютные отметки поверхности составляют 50-180 м. В Приуралье развиты участки денудационной и денудационно-аккумулятивной равнины.

Гидрографическая сеть принадлежит бассейну Карского и Печорского морей. Наиболее крупной рекой является Печора и её приток – Уса. В среднем и нижнем течении долины рек имеют корытообразный профиль, где прослеживаются пойма и серия надпойменных террас. Руслу рек сильно меандрируют, в днищах долин много пойменных и старичных озер.

Равнинный рельеф и высокая влажность воздуха обусловили сильную заозерность и заболоченность. Выделяют эрозионно-тектонические, старичные и термокарстовые озера. Болота развиты на всех геоморфологических уровнях: на низких

морских террасах, лайде, в пойме крупных рек заболоченность местами превышает 50%. Болота преимущественно грядово-мочажинные и крупнобугристые, безлесные.

**Растительность.** Регион расположен в тундровой природно-климатической зоне.

Преобладающей древесной растительностью здесь является карликовая береза, а в долинах рек встречаются заросли ивняка. Более двух третей площади тундры (70,8%) заторфовано. Характерна значительная заболоченность местности; преимущественным развитием пользуются бугристые болота. Отдельные возвышенные участки покрыты моховыми лишайниковыми тундрами.

## 1.2 Геологическое строение территории

### 1.2.1 Стратиграфия

Формирование складчатого фундамента происходило в позднем протерозое – начале кембрия. Отложения складчатого фундамента залегают на глубине более 8 км с погружением на юго-восток.

**Фундамент.** В строении фундамента Тимано-Печорской плиты выделяются два мегаблока - юго-западный Тиманский и северо-восточный Большеземельский (рис. 3). В западной части фундамента господствуют рифейские метаморфические сланцы низших ступеней метаморфизма с отдельными массивами основных и ультраосновных пород. С востока «сланцевая» область ограничивается линейной зоной, для которой можно предполагать наличие широкого петрографического разнообразия консолидированных образований - от слабометаморфических до высокометаморфизованных комплексов и изверженных пород от кислого до ультраосновного состава. Вдоль этой полосы тектонических разломов (Припечорского и Илыч-Чикшинского) повсеместно распространены магматиты и вулканогенно-осадочные породы. Для восточных участков характерны габбро, габбро-диориты, диориты, плагиограниты, т. е. породы с исходной базальтовой магмой. Среди вулканогенных пород широко распространены эффузивы известково-щелочной серии. Кровля фундамента здесь залегает на глубине более 8 км. Вещественный состав магматических ассоциаций свидетельствует о том, что их образование в позднем

протерозое было связано с геодинамической обстановкой, свойственной островным дугам (Метелкин, Верниковский, 2005).

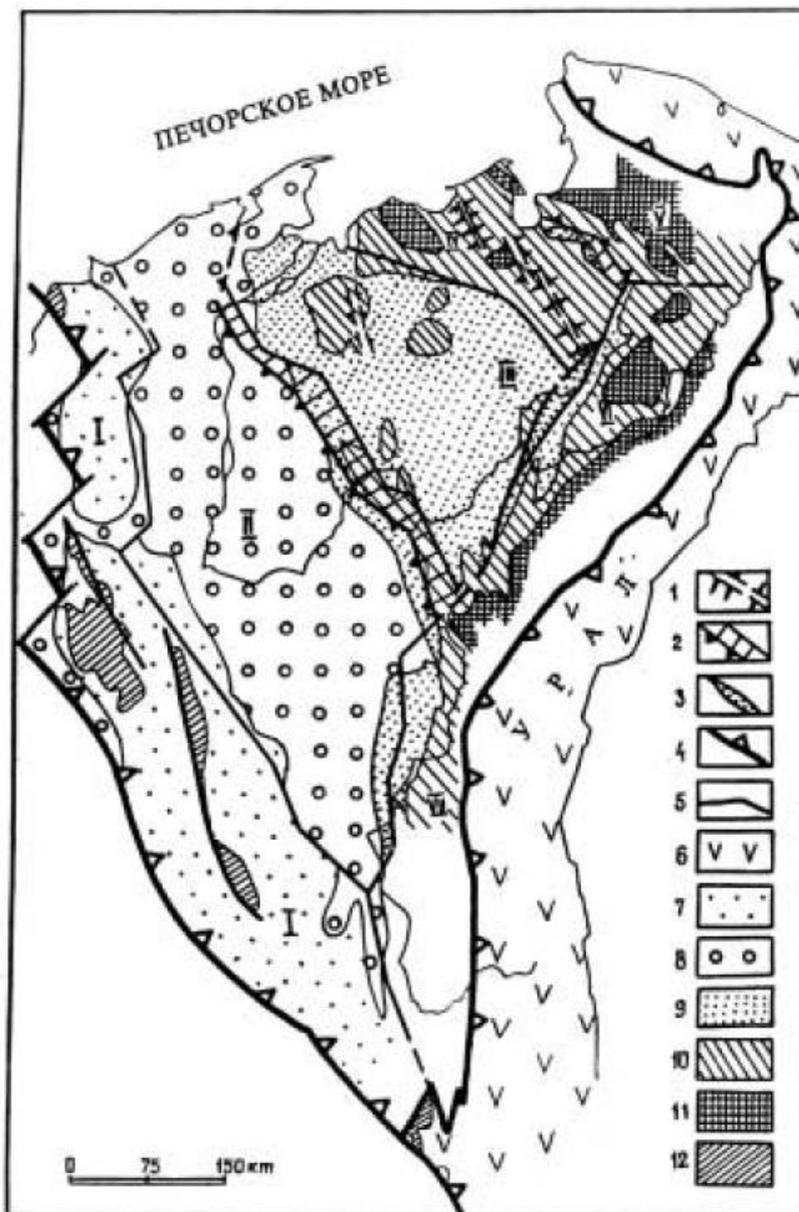


Рис. 3. Схема районирования фундамента Тимано-Печорской плиты (Метелкин, Верниковский, 2005)

Условные обозначения: 1 - оси палеоспединга; 2 – зоны палеосубдукции (коллизии); 3 – зона кулисообразных структур Гряды Чернышева (трансформная зона); 4 – Главный Уральский и Западно-Тиманский краевые швы (надвиги); 5 – разломы; 6 – Уральский складчатый пояс; 7-12 – области с различной глубиной кровли консолидированной коры (км): 7 – менее 2, 8 – 2-4, 9 – 4-6, 10 – 6-8, 11 – более 8; 12 – выходы фундамента на дневную поверхность. I-VII – Блоки (микроплиты) земной коры: I – Тиманский, II – Ижма-Печорский, III – Денисовско-Хорейверский, IV – Малоюский, V – Кортаихинский, VI – Косью-Роговский, VII – Верхнепечорский.

**Осадочный чехол** передового прогиба представлен породами от ордовика до перми (рис. 4).

Карбон. Верхний – представлен молассаами – терригенно-карбонатными породами, часто с прослоями конгломератов, мощностью более 1 км. Поздний карбон – образовались небольшие рифовые массивы вдоль западного края Предуральского краевого прогиба (Короновский, 1976).

Раннепермское время (отложения ассельского и сакмарского ярусов) – флишоидные терригенные породы: песчаники и алевролиты, конгломераты, глинистые сланцы с редкими прослоями известняков. Наблюдается определенная ритмичность в строении этих толщ, когда в основании ритма располагаются более грубые садки. Мощность отложений достигает 0,6-0,7 км. В западных районах Предуральского краевого прогиба формировались крупные рифовые массивы, сложенные криноидно-фузулиновыми известняками. Западнее полосы рифов отложения представлены органогенными слоистыми известняками с минимальной примесью глин. Часто наблюдаются небольшие линзы рифовых известняков и кремней, а местами – ангидритов и гипсов. Мощность редко превышает 250 м.

Артинский ярус – на востоке накапливались терригенные породы с широким развитием конгломератов мощностью около 1 км. На западе – продолжали формироваться рифовые массивы с маломощными межрифовыми глинами и мергелями. Мощность отдельных рифов превышала 0,5 км.

Кунгурский ярус. Морские отложения к востоку постепенно начинают сменяться лагунными, а затем и континентальными. В пределах восточного борта краевого прогиба кунгурские отложения представлены полимиктовыми песчаниками, аргиллитами с линзами конгломератов, гипсов и ангидритов. Местами встречаются пачки известняков. Мощность осадков достигает 1 км.

Верхняя пермь представлена в основном континентальными отложениями – терригенно-карбонатно-сульфатными отложениями, чередующимися прослоями песчаников, мергелей, доломитов, глин, гипсов и ангидритов общей мощностью до 0,5 км.

Татарский ярус. Слагается мощной (до 0,5 км) толщей красноцветных и пестроцветных разномерных песчаников и конгломератов, которые чаще всего

образуют линзы в песчаниках. На востоке преобладают наиболее грубые разности, а к западу появляются прослои и пачки карбонатных пород.

Таким образом, Предуральский краевой прогиб выполнен мощной толщей в основном пермских отложений, среди которых распространены морские (в низах) и континентальные (в верхах) отложения. В нижней перми развита соленосная толща, к северу замещающаяся угленосной. В пределах всего прогиба в его восточной половине, по сравнению с западной, преобладают более грубые породы.

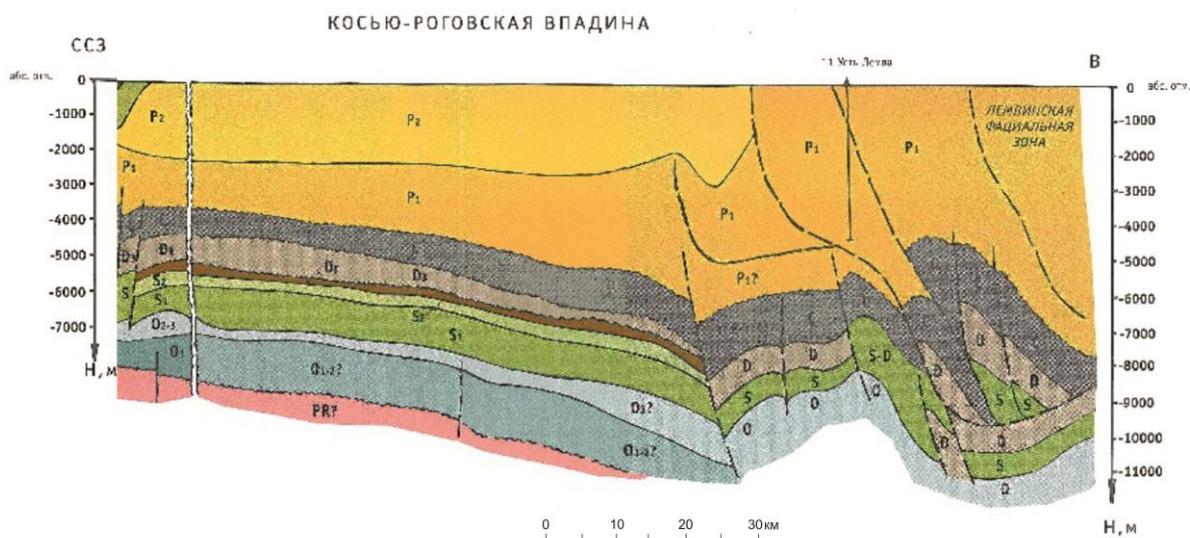


Рис. 4. Схематический субширотный разрез по северной части Тимано-Печорского седиментационного бассейна (Тимано-Печорский..., 2000)

Средний Неоплейстоцен (роговская  $Q_{II}rg$  и вашуткинская  $Q_{II}vsh$  свиты).

Ледниково-морские отложения пользуются наибольшим распространением в Большеземельской тундре (рис. 5). Они представлены роговской толщей, залегающей на морских или лагунноморских отложениях падимейской толщи. В пределах Печорской низменности повсеместно распространена мощная (до 150-200 м) толща пород преимущественно глинисто-суглинистого состава, подстилаемая и перекрываемая песками, песками с галькой и галечниками. В строении разреза снизу вверх нашла полное отражение закономерная схема фаз крупной морской трансгрессии: мелководные галечники, пески, алевриты; глубоководные глины, суглинки; вновь мелководные пески, галечники регрессивного этапа развития трансгрессии. Пески и галечники трансгрессивной фазы волнисто- и косослоистые,

содержат редкие остатки фауны морских моллюсков и небогатые комплексы микрофауны фораминифер. Глины и суглинки фазы максимума трансгрессии содержат остатки фауны морских моллюсков, фораминифер, свидетельствующие о накоплении вмещающих их отложений на дне арктического шельфа на глубинах порядка 100-150 м. Глины и суглинки слабо сортированы, в них присутствуют включения гравия, гальки и валунов – результат влияния на осадочный процесс плавучих льдов, переносящих обломочный материал (Ершов и др., 1988).

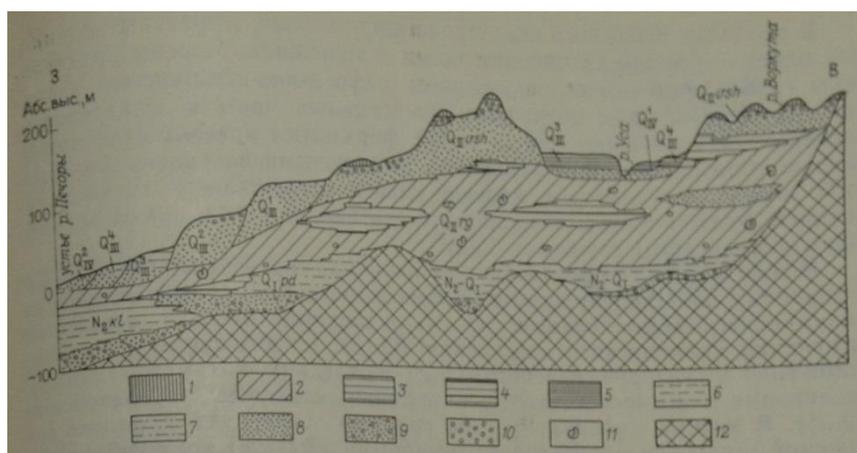


Рис. 5. Схематический разрез верхнекайнозойских отложений Печорской низменности (Ершов и др., 1988).

Условные обозначения: 1 – приповерхностные валунные суглинки бурого цвета; 2 – темно-серые валунные суглинки и глины; 3 – глины; 4 – ленточные глины в толще темно-серых валунных суглинков; 5 – ленточные глины в долинах рек; 6 – алевриты; 7 – супеси; 8 – пески горизонтально-слоистые; 9 – песчано-гравийные отложения; 10 – галечники; 11 – остатки морской фауны; 12 – коренные породы.

Вверх по разрезу толща относительно глубоководных осадков глинисто-суглинистого состава сменяется толщей мелководных, преимущественно крупнозернистых отложений (вашуткинская свита). В ее строении снизу вверх прослеживается закономерная картина, отражающая последовательные стадии обмеления водоема: горизонтально-слоистые алевриты и мелкозернистые пески, волнисто- и косослоистые среднезернистые пески, косослоистые гравелиты и галечники.

Вопрос о возрасте всего комплекса трансгрессивно-регрессивных отложений (роговской, вашуткинской свит) дискуссионен. Согласно ледниковой концепции, валунные глины и суглинки рассматриваются, как морены среднечетвертичного

максимального днепровско-московского оледенения (И. И. Краснов, М. С. Калецкая, Е. Ф. Станкевич и др.). Этим же возрастным корреляций придерживаются и многие сторонники ледово-морского генезиса отложений, считая, что сформировавшаяся их крупная морская трансгрессия была синхронна среднеплейстоценовому оледенению гор Скандинавии, Полярного Урала, Новой Земли и т. д.

### Верхний неоплейстоцен $Q_{III}$

На равнинах севера европейской части России верхне-неоплейстоценовые отложения слагают серии последовательно снижающихся к морю морских террасовидных уровней и террас, имеющих закономерное строение.

Наиболее высокие уровни отмечены на абсолютных высотах 180-220 м. Они вырабатывались в процессе регрессии основного морского водоема, в котором была отложена толща ледово-морских пород, слагающих наиболее возвышенные территории аккумулятивных равнин. Иногда этим уровням соответствуют небольшие по мощности аккумулятивные пачки, иногда они являются целиком абразионными. Все более нижние – это морские аккумулятивные террасы.

Самая древняя морская терраса расположена на высоте 80-100 и (иногда 120 м). Она получила название казанцевской, или мореюской ( $Q_{III}^1$ ). Терраса сложена волнисто- и косослоистыми песками, галечниками, в низах разреза иногда заметную роль играют ленточнослоистые алевриты. Терраса на абсолютной высоте 40-60 м сложена в основном песками, она имеет местное название – коротаихинская и сопоставляется по времени с валдайским (зырянским) горизонтом общестратиграфической шкалы.

Морская терраса на абсолютной высоте 20-30 м сложена также преимущественно песками, она коррелируется с каргинской террасой на севере Западной Сибири ( $Q_{III}^3$ ). По долинам рек морская каргинская терраса переходит во вторую надпойменную террасу. В пределах тектонических депрессий – Косью-Роговской, Усть-Усинской, Усинско-Лемвинской и др. – в строении террасы большую роль играют ленточно-слоистые глины, подстилаемые волнисто- и косослоистыми песками. В расширениях долин на месте депрессий создавались подпрудные бассейны, где шло накопление ленточно-слоистых осадков. На морских побережьях выделена также терраса на абсолютной высоте 8-12 м, сложенная разнозернистыми песками с фауной и по времени формирования отнесенная к концу позднего плейстоцена ( $Q_{III}^4$ ).

### Голоцен $Q_{IV}$

На равнинных побережьях к голоцену относятся отложения первой ( $Q_{IV}^1$ ) аккумулятивной террасы высотой 5-6 м над уровнем моря. Она сложена разнозернистыми песками с остатками фауны морских моллюсков и прослоями растительного детрита, песками и оторфованными породами супесчано-суглинистого состава. К голоцену относятся отложения пойм ( $Q_{IV}^2$ ) и первой надпойменной террасы ( $Q_{IV}^1$ ) рек.

Во многих случаях произвести расчленение верхнеплейстоценовых и голоценовых отложений невозможно. Это в первую очередь относится к приповерхностным озерно-болотным накоплениям. Они залегают на различных геоморфологических уровнях рельефа и имеют двучленное строение: нижняя часть сложена оторфованными суглинками и глинами со слабо выраженной слоистостью, верхняя представлена торфяниками. Общая мощность озерно-болотных накоплений преимущественно составляет 3-5 м, торфяников обычно не превышает 2 м, в их основании часто залегает «пнёвый горизонт», в котором торф обогащен древесными остатками. К комплексу нерасчлененных верхнеплейстоцен-голоценовых относится также элювиально-делювиальные образования, почти сплошным чехлом покрывающие плоские поверхности водоразделов и верхние части пологих склонов. Они представлены лёссовидными суглинками и супесями с преобладающей мощностью 2-3 м.

### **1.2.2 Тектоника**

Северо-восток Европейской части России представляет собой область преимущественного распространения осадочных отложений. Районы развития метаморфических и изверженных пород приурочены к Урало-Пайхойской складчатой зоне и некоторым участкам полосы Канино-Тиманских дислокаций. По особенностям геологического строения в пределах описываемой территории выделены следующие крупные геоструктурные элементы (рис. 6).

Рассматриваемая территория относится к Предуральскому краевому прогибу Урала (Косью-Роговской впадине).

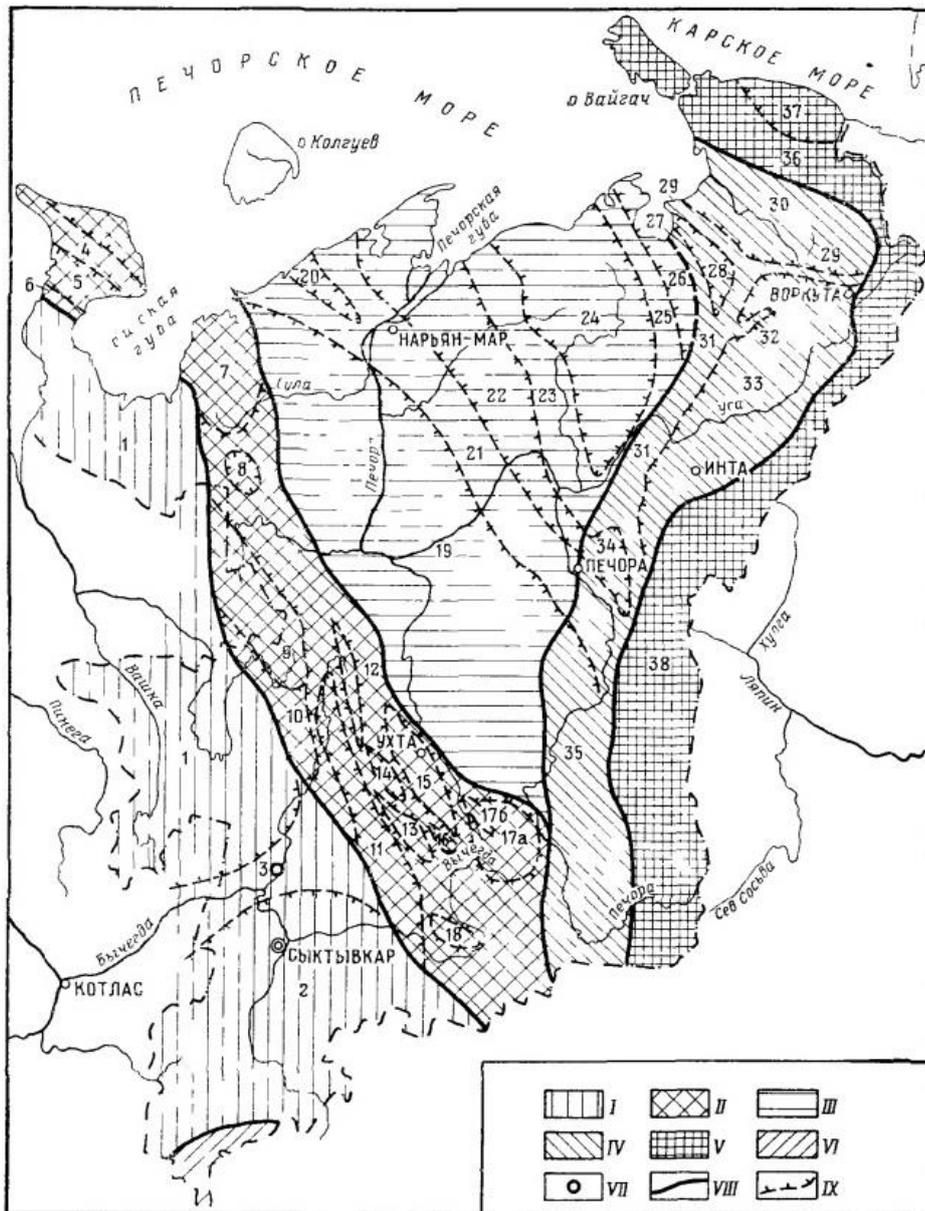


Рис. 6. Схема тектонического строения территории республики Коми и Ненецкого автономного округа (Сидоренко, 1970). I – Мезенско-Вычегодская синеклиза; II – область Канино-Тиманских дислокаций; III – Печорская синеклиза: 19 – Ижма-Печорская впадина, 20 – Оксинская впадина, 21 – Печора-Малоземельский вал, 22 – Денисовская впадина, 23 – Колвинская гряда, 24 – Колвинская впадина, 25 – Кушшорско-Сорокинское поднятие, 26 – Мореюская впадина; IV – область Предуральяского краевого прогиба: 27 – гряда Гамбурцева, 28 – Адзьвинская впадина, 29 – поднятие Чернова, 30 – Кортаихинская впадина, 31 – гряда Чернышева, 32 – Роговское поднятие, 33 – Косью-Роговская впадина, 34 – Большесыннинская впадина, 35 – Верхне-Печорская впадина; V – Урало-Пайхойская складчатая область; VI – Глазовская синеклиза; VII – Сереговский Соляной купол; VIII – границы структур первого порядка; IX – границы структур второго и более низких порядков.

## Область Предуральяского краевого прогиба.

В северной подобласти структуры подчинены двум направлениям: уральскому (северо-восточному) и пайхойскому (северо-западному). В зоне сопряжения этих двух направлений получают развитие брахискладки. Наиболее крупными положительными структурами являются мегантиклинали гряды Чернышева и поднятия Чернова. Первая из них представляет собой линейно вытянутое поднятие уральского направления, в котором выведены на поверхность смятые в крутые складки палеозойские отложения от силурийских и моложе. Они разорваны многочисленными дезъюнктивами (Сидоренко, 1970).

Отрицательными тектоническими формами в северной подобласти являются: Большесынинская, Косью-Роговская (Усинская), Адзвинская и Коротаихинская впадины. Все они принадлежат к типу мегасинклиналей, осложненных более мелкими структурами (Воргашорская синклиналь, Воркутская мульда, складки Интинского района и др.). Разрывные нарушения во впадинах чаще всего приурочены к зонам их сочленения с поднятиями. Впадины выполнены пермскими и триасовыми отложениями. На северо-востоке Косью-Роговской впадины развиты маломощные верхнемеловые отложения, а на крайнем западе – небольшие участки юрских.

Предуральский прогиб оформился в начале пермского периода, когда в нем усилились нисходящие колебательные движения, сопровождавшиеся накоплением многокилометровых (на севере угленосных) толщ осадков. На границе перми и триаса в северной части прогиба произошли крупные расколы и трапповые излияния основных эффузивов. В триасе в большей части прогиба продолжалось опускание и накопление преимущественно континентальных отложений. Общая мощность пермских и триасовых осадков в северной части прогиба достигает 7-9 км, на юге она несколько меньше.

Основная фаза тектоногенеза в Предуральском прогибе проявилась, как и в области Печорской синеклизы, между концом триаса и средней юрой. Последующие движения имели характер эпейрогенических. Юрские и меловые отложения почти повсеместно залегают горизонтально и наблюдающиеся среди них локальные нарушения не всегда ясны по своему происхождению. В кайнозое территории прогиба испытывала только слабые неотектонические движения, обычно приуроченные к зонам древних разломов.

### 1.3. Гидрогеологическая характеристика района

Гидрогеологические условия в регионе связаны с субмеридиональной сменяемостью геокриологических условий в структуре Печоро-Предуральского артезианского бассейна. В верхней части разреза структуры выделяют четыре водоносных комплекса (Ершов и др., 1988).

1) Неоген-четвертичный распространен повсеместно. Его мощность достигает 50-100 м. в комплексе обособляется ряд водоносных горизонтов, разобщенных суглинистыми осадками и сложенных песчаными, реже галечными отложениями. Они вмещают поровые грунтовые и слабонапорные воды. Глубины залегания их уровней изменяются от 10-30 м на водоразделах до 0-10 м в долинах. Воды гидрокарбонатно-кальциевые и натриевые с минерализацией 0,2-0,7 г/л.

В пределах Косью-Роговского артезианского бассейна выделяются мелкие гидрогеологические районы – артезианские суббассейны – Воргашорский, Воркутинский и Юньягинский (Сидоренко, 1970). Выделяют:

- Водоносный горизонт современных аллювиальных отложений;
- Водоносный комплекс современных – неоплейстоценовых морских отложений;
- Водоносный комплекс неоплейстоценовых озерно-аллювиальных и флювиогляциальных отложений;
- Воды спорадического распространения эоплейстоценовых-неогеновых морских отложений.

2) Юрско-меловой широко развит в Печоро-Предуральском бассейне. Мощность отложений равна 100-200 м. Наиболее водоносны среднеюрский и верхнемеловой интервалы разреза комплекса, в которых доминируют пески и слабо сцементированные песчаники, имеющие в основном порово-пластовые воды. Воды гидрокарбонатно-кальциевые и натриевые.

3) Пермо-триасовый, перекрытый не сплошным четвертичным чехлом, почти повсеместно развит в Печоро-Предуральской области. Мощность пород комплекса составляет около 0,5 км. Водовмещающие песчаники, алевролиты, конгломераты. Воды преимущественно трещинно-пластовые.

4) Палеозойский распространен наименее широко. Он локально развит в Печоро-Предуральской бассейне. Слагают комплекс известняки, доломиты, иногда терригенные породы. Мощность толщи до 1 км. В ней циркулируют карстово-пластовые, трещинно-карстовые, трещинные безнапорные грунтовые воды, сменяющиеся с глубиной напорными. Воды гидрокарбонатно-кальциевые и кальциево-магниевые.

Водоносные комплексы региона подверглись многолетнему промерзанию, а гидрогеологические структуры криогенному преобразованию.

В подзоне прерывистого распространения мерзлых пород промерзли как водоупорные толщи, так и многие водоносные горизонты. При этом мощность водовмещающих песчаных пластов сильно сократилась, уменьшилась водопроницаемость горизонтов. Преобразование вышележающих осадков в криогенный водоупор вызвало увеличение пьезопроводности сформировавшейся талой водоносной порово-трещинной зоны. Вследствие этих процессов водоотдача песчаных отложений резко снизилась, приблизившись к величине водоотдачи трещиноватых пород.

В рассматриваемой геокриологической подзоне распространены воды сквозных таликов, над-, подмерзлотные, иногда меж- и внутримерзлотные.

#### **1.4. Геокриологические условия района исследования**

В геокриологическом отношении район изысканий относится к северной геокриологической области - подзоне прерывистого распространения многолетнемерзлых пород. В северной части подзоны мерзлые породы залегают с поверхности на безлесных водораздельных пространствах и террасах рек: наиболее широко они развиты на участках распространения озерно-аллювиальных и озерно-болотных отложений – в крупных понижениях рельефа, имеющих полигональный и плоско-бугристый рельеф. Большинство таликов в подзоне формируются под влиянием таких отепляющих факторов, как мощный снежный покров, наличие лесной и густой кустарничковой растительности, водных покровов, заболоченности. Сквозные талики распространены под руслами и на поймах рек и водотоков, в межблочных понижениях и полосах стока, заросших высокой ивняково-ерниковой растительностью. По

генетическому типу наиболее широко распространены радиационно-тепловые и гидрогенные талики, причем среди первого типа – радиационные и тепловые безводного, застойного и грунтово-фильтрационного классов, а среди второго – подозерные, подрусловые и пойменные (Ершов и др., 1988).

Среднегодовая температура многолетнемерзлых пород и таликов изменяется преимущественно от 0 до -1 °С, реже до -1,5 °С. Температура до -1,5 °С отмечена на плоскобугристых торфяниках в пределах озерно-аллювиальной равнины. На формирование и пространственную изменчивость среднегодовой температуры горных пород большое влияние оказывают снежный и растительный покровы, состав пород и их свойства. Так, на поверхности торфяников температурный режим определяется отепляющим влиянием снега, составляющим 3,5-4,5 °С, охлаждающим действием растительности, достигающим 0,8 °С, а на глубине сезонного оттаивания  $t_{cp}$  пород понижается по сравнению с  $t_{cp}$  на пространствах, высоких террасах рек, грядах холмов, имеющих песчано-суглинистый состав, под иным по значимости влиянием тех же факторов  $t_{cp}$  пород изменяется от -0,8 до -1,2 °С. Еще более высокие температуры от -0,5 до -0,8 °С характерны для открытых тундровых почве на 2-3 °С из-за значительного изменения коэффициента теплопроводности пород сезонноталого слоя при изменении их теплового состояния. На возвышенных водораздельных участках низких террас, плоских междуречных равнин с редколесьями и хорошо выраженным кочковатым типом нанорельефа.

В Приуральской области в основном развиты сплошные по разрезу мерзлые толщи. На севере области их мощность достигает 400 м, возраст плейстоценово-голоценовый. На севере Большеземельской области наибольшие мощности (до 400-500 м) свойственны высоким водоразделам, сложенным роговскими осадками. На площадях, сложенных казанскими осадками, мощности мерзлых толщ составляют 300-350 м. в зоне влияния рек и озер кровля реликтового яруса опускается на несколько десятков метров до глубин 150-250 м. Заглубление кровли зависит от водности рек, размеров озер, фильтрационных свойств подстилающих водоемы пород.

Опускание кровли отмечено на сложенных суглинистой толщей «хребтах» Большеземельской тундры. Оно увеличивается с возрастанием высот водоразделов, вне зависимости от мощности современных мерзлых толщ.

Отличительная особенность многолетнемерзлых пород рассматриваемой территории – это увеличение льдистости пород на север и восток.

В регионе широко развиты криогенные процессы, криогенные и посткриогенные образования. Наиболее распространены бугры пучения, образовавшиеся в результате многолетнего или сезонного промерзания горных пород, термокарстовые и термоэрозионные формы рельефа, сформировавшиеся при многолетнем протаивании льдистых отложений, полигональный микрорельеф и связанные с ним полигонально-жильные льды.

*Бугры пучения* широко распространены на равнинной части территории с многолетнемерзлыми породами. Наибольшие бугры отмечены на северо-востоке. Они достигают высоты 12 м, ширины 500 м. Ядра крупных бугров пучения представлены нередко чистым слоистым льдом. Вскрытая мощность на севере Большеземельской тундры достигает 7 м. Сильнольдистые суглинки бугров характеризуются обычно слоистой и сетчатой криогенными текстурами. Подстилающие их породы – водоносные пески с примесью гравия и галечника или трещиноватые породы. Химический состав льдов соответствует составу вод ближайших водоносных слоев. Кровлей бугров пучения служит торф. Местами они целиком сложены им.

Молодые бугры пучения образуются в термокарстовых западинах, где начинается промерзание их днищ. Наблюдаются также гряды пучения с ледяным ядром. Протяженность их достигает 10 км. Они располагаются вдоль обводненных тектонических трещин.

Плоскобугристые торфяники наиболее широко развиты в северной части северной тундры. Среди многолетних бугров пучения распространены инъекционные и миграционные бугры.

Инъекционные развиты на севере региона на низких морских террасах, в долинах рек, в пределах осушающихся и промерзающих термокарстовых озерных котловин с несквозными таликами под ними. Растущие инъекционные бугры имеют выпуклую поверхность, на которой отсутствует кустарниковая растительность. Высота таких бугров достигает 3-5 м. слагают их преимущественно минеральные грунты.

Миграционные приурочены к торфяникам и заболоченным низинам. Слагающий бугры торф имеет льдистость 60-80% и атакситовую криотекстуру. На глубине 1,5-2 м нередко встречается небольшое ледяное ядро.

В породах сезонноталого и сезонномерзлого слоев развиваются в основном миграционные однолетние бугры пучения.

*Термокарстовые процессы* распространены на всей территории Большеземельской тундры. Интенсивность термокарста увеличивается с юга на север. В северной части территории термокарст развит за счет вытаивания как сингенетических, так и эпигенетических сегрегационных льдов, а также растущих и погребенных повторно-жильных и пластовых льдов.

В результате термокарстового процесса образуются озера, западины, блюдца и другие отрицательные формы рельефа. Наиболее крупные из них – термокарстовые озера – формируются в пределах торфяников.

Наиболее распространенной формой термокарстового рельефа среди торфяников Воркутинского района являются заболоченные или занятые озерами котлованообразные понижения. Котловины имеют почти отвесные торфяные берега высотой до 4 м. Размеры в поперечнике отдельных озерных котловин более 1 км, а глубина их обычно менее 2 м.

Меньшим распространением в области развития мерзлых толщ пользуются термокарстовые блюдца и воронки. Первые образуются на участках значительных скоплений сегрегационных льдов, а вторые – в местах вытаивания повторножильных льдов. Блюдца имеют размеры в поперечнике от 10 до 40 м, их глубина не более 0,4-0,6 м. воронки, глубина которых достигает 2,5 м, а диаметр 1-2 м, частично заполнены водой.

Провальные озера, связанные с вытаиванием ледяных ядер бугров пучения встречаются редко.

В минеральных грунтах термокарстовые формы рельефа распространены менее широко. В основном они представлены древними формами на участках бугристо-западинного микрорельефа в северной части территории.

В результате термокарстовых процессов образуется останцево-полигональный мезорельеф, особенно четко выраженный на участках распространения льдонасыщенных глинистых пород. Останцы вытянутой или округлой формы имеют размеры в поперечнике до 100-150 м. линейно вытянутые западины, в большинстве

случаев заболоченные, имеют ширину 10-50 и глубину 1-5 м. Часть бессточных западин занята озерами.

*Процессы термоэрозии* развиты ограниченно и приурочены в основном к речным долинам. Термоэрозионные формы представляют собой овраги различной конфигурации, обычно с крутыми склонами. Наиболее интенсивно процесс термоэрозии проходит на склоновых участках, сложенных мерзлыми сильнольдистыми аллювиальными и озерно-аллювиальными породами, но обязательно при наличии бассейнов стока. Наименее подвержены термоэрозии эпи- и сингенетические озерно-болотные отложения, представленные торфом и слагающие обширные поля полигональных и плоских торфяников.

На рассматриваемой территории широко распространен полигональный микрорельеф. Он развит как в крупных термокарстовых котлованах, так и на плоских междуречных пространствах. Морозобойное растрескивание и формирование эпигенетических ледяных жил происходит как в торфяниках, так и в минеральных грунтах.

*Морозобойное растрескивание и формирование повторно-жильных льдов* происходит в суглинках, глинах и торфе. В торфах происходит одновременное формирование жильных льдов и накопление осадков. В южной части развит в основном остаточно-полигональный микрорельеф на торфяниках, который соответствует стадии разрушения и остаточной стадии развития жильных льдов. С продвижением на север встречается еще остаточно-полигональный микрорельеф и появляется полигональный микрорельеф стадии консервации и разрушения, на участках которого развиты захороненные ледяные жилы. Ледяные жилы расположены на глубине от 0,8 до 1,3 м от дневной поверхности и на глубине 0,3-0,6 м от подошвы слоя сезонного протаивания.

Жильные образования широко представлены мелкими вертикальными элементарными жилками льда и мощными (ширина до 2 м, высота до 3 м) повторно-жильными залежами льда, составляющими полигональную решетку в мерзлых пылевато-глинистых отложениях и торфяниках. Элементарные жилы льда в слое сезонного протаивания ежегодно вытаивают. Освободившиеся трещины заполняются породами, осыпавшимися со стенок и с поверхности. В итоге на их месте формируются грунтовые жилы. Суммарная толщина их достигает 0,4 м.

Растущие повторно-жильные льды на поверхности обнаруживаются чаще в виде прямоугольной сети обваловых трещин. Ширина полигонов 5-20 м. при вытаивании больших жил льда остаются полости, которые заполняются водой и вышележащим материалом. Так создаются псевдоморфозы – вторичные грунтовые жилы.

Морозное растрескивание и особенно вытаивание сети повторножильных льдов определяют направление стока поверхностных вод по трещинам. В таких случаях формируется своеобразный, нередко сглаженный, останцово-полигональный (бугристо-западинный) микро- и мезорельеф.

По бывшим трещинам и жилам льда водные потоки разрабатывают эрозионные ложбины – полосы стока, днища которых выстланы более песчаным материалом, чем борта полигональных останцов. Зимой полосы заполняются снегом, который предохраняет их от интенсивного промерзания. В днищах ложбин стока формируются талики, из которых вода мигрирует к останцам, вследствие чего последние подвергаются пучению. Происходит криогенная деформация форм рельефа.

*Солифлюкционные формы* – террасы, потоки, покровы и валы дисперсных пород на склонах крутизной 2° и более. Часть мощных покровных отложений в основании больших склонов в предгорьях Полярного Урала состоит из солифлюкционно-перемещенного материала. Поверхность солифлюкционных образований нередко прерывается валами, образованными под напором потоков. Высота этих форм не превышает 2 м. особенно четко они развиты на Предуральской равнине. Скорости движения солифлюкционных потоков весьма различны: от долей сантиметра до нескольких метров в год. Наблюдаются и большие скорости течения оттаивающих пород на склонах – сплывы. Наиболее интенсивное зональное проявление солифлюкции свойственно северной части Большеземельской тундры.

Солифлюкционные явления развиты в пределах рассматриваемой площади на участках, не занятых торфяниками. Процессам солифлюкции обязаны особые формы микрорельефа, валы, натечные языки и грядки, иногда образуются обширные натечные террасы. Высота этих форм рельефа не превышает 1-2 м. Часто солифлюкционные массы имеют в плане языковидные формы длиной до 70-100 и шириной 10-15 м.

## Глава 2. Инженерно-геокриологические условия участка строительства

### 2.1 Характеристика участка изысканий

Трасса проектируемой железной дороги проходит по северу Большеземельской тундры, в 50 км южнее г. Воркуты. В юго-западной части пересекает небольшую речку с глубиной воды до 1,0 м, при ширине русла 8 м, затем поднимается на пологохолмистую озерно-болотную равнину (на базе казанцевской террасы), частично покрытую торфяником с приподнятыми минеральными островами, с абсолютными отметками до 156 м. Прослеживаются торфяные бугры пучения, в пределах полосы отчуждения – два термокарстовых озера глубиной 0,4 и 0,8 м.

Мощность снежного покрова в долине 0,5 м, на склонах 0,3 м, на равнине 0,4 м.

Перепад высот от 120 м до 156 м. Рельеф слаборасчлененный.

В пределах исследуемого участка планируется строительство дороги на насыпи, мостового перехода через речку и жилого помещения (рис. 7). Также следует учитывать развитие термокарста.

### 2.2 Геолого-литологическое строение и структуризация разреза

В основании изученного разреза четвертичных отложений лежат среднелепистоценовые ледниково-морские отложения роговской свиты ( $Q_{IIrg}$ ). На площадке изысканий до глубины 22,0 м эти отложения не вскрыты.

Верхнеоплестоценовые отложения на исследуемой территории представлены отложениями самой древней морской ( $mQ_{III}$ ) казанцевской террасы. Отложения представлены суглинками и супесями морского генезиса.

Нижняя часть отложений слагается зеленовато-серыми суглинками с редкими включениями гальки и крупного щебня. Вскрыты скважинами на глубине 7-22,0 м.

Выше залегают песчано-глинистые отложения (супеси, суглинки и пески) с редкими прослоями детрита и с обломками раковин. Мощность отложений до 20 м.

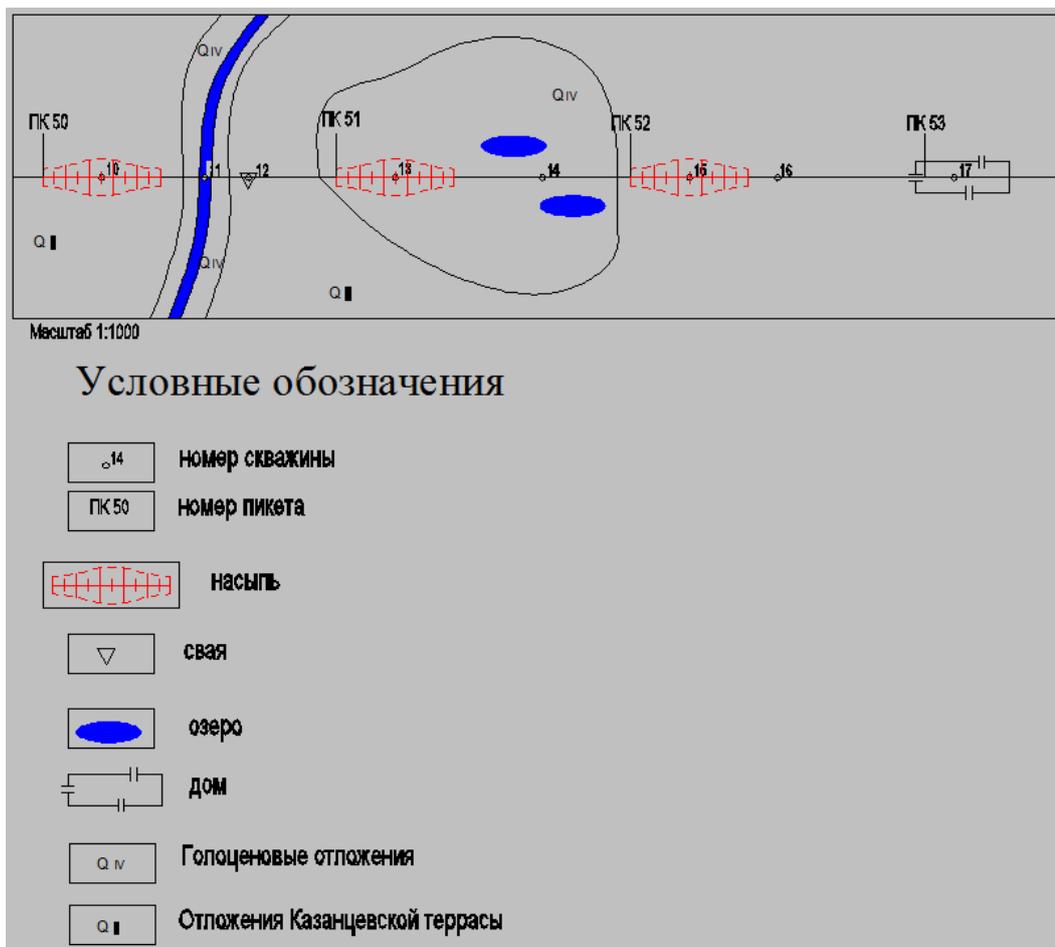


Рис. 7. План участка исследования.

Современные отложения представлены отложениями торфа. Мощность отложений до 6,7 м. А также аллювиальными отложениями, представленными среднезернистыми песками. Мощность отложений до 12,1 м.

Условия залегания и литологический состав отложений показаны на инженерно-геологическом разрезе (Прил.1).

На основании полевого описания грунтов, анализа геолого-литологического разреза, суммарной влажности ( $W_{tot}$ ), криогенного строения и физико-механических свойств грунтов на изученном участке выделено 13 инженерно-геологических элемента (ИГЭ). Тепло- и воднофизические свойства ИГЭ приведены в таблице 2.

### ***Современные отложения***

#### ***Болотные отложения -hQ<sub>IV</sub>***

**ИГЭ-1. Торф** сфагновый коричневый, слабо- и среднеперегнивший, местами слабоувлажненный, с глубин 0,3 и 0,5 м мерзлый. Местами с густой неправильной

сеткой ледяных шпиров, в низах – с ледяными прослоями, мощностью до 20 мм. Суммарная влажность ( $W_{tot}$ ) достигает 3,2 д.е. Мощность слоя от 1,5 до 6,7 м.

Аллювиальные отложения -  $alQ_{IV}$

**ИГЭ-9. Песок** средний, кварц-полевошпатовый, желтовато-серый, с глубины 0,5 м водонасыщенный. Мощность слоя 12,1 м.

**Верхне-среднеплейстоценовые отложения**

Морские отложения ( $mQ_{III}$ )

**ИГЭ-2. Суглинок** средний буровато-серый, с горизонтальной слоистостью, с глубин 0,7 и 0,8 м мерзлый. На контакте с торфом – линза льда, мощностью 0,6 м. В скважине 14 лед мелкокристаллический, в апикальной части заметны вертикально ориентированные короткие линзы размером до 10 мм. Криотекстура атакситовая, крупношлировая решетчатая. Суммарная влажность ( $W_{tot}$ ) составляет 0,84 д.е, влажность минеральных прослоев ( $W_m$ ) - 0,25 д.е., плотность грунта ( $\rho$ ) - 1,5 г/см<sup>3</sup>. Мощность слоя от 5,4 до 12,2 м.

**ИГЭ-3. Суглинок** средний буровато-серый, с сизыми оглееными прослойками, горизонтально-слоистый за счет чередования светло-серых и более темных прослоев. Лед образует линзовидно-сетчатую криотекстуру, льдистость возрастает снизу вверх. На границе с торфом слой льда, мощностью 0,4 м. Суммарная влажность ( $W_{tot}$ ) составляет 0,47 д.е, влажность минеральных прослоев ( $W_m$ ) - 0,27 д.е., плотность грунта ( $\rho$ ) - 1,5 г/см<sup>3</sup>. Мощность слоя до 5,2 м.

**ИГЭ-4. Суглинок** тяжелый, зеленовато-серый, с прослоями детрита и редкими обломками раковин. Криотекстура атакситовая, лед мелкокристаллический, с изометричными кристаллами. Суммарная влажность ( $W_{tot}$ ) составляет 1,00 д.е, влажность минеральных прослоев ( $W_m$ ) - 0,23 д.е., плотность грунта ( $\rho$ ) - 1,35 г/см<sup>3</sup>. Мощность слоя до 3,9 м.

**ИГЭ-5. Суглинок** тяжелый, зеленовато-серый, однородный, атакситовой криотекстуры. Суммарная влажность ( $W_{tot}$ ) составляет 0,37 д.е. Мощность слоя до 10,6 м.

**ИГЭ-6. Песок** мелкий, полимиктовый, с обломками раковин. Местами с прослойками растительного детрита. Лед образует крупные гнезда и хаотически

ориентированные короткие линзы размером до 10-15 мм. Криотекстура порфириовидная. Суммарная влажность ( $W_{tot}$ ) составляет 0,28 д.е. Мощность слоя от 2,7 до 6,8 м.

**ИГЭ-7.** Супесь тяжелая, буровато-серая, в низах темно-серая, с нечеткой горизонтальной слоистостью. До глубины 0,7 м с прослоями погребенной почвы, образующими опрокинутые и волнистые складки, талая, мягко-пластичная. Лед образует ломаные наклонные шпирь, сливающиеся в разомкнутую сетку, толщиной до 10 мм. Суммарная влажность ( $W_{tot}$ ) составляет 0,43 д.е, влажность минеральных прослоев ( $W_m$ ) - 0,2 д.е., плотность грунта ( $\rho$ ) - 1,65 г/см<sup>3</sup>. Мощность слоя 7,2 м.

**ИГЭ-8.** Суглинок темно-серый с неправильной линзовидной слоистостью. Лед образует прослои и гнезда, сливающиеся в неправильную решетку, иногда – в атакситовую текстуру. Суммарная влажность ( $W_{tot}$ ) составляет 0,4 д.е, влажность минеральных прослоев ( $W_m$ ) - 0,23 д.е., плотность грунта ( $\rho$ ) - 1,76 г/см<sup>3</sup>. Мощность слоя 7,3 м.

**ИГЭ-10.** Супесь легкая буровато-серая и темно-серая, местами косослоистая, с 0,5 м мерзлая. Лед образует горизонтальные линзы длиной до 50 мм, толщиной 2-5 мм. Криотекстура линзовидная. Суммарная влажность ( $W_{tot}$ ) составляет 0,34 д.е, влажность минеральных прослоев ( $W_m$ ) - 0,23 д.е., плотность грунта ( $\rho$ ) - 1,6 г/см<sup>3</sup>. Мощность слоя 4,1 м.

**ИГЭ-11.** Суглинок тяжелый, зеленовато-серый с черными примазками, с примесью гальки. Криотекстура сетчатая толстошпировая. Суммарная влажность ( $W_{tot}$ ) составляет 0,6 д.е, влажность минеральных прослоев ( $W_m$ ) - 0,26 д.е., плотность грунта ( $\rho$ ) - 1,56 г/см<sup>3</sup>. Мощность слоя 3,1 м.

**ИГЭ-12.** Суглинок тяжелый, зеленовато-серый, с примесью гальки и крупного щебня, плотный, не мерзлый, пластичный. Суммарная влажность ( $W_{tot}$ ) составляет 0,33 д.е, влажность минеральных прослоев ( $W_m$ ) - 0,19 д.е., плотность грунта ( $\rho$ ) - 1,7 г/см<sup>3</sup>. Мощность слоя от 7,9 до 14,8 м.

**ИГЭ-13.** Песок крупный, темно-серый, с крупным щебнем, слабовлажный, на забое валун. Мощность слоя 2 м.

Физико-механические свойства ИГЭ приведены в таблице 2.

Табл. 2. Нормативные значения показателей физико-механических свойств грунтов:

Наименование и размерность показателя	Обозначение	Инженерно-геологические элементы										
		ИГЭ -1	ИГЭ -2	ИГЭ -3	ИГЭ -4	ИГЭ -5	ИГЭ -6	ИГЭ -7	ИГЭ -8	ИГЭ -9	ИГЭ -10	ИГЭ -11
Влажность суммарная, доли ед.	$W_{tot}$	1,99	0,84	0,47	1,00	0,37	0,28	0,43	0,4	0,34	0,6	0,33
Влажность минеральных прослоев, доли ед.	$W_m$	-	0,25	0,27	0,23	-	-	0,20	0,23	0,23	0,26	0,19
Влажность за счет незамерзшей воды, доли ед.	$W_w$	-	0,05 3	0,05 3	0,05 3	-	-	0,05	0,05	0,04 5	0,04 5	0,04 5
Влажность на границе текучести, доли ед.	$W_L$	-	0,37 5	0,37	0,37	-	-	0,27	0,37 5	0,26	0,39	0,41
Влажность на границе раскатывания, доли ед.	$W_p$	-	0,23	0,24	0,21	-	-	0,21	0,24	0,20	0,28	0,26
Число пластичности	$I_p$	-	0,12	0,14	0,16	-	-	0,06	0,13 5	0,06	0,11	0,15
Плотность грунта, г/см <sup>3</sup>	$\rho$	-	1,5	1,5	1,35	-	-	1,65	1,76	1,6	1,56	1,7
Плотность сухого грунта, г/см <sup>3</sup>	$\rho_d$	-	1,2	1,22 1	1,09 7	-	-	1,37 5	1,4	1,3	1,23 8	1,42 8
Температура начала замерзания, °С	$T_{bf}$	-	-0,2	-0,2	-0,2	-	-	-0,15	-0,2	-0,15	-0,2	-0,2
Коэффициент теплопроводности талого грунта, Вт/м·°С	$\lambda_{th}$	0,93	0,58	1,24	1,57	-	-	1,86	0,7	1,86	0,58	0,7
Коэффициент теплопроводности мерзлого грунта, Вт/м·°С	$\lambda_f$	1,39	0,6	1,76	1,76	-	-	1,97	0,75	1,97	0,6	0,75
Объемная теплоемкость талого грунта, Вт/м·°С	$C_{th}$	1050	930, 6	930, 6	930, 6	-	-	511, 1	508, 3	511, 1	444, 4	508, 3
Объемная теплоемкость мерзлого грунта, Вт/м·°С	$C_f$	758, 3	652, 8	652, 8	652, 8	-	-	411, 1	466, 7	411, 1	408, 3	466, 7
Расчетное давление, кПа	$R$	-	-	-	-	-	-	750	1100	-	-	-
Расчетное сопротивление срезу по поверхности смерзания, кПа	$R_{af}$	-	-	-	-	-	-	60	130	-	-	-

### 2.3 Геокриологические условия участка

Район изысканий расположен в подзоне прерывистого распространения многолетнемерзлых пород (Ершов и др., 1988). Однако, при крупномасштабных исследованиях распространения ММП на относительно небольшой территории, учитывать следующие факторы:

- рельеф;
- высота снежного покрова и условия снегонакопления;
- растительный и напочвенный покров;
- состав грунтовой толщи.

С учётом этих факторов исследуемая территория характеризуется сплошным распространением ММП.

На изученной площадке многолетнемерзлые породы имеют сплошное распространение - вскрыты всеми пробуренными скважинами. Температура грунтов (на глубине годовых нулевых амплитуд) в пределах изученной площадки составляет от минус 1,6 до минус 3,9 °С.

Сезонное оттаивание грунтов начинается в июне после смены знака среднесуточной температуры воздуха и продолжается до сентября. Сезонное промерзание грунтов начинается в первой половине октября (Геокриология, 1988).

Глубина сезонного оттаивания на площадке изменяется в достаточно широких пределах – от 0,7 до 2,0 м. Минимальные значения (0,7 м) глубина сезонного оттаивания имеет на участках, сложенных с поверхности торфом. Максимальной мощности СТС (до 2,0 м) достигает на участках с преобладанием супесчаных грунтов.

Суглинки верхней части разреза (от 5,2 до 13,2 метров), имеют достаточно высокую суммарную влажность (0,32 - 0,43 долей ед.) и характеризуются, как правило, решетчатой и атакситовой криотекстурой.

В средней части разреза залегают супеси. Криогенная текстура линзовидная. Также в средней части разреза залегают пески, которые, как правило, имеют массивную криотекстуру, иногда – порфировидную.

В нижней части разреза залегают суглинки. Криогенная текстура сетчатая толстошлировая.

На площадке изысканий многолетнемерзлые породы залегают прерывисто. В районе течения реки наблюдается талик.

#### **2.4. Криогенные процессы**

На исследуемой территории наиболее распространены термокарстовые процессы, криогенное пучение, а также процессы солифлюкции.

В районе изысканий, в пределах полосы отчуждения, отмечается два термокарстовых озера. Термокарст на рассматриваемой территории представлен современными формами. Наблюдается в отложениях торфа.

Криогенное пучение представлено торфяными буграми, которые располагаются между пикетами 51-52.

Процесс солифлюкции наблюдается в супесчаных грунтах. Уклон поверхности составляет  $70^\circ$ . Это так называемый криогенный оползень скольжения — смещение протаявших пород сезонно-талого слоя (СТС) по границе раздела мёрзлое-талое.

Оценка наличия и возможности развития опасных природных процессов на участке изысканий произведена в главе 3.

### Глава 3. Прогнозные инженерно-геологический расчеты

Цель расчетов: оценка геологических условий строительства сооружений на рассматриваемой площадке изысканий, а также прогноз их изменения.

Для всей площадки изысканий посчитаны мощности сезонного оттаивания по двум методикам: по СП 25.13330.2012 (нормативная глубина оттаивания) и по методике В. А. Кудрявцева (в естественных условиях). Различие этих двух методик состоит в том, что нормативная глубина сезонного оттаивания определяется как наибольшая его глубина (наблюдаемая за срок не менее 10 лет), также в данной методике опытная площадка должна быть без растительного покрова и очищаться весной от снега. В методике В. А. Кудрявцева учитывается ряд дополнительных факторов таких как: снежный и растительный покровы, радиационная составляющая и др. Таким образом, нормативные глубины сезонного оттаивания обычно оказываются больше глубин естественных. От мощности СТС зависит на какую глубину заглублять фундамент и сваи, также зависит будет ли образовываться мерзлое ядро в насыпи.

При строительстве дороги потребуется возводить насыпь (проектируется в трёх местах), т.е. определяется изменение кровли ММП под насыпью.

На правом берегу реки проектируется свая мостового перехода – для этого нужно рассчитать несущую способность сваи.

Следует оценить вероятность термокарста под дренажными канавами и под дном мелких озер, которые широко развиты на изыскиваемой территории.

Также планируется строительство здания, под которым сформируется чаша протаивания.

#### 3.1. Теплофизические характеристики

В полевой лаборатории были определены следующие величины:

- 1) Влажность, доли ед.:
  - а) суммарная  $W_{tot}$ ;

- б) минеральных прослоев  $W_m$ ;
- в) за счёт незамёрзшей воды  $W_w$ ;
- 2) Нижний предел пластичности  $W_p$ , доли ед.
- 3) Верхний предел пластичности  $W_L$ , доли ед.
- 4) Плотность грунта  $\rho$ , г/см<sup>3</sup>;
- 5) Плотность скелета грунта  $\rho_d$ , г/см<sup>3</sup>
- б) Число пластичности  $I_p$ , %;

Результаты лабораторных определений приведены в таблице 3.

$L_v$  – теплота таяния (замерзания) грунта, Вт · ч/м<sup>3</sup>

$$L_v = L_0 \cdot (W_{tot} - W_w) \cdot \rho_d$$

(1)

где  $L_0$  - удельная теплота замерзания (плавления), равна 93 Вт · ч/кг

Табл.3. Результаты лабораторных определений физических свойств грунтов (по данным ПАО «Ленгипротранс»):

Номер п/п	Наименование грунта	№ ИГЭ	Номер скважины	Глубина отбора пробы, м	Плотность грунта, г/см <sup>3</sup>		Влажность, доли ед.		Число пластичности, доли ед.	Плотность сухого грунта, г/см <sup>3</sup>
					ρ	w <sub>m</sub>	Влажность на границе текучести, доли ед.	Влажность на границе раскатывания, доли ед.		
					I <sub>P</sub>	ρ				
1	Супесь лёгкая	10	10	1,0	1,6	0,23	0,26	0,20	0,06	1,168
2	Суглинок тяжёлый			5,0	1,56	0,26	0,39	0,28	0,11	1,026
3	Суглинок тяжёлый			10,0	1,7	0,19	0,41	0,26	0,15	1,232
4	Супесь тяжёлая	7	12	2,0	1,65	0,20	0,27	0,21	0,06	1,231
5	Суглинок			8,0	1,76	0,23	0,38	0,25	0,13	1,205
6	Суглинок			13,0	1,72	0,24	0,37	0,23	0,14	1,203
7	Торф сфагновый	1	13	4,0	1,58	0,30	0,41	0,26	0,15	0,290
8	Суглинок средний	2	16	1,0	1,5	0,25	0,35	0,23	0,12	0,882
9	Суглинок средний			4,0	1,4	0,32	0,40	0,26	0,14	0,786
10	Суглинок средний			10,0	1,43	0,27	0,41	0,25	0,16	0,867
11	Суглинок тяжёлый			15,0	1,35	0,23	0,37	0,21	0,16	0,685

12	Суглинок средний		17	1,0	1,45	0,21	0,36	0,20	0,16	1,013
13	Суглинок средний			6,0	1,55	0,24	0,31	0,22	0,09	1,084

Табл.4. Результаты расчетов физических свойств грунтов:

№ скважины	№ ИГЭ	Интервал залегания, м		Глубина взятия образца, м	Разновидность грунта	Температура начала замерзания грунта, °С	Теплопроводность, Вт/(м·°С)		Объемная теплоемкость, Вт·ч/м <sup>3</sup> ·°С		Теплота таяния льда (замерзания воды) в грунте, Вт·ч/м <sup>3</sup>
		от	до				грунтов в талом, охлажденном состоянии	грунтов в мерзлом состоянии	грунтов в талом, охлажденном состоянии	грунтов в мерзлом состоянии	
							$T_{bf}$	$\lambda_{th}$	$\lambda_f$	$C_{th}$	
10	10	0,0	4,1	1,0	Супесь легкая	-0,15	1,86	1,97	511,1	411,1	37366,7
12	7	0,0	7,2	2,0	Супесь тяжелая	-0,15	1,86	1,97	511,1	411,1	26903,5
13	1	1,5	6,7	4,0	Торф	-0,20	0,81	1,33	1050	666,7	54614,3
14		0,0	6,7	1,0	Торф	-0,20	0,41	0,7	922,2	583,3	55218,8
15	2	0,0	12,2	1,0	Суглинок средний	-0,20	1,57	1,66	930,6	652,8	146475,0
16		0,0	13,2	1,0	Суглинок средний	-0,20	0,58	0,60	511,1	411,1	51266,3
17		0,0	8,2	1,0	Суглинок средний	-0,20	1,57	1,76	930,6	652,8	33444,2

### 3.2 Расчет нормативной глубины сезонного оттаивания по СП 25.13330.2012

Расчет нормативной глубины сезонного оттаивания  $d_{th,n}$  (м) основывается на определении величины теплопотока в мерзлые породы (тепло, расходуемое на летний обогрев ММП)  $Q$  (ккал/м<sup>2</sup>) и количества открытой теплоты, поглощаемой при плавлении льда, содержащегося в породе  $q_1$  (ккал/м<sup>3</sup>). Эти величины, в свою очередь, зависят от теплофизических характеристик грунта (объемная теплоемкость, теплопроводность грунта).

Расчет нормативной глубины сезонного оттаивания  $d_{th,n}$  (м), выполнялся по формуле:

$$d_{th,n} = \sqrt{\frac{2\lambda_{th}(T_{th,c} - T_{bf})t_{th,c}}{q_1} + \left(\frac{Q}{2q_1}\right)^2} - \left(\frac{Q}{2q_1}\right) \quad (2)$$

$$Q = \left(0.25 - \frac{t_{th,c}}{t_1}\right)(T_0 - T_{bf})k_m\sqrt{\lambda_f C_f t_{th,c}} \quad (3)$$

$$q_1 = L_v + \left(\frac{t_{th,c}}{t_2} - 0,1\right)[C_{th}(T_{th,c} - T_{bf}) - C_f(T_0 - T_{bf})] \quad (4)$$

где  $t_{th,c}$  – расчетный период положительных температур, ч, определяется по формуле:

$$t_{th,c} = 1,15 \cdot t_{th,m} + 0,1 \cdot t_1 \quad (5)$$

$t_1$  – время, принимаемое равным 3600 ч;

$t_2$  – время, принимаемое равным 7500 ч;

$T_{th,c}$  – расчетная температура поверхности грунта в летний период, °С, определяемая по формуле:

$$T_{th,c} = 1,4T_{th,m} + 2,4$$

(6)

$T_{th,m}$  и  $t_{th,m}$  – средние по многолетним данным температура воздуха за период положительных температур, °С, и продолжительность этого периода, ч;

$T_{bf}$  – температура начала замерзания грунта, °С, определяемая по СП 25.13330.2012;

$T_0$  – расчетная среднегодовая температура ММП, °С

$\lambda_f$  и  $\lambda_{th}$  – теплопроводность, соответственно, мерзлого и талого грунта, Вт/(м · °С);

$C_f$  и  $C_{th}$  – объемная теплоемкость, соответственно, мерзлого и талого грунта, Дж/(м<sup>3</sup> · °С);

$k_m$  – коэффициент, принимаемый по табл. П4.2 (зел) в зависимости от значения теплоемкости  $C_f$  и средней температуры  $\bar{T}$ , °С, определяемой по формуле:

$$\bar{T} = (T_0 - T_{bf}) \left( \frac{t_{th,c}}{t_1} - 0,22 \right)$$

(7)

$L_v$  – теплота таяния (замерзания) грунта, Вт · ч/м<sup>3</sup>, определяемая при температуре грунта, равной  $0,5\bar{T}$ , °С.

Результаты расчетов физических свойств грунтов приведены в таблице 5.

Табл.5. Результаты расчёта глубины сезонного оттаивания грунтов по методике СП 25.13330.2012:

№ скважины	№ ИГЭ	Интервал залегания, м		Глубина взятия образца, м	Разновидность грунта	Среднезимняя плотность снегового покрова, т/м <sup>3</sup>	Среднезимняя высота снегового покрова, м	Расчетная среднегодовая температура многолетнемерзлого грунта, °С	Средняя температура грунта, °С	Теплопоток в мерзлые породы, Дж/м <sup>2</sup>	Количество открытой теплоты, поглощаемой при плавлении льда, содержащегося в породе, Дж/м <sup>3</sup>	Нормативная глубина сезонного оттаивания грунта, м
		от	до			$\rho_{сн}$	$d_s$	$T_0$	$\bar{T}$	$Q$	$q_1$	$d_{th,n}$
10	10	0,0	4,1	1,0	Супесь легкая	0,190	0,4	-2,5	-1,9	16673,4	40511,4	1,96
12	7	0,0	7,2	2,0	Супесь тяжелая	0,190	0,5	-1,6	-1,2	13453,3	29901,4	2,30
13	1	1,5	6,7	4,0	Торф	0,190	0,3	-3,4	-2,6	23756,9	61154,7	0,98
14		0,0	6,7	1,0	Торф	0,190	0,3	-3,7	-2,9	10172,5	61029,8	0,75
15	2	0,0	12,2	1,0	Суглинок средний	0,190	0,3	-3,9	-3,0	18103,1	152480,0	0,97
16		0,0	13,2	1,0	Суглинок средний	0,190	0,3	-	-	0	53997,1	1,04
17		0,0	8,2	1,0	Суглинок средний	0,190	0,3	-2,5	-1,9	13830,0	39086,4	1,85

### 3.3 Расчет глубин сезонного протаивания в естественных условиях по методике В. А. Кудрявцева

Расчет базируется не только на средних температурах поверхности грунта ( $t_0$ ) за период колебания (1 год), но и на годовой амплитуде температурных колебаний на поверхности пород ( $A_0$ ).

Данная методика учитывает сезонные колебание температуры грунтов и воздуха, наличие обогревающего действия снежного и растительного покровов.

Довольно значительное влияние на глубину сезонного оттаивания оказывает растительный покров, однако рассматриваемая территория характеризуется его отсутствием.

Обогревающее действие снега зависит от его плотности и высоты снежного покрова, в расчетах использованы среднезимние значения. Снежный покров увеличивает среднегодовую температуру на  $\Delta t_{\text{сн}}$ . Годовая амплитуда колебания температур под снежным покровом уменьшается. Эти поправки нужно внести, используя метеорологические данные, получаемые в полевых условиях.

Применяемая методика В. А. Кудрявцева использует значения не поверхностной температуры, а условную температуру подошвы СТС и СМС ( $t_{\xi}$ ) (Усов, Николаева, 2014). Условная температура подошвы отличается от температуры на поверхности ( $t_0$ ) еще на две поправки: температурную сдвигку ( $\Delta t_{\lambda}$ ) и обогревающее воздействие инфильтрации летних осадков ( $\Delta t_{\text{инф}}$ ). Охлаждающее влияние температурной сдвигки вызвано увеличением коэффициента теплопроводности грунта при замерзании. Обогревающее действие инфильтрации осадков совместно с радиационной поправкой  $\Delta t_R$  практически нейтрализует охлаждение за счет  $\Delta t_{\lambda}$ . В данном расчете этими тремя поправками можно пренебречь.

Вычисление глубины сезонного протаивания производились по формулам:

Обогревающее действие снега на породу:

$$\Delta t_{\text{сн}} = \Delta A_{\text{сн}} = \frac{A_{\text{в}}}{2} \left( 1 - e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{KT}}} \right)$$

(8)

где  $A_B$  – метеорологическая амплитуда годовых колебаний температуры воздуха, °С;  $T$  – период колебания температур (равный 8760 час);  $z$  – мощность снежного покрова, м;  $K$  – коэффициент теплопроводности снежного покрова. Выражение в скобках определяется по таблице.

Т.к. обогревающее действие снежного покрова ограничивается зимним временем, можно принять, что  $\Delta t_{сн} = \Delta A_{сн}$ .

$$t_0 = t_B + \Delta t_{сн} - \Delta t_{раст} \quad (9)$$

$$A_0 = \frac{A_B}{2} - \Delta A_{сн} - \Delta A_{раст} \quad (10)$$

$$t_{зим} = \frac{t_{min}}{2} = \frac{|t_0| + A_0}{2} \quad (11)$$

$$L_v = L_0(w_{tot} - w_w)\rho_{a,f} \quad (12)$$

$$a = \frac{A_0 \cdot 2C_{th}}{L_v} \quad (13)$$

$$b = \frac{|t_0| \cdot 2C_{th}}{L_v} \quad (14)$$

$$\xi^* = \sqrt{(m+n)^2 + n} - m \quad (15)$$

$$n = \ln \frac{a+1}{b+1} \quad (16)$$

$$m = \frac{1}{2} \left[ (a - b) \left( 1 + \frac{1}{n} \right) - n \left( 2 + \frac{1}{a - b} \right) \right] \quad (17)$$

$$\xi_{\text{сез}} = \sqrt{\frac{\lambda_{\text{ср}} T}{\pi C_{\text{th}}}} \xi^* \quad (18)$$

где  $t_0$  – среднегодовая температура на поверхности, °С;

$t_{\text{в}}$  – среднегодовая температура воздуха, °С;

$A_0$  – амплитуда колебаний годовых температур на поверхности, °С;

$\Delta t_{\text{сн}}$  – отепляющее действие снега на породу, °С;

$\Delta t_{\text{раст}}$  – отепляющее действие растительного покрова на породу (не учитывается, т.к. растительный покров отсутствует), °С;

$A_0$  – амплитуда колебаний годовых температур на поверхности, °С;

$A_{\text{в}}$  – амплитуда колебаний за год, °С;

$\Delta A_{\text{сн}}$  – воздействие снежного покрова на амплитуду колебаний годовых температур, °С;

$\Delta A_{\text{раст}}$  – воздействие растительного покрова на амплитуду колебаний годовых температур (не учитывается, т.к. растительный покров отсутствует), °С;

$t_{\text{зим}}$  – среднезимняя температура на поверхности, °С;

$L_{\nu}$  – теплота таяния грунта, Вт · ч/м<sup>3</sup>;

$L_0$  – удельная теплота плавления фазовых переходов воды, равная 93 Вт · ч/кг;

$w_{\text{tot}}$  и  $w_{\text{w}}$  – соответственно суммарная влажность и влажность за счет незамерзшей воды, доли ед.;

$\rho_{d,f}$  – плотность сухого грунта, кг/м<sup>3</sup>;

$a, b, n, m, \xi^*$  – безразмерные переменные;

$C_{th}$  – объемная теплоемкость талого грунта, Вт · ч/м<sup>3</sup> · °С;

$\lambda_{cp}$  – усредненное значение теплопроводности талых и мерзлых грунтов, Вт/(м · °С);

$T$  – период колебания температуры, ч;

$\xi_{сез}$  – мощность СТС, м.

По метеоданным с ближайшей к участку изысканий метеостанции Воркута, среднегодовое значение температуры воздуха  $t_B$  составляет минус 6 °С, метеорологическая амплитуда годовых колебаний температуры воздуха  $A_B$  – 33 °С.

Приблизительные значения плотности и мощности снегового покрова также были получены по метеоданным. Плотность снежного покрова  $\rho_{сн}$  – 0,190 г/см<sup>3</sup>, мощность снежного покрова в долине 0,5 м, на склонах 0,3 м, на равнине 0,4 м.

Величина отепляющего действия снегового покрова  $\Delta t_{сн}$  была рассчитана по формуле (8) и составляет на склоне 2,9 °С, на равнине – 3,8 °С, в долине – 4,6 °С.

Среднегодовая температура на подошве СТС была определена по формуле (9), составляет на склоне минус 3,1 °С, на равнине – минус 2,2 °С, в долине – минус 1,8 °С. Амплитуда колебаний годовых температур на поверхности  $A_0$  была рассчитана по формуле (10) и определена на склоне как 13,6 °С, на равнине – 12,7 °С, в долине – 11,9 °С как 12,2 °С. Среднезимняя температура на поверхности  $t_{зим}$  по расчётам (11) составляет на склоне 8,6 °С, на равнине – 7,7 °С, в долине – 6,9 °С.

Результаты расчётов приведены в таблице 6.

Табл.6. Результаты расчета глубины протаивания грунтов в естественных условиях по методике В.А. Кудрявцева:

№ скважины	№ ИГЭ	Интервал залегания, м		Глубина взятия образца, м	Разновидность грунта	Влажность грунта, доли ед.		Плотность сухого грунта, кг/м <sup>3</sup>	Объемная теплоемкость грунта в талом, охлажденном состоянии, Вт·ч/(м <sup>3</sup> ·°C)	Средняя теплопроводность грунта, Вт/(м·°C)	Среднезимняя температура на поверхности, °C	Теплота фазовых переходов, Вт·ч/м <sup>3</sup>	Мощность СТС, м
		от	до			суммарная	за счёт незамёрзшей воды						
10	10	0,0	4,1	1,0	Супесь легкая	0,37	0,026	1168	511,1	1,92	7,5	37366,7	1,6
12	7	0,0	7,2	2,0	Супесь тяжелая	0,27	0,035	1231	511,1	1,92	6,6	26903,5	2,0
13	1	1,5	6,7	4,0	Торф	2,1	0,075	290	1050	0,71	8,3	54614,3	0,8
14		0,0	6,7	1,0	Торф	3,2	0,075	190	922,2	0,56	8,3	55218,8	0,7
15	2	0,0	12,2	1,0	Суглинок средний	1,2	0,075	1400	930,6	1,62	8,3	146475,0	0,7
16		0,0	13,2	1,0	Суглинок средний	0,7	0,075	882	511,1	0,59	8,3	51266,3	0,8
17		0,0	8,2	1,0	Суглинок средний	0,43	0,075	1013	930,6	1,67	8,3	33444,2	1,5

### 3.4 Прогноз изменения кровли ММП под дорожной насыпью

Дорожная насыпь (подсыпка) является основным конструктивным элементом дорог (Инженерное мерзлотоведение, 2014). Это самый действенный метод борьбы с термокарстом и пучением. Насыпь меняет условия теплообмена в системе «атмосфера-литосфера», приводит к изменению температуры ММП и расположению её кровли (мощности СТС). Поэтому тепловое воздействие насыпи необходимо учитывать при её проектировании (Усов, Николаева, 2014).

Проектируется насыпь дороги (рис. 8, 9). Основанием насыпи служит верхний слой пород разреза. Для насыпи используется супесь с влажностью  $W=0,14$  д.е. и плотностью  $\rho=1700$  кг/м<sup>3</sup>. Расчет проводится по методике Л.Н. Хрусталева (1991).

Расчет проводился по следующим формулам:

$$\xi_{\text{сез}}^I = \xi_{\text{сез}} + H_{\Pi} \left( 1 - \frac{\xi_{\text{сез}}}{\xi_{\text{сез}}^{\Pi}} \right) \quad (19)$$

где  $\xi_{\text{сез}}^I$  – глубина сезонного протаивания после возведения насыпи;

$\xi_{\text{сез}}$  – мощность СТС на соседних участках до возведения насыпи;

$H_{\Pi}$  – высота насыпи;

$\xi_{\text{сез}}^{\Pi}$  – мощность СТС слоя насыпного грунта;

$\xi_{\text{сез}}$  и  $\xi_{\text{сез}}^{\Pi}$  рассчитываются по одной формуле, но с разными физическими характеристиками для  $q_i$ :

$$\xi_{\text{сез}} = \mu \sqrt{\frac{2\lambda_{th}\Omega_{\text{л}}}{q_f}} \quad (20)$$

$$\xi_{\text{сез}}^{\Pi} = \mu \sqrt{\frac{2\lambda_{th}\Omega_{\text{л}}}{q_f}} \quad (21)$$

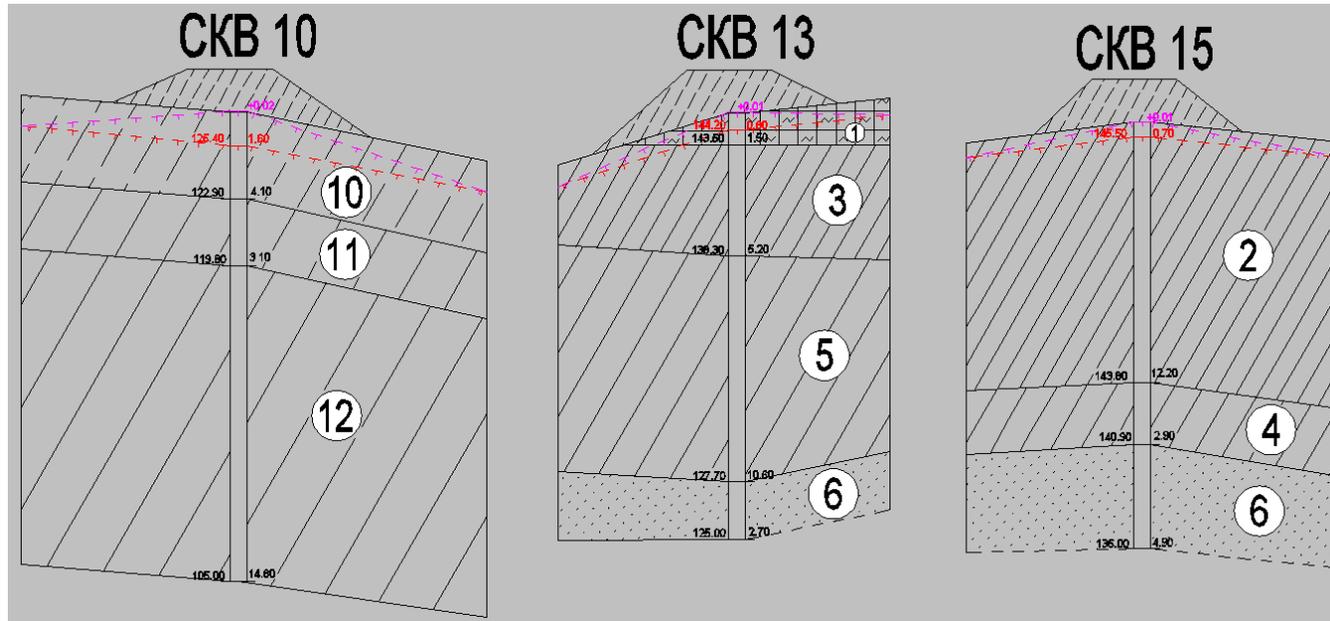


Рис. 8, 9. План насыпи дороги (масштаб 1:200) и условные обозначения.

$$\mu = 1 - 0,033|t_{\xi}| \quad (22)$$

где  $q_f$  – затраты тепла на оттаивание-промерзание грунта, Вт · ч/м<sup>3</sup>;

$t_{\xi}$  – среднегодовая температура грунта на подошве СТС или (приблизительно) температура на глубине нулевых годовых амплитуд.

В формуле 21 теплопроводность и теплота фазовых переходов определяется для насыпного грунта, а в формуле 20 – для пород основания, с соответствующими влажностью и плотностью.

$$q_f = z_0 \rho_d w_{tot} + 0.5(C_{th} \cdot t_{\text{л}} - C_f \cdot t_{\text{з}}) \quad (23)$$

где  $t_{\text{л}}$  и  $t_{\text{з}}$  – среднелетняя и среднезимняя температуры наружного воздуха в районе строительства, °С;

$\Omega_{\text{л}}$  – сумма градусо-часов на поверхности в летнее время:

$$\Omega_{\text{л}} = 730 \sum_i^m t_i \quad (24)$$

где  $m$  – число летних месяцев,  $t_i$  – средняя температура месяца.

$$\xi_{\text{сез}}^{\text{осн}} = \xi_{\text{сез}}^{\text{л}} - H_{\text{п}} \quad (25)$$

где  $\xi_{\text{сез}}^{\text{осн}}$  – глубина сезонного протаивания в основании подсыпки.

Если высота насыпи  $H_{\text{п}}$  оказывается больше  $\xi_{\text{сез}}^{\text{л}}$ , то основание не промерзнет, и в теле насыпи формируется мерзлое ядро.

Результаты расчётов приведены в таблице 7.

Табл.7. Результаты расчета изменения кровли ММП под дорожной насыпью:

№ скважины	№ ИГЭ	Интервал залегания		Глубина взятия образца, м	Разновидность грунта	Среднезимняя плотность снегового покрова, т/м <sup>3</sup>	Среднезимняя высота снегового покрова, м	Заграты тепла на оттаивания-промерзание грунта, Вт · ч/м <sup>3</sup>	Мощность СТС слоя насыпного грунта, м	Мощность СТС на соседних участках до возведения насыпи, м	Глубина сезонного протаивания после возведения насыпи, м	Глубина сезонного протаивания в основании подсыпки, м
		от	до			$\rho_{сн}$	$d_s$	$q_f$	$\xi_{сез}^{II}$	$\xi_{сез}$	$\xi_{сез}^I$	$\xi_{сез}^{осн}$
10	10	0,0	4,1	1,0	Супесь легкая	0,190	0,4	6408,4		3,14	1,98	-0,02
13	1	1,5	6,7	4,0	Торф	0,190	0,3	11313,0		1,51	1,99	-0,01
15	2	0,0	12,2	1,0	Суглинок средний	0,190	0,3	10953,7		2,10	1,99	-0,01
					Насыпь – супесь		0,4	7489,4	1,99			

### 3.5 Устойчивость сваи мостового перехода через речку на правом берегу реки

Одиночная свая спроектирована на правом берегу реки (рис. 10, 11).

Расчет оснований фундаментов по несущей способности производится исходя из условия:

$$F \leq F_u / \gamma_n \quad (26)$$

где  $F$  – расчетная нагрузка на основание;

$F_u$  – несущая способность основания, кН;

$\gamma_n$  – коэффициент надежности по назначению сооружения (равный 1,2).

Несущая способность основания,  $F_u$ , кН (т), вертикально нагруженной висячей сваей определяется по формуле (Усов, Николаева, 2014):

$$F_u = \gamma_t \gamma_c \left( RA + \sum_{i=1}^n R_{af,i} A_{af,i} \right) \quad (27)$$

где  $\gamma_t$  – температурный коэффициент, учитывающий изменение температуры грунтов основания в период строительства и эксплуатации сооружения

$\gamma_c$  – коэффициент условий работы, принимаемый в зависимости от вида и способов устройства фундаментов (равен 1,1);

$R$  – расчетное давление на мерзлый грунт под нижним концом сваи, кПа;

$A$  – площадь опирания сваи на грунт, м<sup>2</sup>;

$R_{af,i}$  – расчетное сопротивление мерзлого грунта или грунтового раствора сдвигу по боковой поверхности смерзания фундамента с пределах  $i$ -го слоя грунта, кПа;

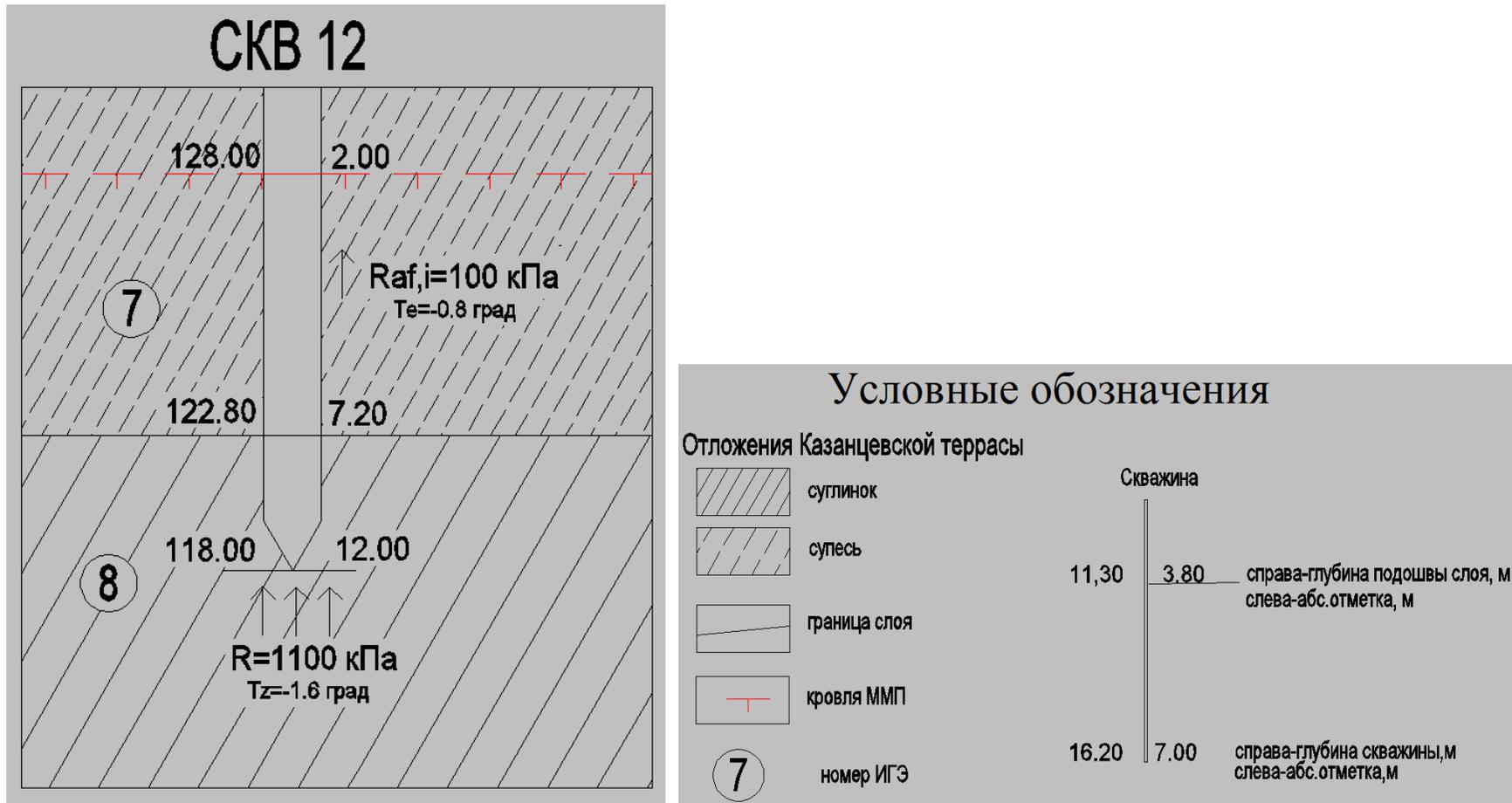


Рис. 10, 11. План свайного фундамента мостового перехода (масштаб 1:200) и условные обозначения.

$A_{af,i}$  – площадь поверхности смерзания  $i$ -го слоя грунта с боковой поверхностью сваи, м<sup>2</sup>;

$n$  – число выделенных при расчете слоев ММП.

Для расчета несущей способности основания необходимо определить расчетную температуру, которая соответствует минимальной несущей способности основания – эквивалентная температура  $T_e$ . Эквивалентная температура определяет несущую способность только по боковой поверхности. Несущую способность торца сваи определяет температура  $T_z$  на глубине  $z$  ( $z$  – глубина, отсчитываемая от подошвы слоя СТС) в момент установления эквивалентной температуры.

Поэтому для свайных фундаментов значения  $R$  следует принимать при расчетной температуре грунта  $T_z$  на глубине  $z$ , равной глубине погружения сваи, а расчетные сопротивления сдвигу  $R_{af,i}$  – при температуре грунта  $T_e$  на глубине  $i$ -го слоя грунта.

Расчетную температуру  $T_{z,e}$  для мостов определяют по формуле:

$$T_{z,e} = (T_0 - T_{bf})\alpha_{z,e}k_{ts} + T_{bf} \quad (28)$$

где  $T_0$  – температура ММП, °С (на глубине 10 м она принимается за среднегодовую);

$T_{bf}$  – температура начала замерзания, °С;

$\alpha_{z,e}$  – коэффициент сезонного изменения температуры пород основания, принимаемый в зависимости от значения параметров  $z\sqrt{C_f/\lambda_f}$ , где  $z$  – расстояние от подошвы СТС до уровня, на котором определяется температура, м;  $C_f, \lambda_f$  – объемная теплоемкость, Дж/(м<sup>3</sup> · °С) и коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °С), мерзлых пород;

$k_{ts}$  – коэффициент теплового влияния сооружения (принимаемый по таблице)

Результаты расчётов приведены в таблице 8.

Табл.8. Результаты расчета устойчивости свай мостового перехода:

№ скважины	№ ИГЭ	Интервал залегания, м		№ слоя	Разновидность грунта	Объемная теплоемкость мерзлого грунта, Вт · ч/°С	Теплопроводность мерзлого грунта, Вт/м · °С	Расчетное давление на мерзлый грунт под нижним концом свай, кПа	Расчетное сопротивление мерзлого грунта по боковой поверхности смерзания фундамента в пределах <i>i</i> -го слоя грунта, кПа	Площадь опирания свай на грунт, м <sup>2</sup>	Площадь поверхность смерзания <i>i</i> -го слоя грунта с боковой поверхностью свай, м <sup>2</sup>	Несущая способность основания, т
		от	до			$C_f$	$\lambda_f$	$R$	$R_{af,i}$	$A$	$A_{af,i}$	$F_u$
12	7	1,8	1	2	Супесь тяжелая	1480000	1,97		100		9,8	131
	8	7,2	10	1	Суглинок	1680000	0,75	1100		0,3		

### 3.6 Оценка вероятности термокарста

Изменения среднегодовых температур, амплитуды колебания температур воздуха и других климатических параметров приводят к нарушению равновесия в системе литосфера-атмосфера, вплоть до глубокой деградации ММП. В первую очередь эти изменения реализуются на уровне СТС, главного «буфера» между атмосферой и литосферой. При этом могут возникать или усугубляться такие криогенные процессы как термокарст, пучение и солифлюкция. Количественным выражением термокарста служит осадка при оттаивании. (Усов, Николаева, 2014).

#### 3.6.1. Расчёт глубины протаивания грунтов при увеличении мощности снежного покрова под дренажными канавами

Расчет производился по той же методике, что и в разделе 3.2. В качестве исходных данных было принято, что мощность снежных наносов увеличилась до 1,2 м

Результаты вычислений приведены в таблице 9.

#### 3.6.2. Расчёт глубины протаивания грунтов под дном мелкого водоёма

На исследуемой территории в пределах зоны отчуждения – два термокарстовых озера глубиной 0,4 и 0,8 м (рис. 12). Присутствие мелких водоемов необходимо учесть, т.к. под дном водоёма возможно развитие термокарста. В случае прогрессирующего термокарста возникает опасность глубокой деградации ММП, в случае затухания - ситуация стабилизируется.

Характер промерзания-протаивания донных отложений зависит от температурного режима воды, в том числе – мощности ледового покрова (Усов, Николаева, 2014). Таким образом, в задаче нужно определить глубину залегания нулевой среднегодовой изотермы  $H_1$ .

В зависимости от глубины водоема  $H$  возможны 3 варианта:

1) Глубина водоема меньше  $H_1$ , т.е.  $H < H_1$ . Донные отложения находятся в многолетнемерзлом состоянии и оттаивают летом на глубину  $\xi_{сез}$ .

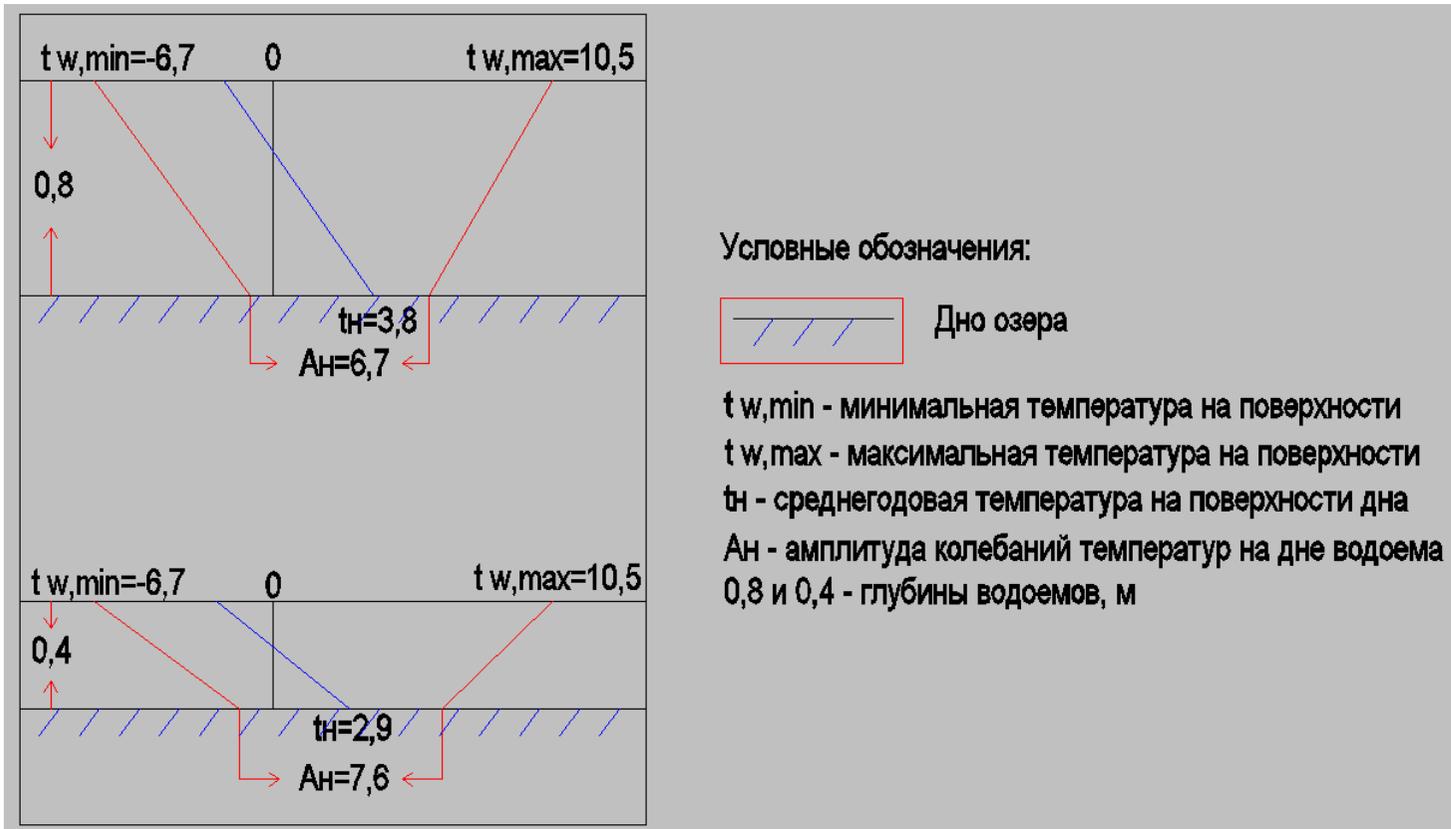


Рис. 12. План протаивания грунтов под дном мелких водоемов. Масштаб: горизонтальный 1:1; вертикальный 1:40.

2) Глубина водоема больше  $H_1$ , но меньше мощности льда  $H_i$  ( $H_1 < H < H_i$ ). Имеет место сезонное промерзание донных отложений, а кровля ММП залегает ниже, образуя несквозной талик. Возможен затухающий термокарст.

3) Глубина водоема больше  $H_i$ , т.е.  $H > H_i$ . Под водоемом развивается активный термокарст.

Глубина мелкого водоёма была принята за 0,4 и 0,8 м, мощность льда по метеоданным в этом районе составляет 1,4 м.

Вычисления производились по формулам:

$$t_{w,min} = A_{0,i} - t_{0,i} \quad (29)$$

$$t_{w,max} = A_{0,i} + t_{0,i} \quad (30)$$

где  $t_{w,min}$  – температура воды в летнее время, °С;

$t_{w,max}$  – температура на поверхности льда в зимнее время, °С.

Температурный режим донных отложений зависит от глубины залегания нулевой среднегодовой изотермы  $H_1$  под слоем воды и (или) донных осадков. Её рассчитывают по формуле:

$$H_1 = H_i \left( 1 + \frac{t_{w,max}}{t_{w,min}} \right) \quad (31)$$

где  $H_i$  – мощность льда (1,4 м).

Для вычисления глубины сезонного промерзания или протаивания под дном водоема необходимо определить среднегодовую температуру на поверхности дна  $t_H$  и амплитуду колебаний температур  $A_H$  на дне водоема по формулам:

$$t_H = \frac{\frac{H_i - H}{H_i} t_{w,min} + t_{w,max}}{2} \quad (32)$$

$$A_H = t_{w,max} - t_H \quad (33)$$

Далее рассчитывают  $\xi_{сез}$  по методике В.А. Кудрявцева

Расчёт выполнялся по методике В.А. Кудрявцева, изложенной в разделе 3.2. (формулы 11-18), но в данном случае роль  $t_0$  играет  $t_H$ , а  $A_0 - A_H$ . Также были посчитаны прирост мощности СМС (сезонно-мерзлый слой).

Значения  $t_{0,i}$  и  $A_{0,i}$  получились равны 1,9 и 8,6 °С соответственно;  $t_{w,min}$  и  $t_{w,max}$  были определены как минус 6,7 и 10,5 °С соответственно. Среднегодовая температура на поверхности дна  $t_H$  и амплитуда годовых колебаний  $A_H$  при глубине озера 0,8м составляет 3,8 и 6,7 °С, при глубина озера 0,4 м – 2,9 и 7,6 °С. Глубина залегания нулевой среднегодовой изотермы под слоем воды и (или) донных осадков равна 0,81 м. Это свидетельствует о невозможности развития прогрессирующего термокараста.

Результаты вычислений приведены в таблице 10.

Табл.9. Результаты расчета развития термокарста под дренажными канавами:

№ сква- жины	№ ИГЭ	Интервал залегания, м		Глубина взятия образца, м	Разновидность грунта	Влажность грунта, доли ед.		Плотность сухого грунта, кг/м <sup>3</sup>	Объемная теплоемкость грунта в талом, охлажденном состоянии, Вт·ч/(м <sup>3</sup> ·°С)	Средняя теплопро- водность грунта, Вт/(м·°С)	Среднезимняя температура на поверхности, °С	Теплота фазовых переходов, Вт·ч/м <sup>3</sup>	Мощность СТС, м
						суммарная	за счёт незамёрз- шей воды						
		от	до			$w_{tot}$	$w_w$						
10	10	0,0	4,1	1,0	Супесь легкая	0,37	0,026	1168	511,1	1,92	5,3	37366,7	2,0
12	7	0,0	7,2	2,0	Супесь тяжелая	0,27	0,035	1231	511,1	1,92	5,3	26903,5	2,4
13	1	1,5	6,7	4,0	Торф	2,1	0,075	290	1050	0,71	5,3	54614,3	1,0
14		0,0	6,7	1,0	Торф	3,2	0,075	190	922,2	0,56	5,3	55218,8	0,9
15	2	0,0	12,2	1,0	Суглинок средний	1,2	0,075	1400	930,6	1,62	5,3	146475,0	0,9
16		0,0	13,2	1,0	Суглинок средний	0,7	0,075	882	511,1	0,59	5,3	51266,3	0,9
17		0,0	8,2	1,0	Суглинок средний	0,43	0,075	1013	930,6	1,67	5,3	33444,2	2,0

Табл. 10. Результаты расчёта глубины протаивания грунтов под дном мелкого водоёма:

№ скважины	№ ИГЭ	Интервал залегания, м		Разновидность грунта	Глубина залегания нулевой среднегодовой изотермы под слоем воды и (или) донных осадков, м	Среднегодовая температура на поверхности дна, °С	Амплитуда колебаний температур на дне водоема, °С	Мощность СТС до образования водоёма, м	Мощность СТС после образования водоёма, м	Приrost мощности СМС, м
		от	до							
14	1	0,0	6,7	Торф	0,81	3,8	6,7	0,70	0,77	0,07
14		0,0	6,7	Торф	0,81	2,9	7,6	0,70	0,75	0,05

### 3.7 Глубина протаивания под домом для дорожных рабочих

Расчет глубины протаивания выполняют для учета теплового воздействия сооружения на температурное поле и свойства грунтов (формирование чаши протаивания) (Усов, Николаева, 2014).

Расчет глубины оттаивания грунтов (рис 13, 14)  $H$  в основании сооружения (считая от поверхности грунта под сооружением), за время его эксплуатации  $\tau$ , производится по формуле:

под серединой сооружения

$$H_c = k_n(\xi_c - k_c)B \quad (34)$$

где  $H_c$  – глубина оттаивания грунтов под серединой сооружения;

$k_n$  – коэффициент, определяемый в зависимости от отношения  $L/B$  (соответственно длина и ширина сооружения, м) и значений параметров  $\beta$  и  $\Psi$ ;  $\xi_c$ ,  $k_c$  – коэффициенты, определяемые по графикам в зависимости от значений параметров  $\alpha_R$ ,  $\beta$  и  $\Psi$ :

$$\alpha_R = \frac{\lambda_{th}R_0}{B} \quad (35)$$

$$\beta = -\frac{\lambda_f(T_0 - T_{bf})}{\lambda_{th}(T_{in} - T_{bf})} \quad (36)$$

$$\Psi = \frac{\lambda_{th}T_{in}\tau}{L_v B^2} \quad (37)$$

где  $\lambda_{th}$  и  $\lambda_f$  – соответственно коэффициенты теплопроводности талого и мерзлого грунта, Вт/(м · °С);

$R_0$  – сопротивление теплопередаче пола первого этажа или подвала сооружения, м<sup>2</sup> · °С/Вт;

$T_0$  – расчетная среднегодовая температура ММП на подошве слоя сезонного оттаивания вне контура здания, °С (равная температуре на глубине годовой амплитуды);

$T_{bf}$  – температура начала замерзания грунта, °С;

$T_{in}$  – расчетная температура воздуха внутри сооружения, °С

$\tau$  – продолжительность расчетного периода, ч;

$L_v$  – теплота таяния мерзлого грунта, Вт · ч/м<sup>3</sup>.

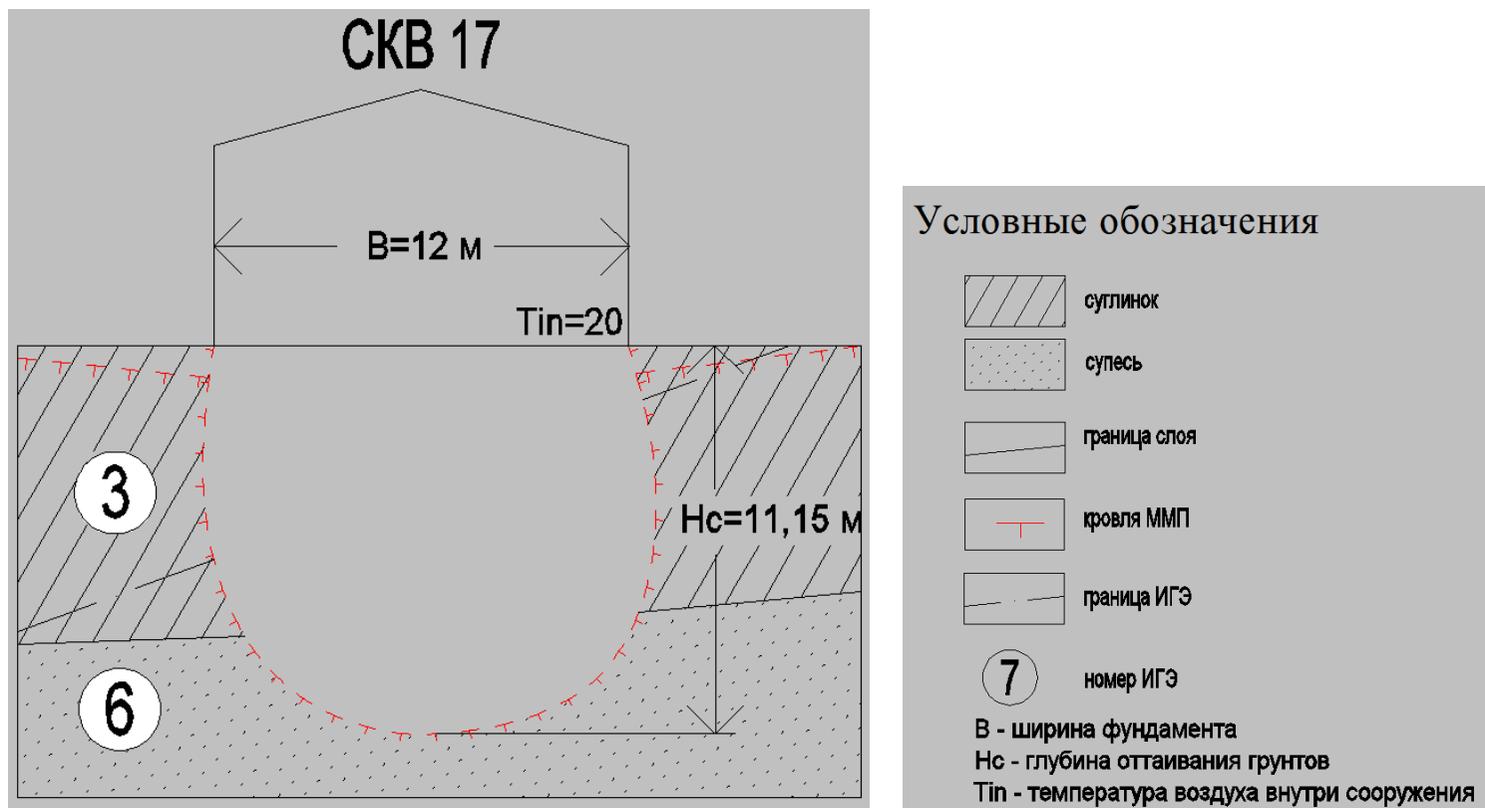


Рис. 13, 14. План глубины протаивания под домом для дорожных рабочих (масштаб 1:200) и условные обозначения.

Максимальная глубина оттаивания грунта  $H_{max}$ , м, (считая от поверхности грунта под сооружением), соответствующая установившемуся положению границы зоны оттаивания, определяется по формуле:

под серединой сооружения

$$H_{c,max} = k_s \xi_{c,max} B \quad (38)$$

где  $k_s$  – коэффициент, определяемый по таблице;

$\xi_{c,max}$  – коэффициент, определяемый по графику.

Осадка при оттаивании:

$$s = \frac{\rho_s (w_{tot} - w_m) h}{1 + \rho_s} \quad (39)$$

где  $\rho_s$  – плотность частиц грунта, г/см<sup>3</sup>;

$w_{tot}$  и  $w_w$  – соответственно суммарная влажность и влажность за счет незамерзшей воды, доли ед.

Результаты вычислений приведены в таблице 11.

Табл.11. Результаты расчета глубины протаивания под домом для дорожных рабочих:

№ скважины	№ ИГЭ	Интервал залегания		Глубина взятия образца	Разновидность грунта	Коэффициент теплопроводности талого грунта, Вт/(м·°С)	Коэффициент теплопроводности мерзлого грунта, Вт/(м·°С)	Температура начала заморозания грунта, °С	Расчетная среднегодовая температура ММП, °С (равная температуре на глубине нулевой амплитуды)	Теплота фазовых переходов, Вт·ч/м³	Глубина оттаивания грунта, м	Максимальная глубина оттаивания грунта, м	Осадка при оттаивании, м
		от	до			$\lambda_{th}$	$\lambda_f$	$T_{bf}$	$T_0$	$L_v$	$H_c$	$H_{c,max}$	$S$
17	2	0,0	8,2	1,0	Суглинок средний	1,57	1,76	-0,2	-2,5	33444,2	10,15	11,2	1,32

## Заключение

Таким образом, в ходе подготовки магистерской диссертации были изучены геолого-географические условия района и составлен структурированный инженерно-геокриологический разрез участка будущего строительства.

На базе полученных данных были сделаны прогнозные расчеты взаимодействия ММП с инженерными сооружениями.

Результаты прогнозных расчетов на изученной территории сводятся к следующему:

1) Глубина сезонного протаивания на изученном участке, рассчитанная по двум методикам колеблется в зависимости от свойств грунта от 0,05 м до 0,35 м.

2) В пределах инженерно-геологического разреза выделено 13 ИГЭ. Построен инженерно-геологический разрез, на котором по генезису, литологическому типу и физико-механическим свойствам выделено 13 инженерно-геологических элементов (ИГЭ);

3) Определено новое положение кровли многолетнемерзлых пород (ММП). При возведении насыпи, мощностью 2 м, кровля ММП под насыпью поднимается от 0,7 м до 1,6 м. Таким образом, в насыпи не образуется мерзлое ядро.

4) Несущая способность сваи мостового перехода составила 131 т;

5) В результате увеличения мощности снежного покрова возможно развитие термокарста под дренажными канавами;

6) По результатам расчета выяснилось, что на дне водоема сохраняется положительная температура, следовательно, возможно дальнейшее развитие термокарста. Сезонное протаивание для ИГЭ-1 (торф) при глубине водоема 0,8 м составило 0,07 м, а при глубине водоема 0,4 м - 0,05 м;

7) Глубина чаши оттаивания под жилым помещением составит 10,15 м и осадка при оттаивании 1,32 м превышает допустимые нормы. Поэтому рекомендуется использовать фундамент с сохранением многолетнемерзлого состояния, а это осуществляется либо путем проветривания подполья, либо использованием свайного фундамента.

## Список литературы

1. Зоричева А.И. Геология СССР. Том II. Архангельская, Вологодская области и Коми АССР. М.: «Недра», 1963, 682 с.
2. Ершов Э.Д., Швецов П.Ф., Гарагуля Л.С. Геокриология СССР. Европейская территория СССР. М.: «Недра», 1988, 358 с.
3. Ершов Э.Д., Общая геокриология. М.: Изд-во МГУ, 2002, 682 с.
4. Короновский Н.В. Геология России и сопредельных территорий. М.: Издательский центр «Академия», 2011, 240 с.
5. Метелкин Д.В., Верниковский В. А. Региональная геология России (краткий курс лекций). Изд. Новосибирского ун-та, 2005. С. 25-30.
6. Николаева Т.Н., Усов В.А. Физико-механические свойства мерзлых пород. СПб, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2014, 51 с.
7. Оберман Н.Г., Шеслер И.Г., Рубцов А.И. Экология республики Коми и восточной части Ненецкого Автономного Округа. Изд. «ПрологПолюс», 2004. С. 7-23.
8. Сидоренко А.В. Гидрогеология СССР. Том XLII. Коми АССР и Ненецкий национальный округ Архангельской области. М.: «Недра», 1970, 33-.
9. Сергеев Е.М., Голодковская Г.А. Инженерная геология СССР. Том 1. Русская платформа. Изд. Московского ун-та, 1978. 528 с.
10. Станкевич Е.Ф. Четвертичные отложения восточной части Большеземельской тундры. Известия Академии наук СССР. Серия геологическая №5. 1962. 12 с.
11. Тимано-Печорский седиментационный бассейн. Атлас геологических карт. Под ред. З.В. Ларионовой, В.И. Богацкого. Ухта: Изд-во ООО «Региональный Дом печати», 2000, 67 с.
12. Тимано-Печорский седиментационный бассейн (Объяснительная записка к «Атласу геологических карт», 2000). Под ред. З.В. Ларионовой, В.И. Богацкого. Ухта: Изд-во ТП НИЦ, 2002, 122 с.

13. Усов В.А., Николаева Т.Н. Инженерное мерзлотоведение: методические указания к лабораторным работам. СПб, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2013, 51 с.

Ресурсы сети Интернет:

1. [http://www.ngtr.ru/rub/4/40\\_2011.pdf](http://www.ngtr.ru/rub/4/40_2011.pdf) - новые представления о тектоническом и нефтегазогеологическом районировании Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. ФГУП «ВНИГРИ», СПб, 2011. С. 17-19.

## Приложения