Санкт-Петербургский государственный университет

НЕСТЕРОВ Дмитрий Сергеевич

Выпускная квалификационная работа

Оценка отепляющего воздействия проектируемых сооружений на несущий слой в границах аэропортового комплекса «Полярный», пос. Удачный, Республика Саха (Якутия)

Уровень образования: магистратура

Направление: 05.04.01 «Геология»

Основная образовательная программа: ВМ.5798.2020 «Гидрогеология и инженерная геология»

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
старший преподаватель
Кудашов Егор Сергеевич

_____ « » мая 2022 г.

Заведующий кафедрой:
кандидат геолого-минералогических наук
Бурлуцкий Станислав Борисович

_____ « » мая 2022 г.

Санкт-Петербург
2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 3
1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРРИТОРИИ ИССЛЕДОВАНИЯ 5
1.1. Физико-географическая характеристика 5
1.2. Климатическая характеристика 6
1.3. Геоморфология и рельеф 8
1.4. Гидрография и гидрология 10
2. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ТЕРРИТОРИИ ИССЛЕДОВАНИЙ 12
2.1. Геологическое строение и свойства грунтов 12
2.2. Основные инженерно-геологические типы пород 13
2.3. Инженерно-геокриологические условия 14
2.4. Гидрогеологические условия 16
2.5. Специфические грунты 17
2.6. Геологические и инженерно-геологические процессы 18
3. ОТЕПЛЯЮЩЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ПРОЕКТИРУЕМЫХ СООРУЖЕНИЙ 22
3.1. Расчет изменения среднегодовой температуры грунтов и глубины сезонного оттаивания грунтов в зависимости от мощности снежного и напочвенного растительного покровов 22
3.2. Расчет нормативной глубины сезонного оттаивания и промерзания грунтов 30
3.3. Расчет глубины оттаивания грунтов под зданием аэровокзала 36
3.4. Расчет глубины оттаивания грунтов под взлетно-посадочной полосой 39
4. ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ 44
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 49
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ И ИСТОЧНИКОВ 54
Приложение 1. Инженерно-геологический разрез по линии 21-21 56
Приложение 2. Инженерно-геологический разрез вдоль трассы ИВПП 57
Приложение 3. Нормативные и расчетные характеристики физико-механических свойств мерзлых грунтов 59
Приложение 4. Нормативные и расчетные характеристики физико-механических свойств скальных грунтов 60

ВВЕДЕНИЕ

Строительство различных видов сооружений на территории повсеместного развития многолетнемерзлых грунтов (ММГ, ММП) характеризуется особенностями, которые могут оказывать неблагоприятное влияние на сам процесс строительства.

Горные породы (грунты) всех видов называются мерзлыми грунтами, если они имеют нулевую или отрицательную температуру, а также содержат в составе видимые ледяные включения и характеризуются криогенными структурными связями. Грунты, находящиеся в таком состоянии в течение трех и более лет являются многолетнемерзлыми (вечномерзлыми) грунтами.

Основным фактором, затрудняющим строительство, является изменчивость ММГ под влиянием температурного режима. При сохранении отрицательной температуры грунты могут выдерживать довольно высокие нагрузки без последующей деформации. Однако при изменении температурного режима на положительный, грунты подвергаются оттаиванию, что в свою очередь приводит к потере несущей способности и началу деформационных изменений.

Таким образом, актуальность данной работы заключается в оценке отепляющего воздействия сооружений на грунт с целью недопущения изменений несущей способности грунтов и предусмотрение необходимых технологических или конструктивных мероприятий для предотвращения этих изменений.

Объект исследования: территория аэропортового комплекса «Полярный», расположенного в поселке Удачный, Республике Саха (Якутия).

Предмет исследования: деформационные свойства несущего слоя грунта.

Целью исследования является рассмотрение вопросов строительства сооружений аэропортовых комплексов в условиях многолетнемерзлых грунтов.

Задачи исследования:

1. Изучить особенности строительства сооружений аэропортовых комплексов на территории ММГ;
2. Провести расчет изменения отепляющего воздействия проектируемых сооружений, а именно:
    - Расчет изменения среднегодовой температуры грунтов и глубины сезонного оттаивания грунтов в зависимости от мощностей снежного и напочвенного растительного покровов;

- Расчет нормативной глубины сезонного оттаивания и промерзания грунтов;
- Расчет глубины оттаивания грунтов под зданием аэровокзала;
- Расчет глубины оттаивания грунтов под взлетно-посадочной полосой;

3. Рассмотреть возможность проведения защитных технологических или конструктивных мероприятий.

Методы исследования:

1. Анализ и обработка теоретического материала, непосредственно связанного с территорией проведения исследований в рамках данной работы;
2. Лабораторные исследования физико-механических свойств грунтов, представленных на территории исследования, а также выделение инженерно-геологических элементов (ИГЭ) на основе полученных данных;
3. Проведение расчетов для анализа изменения степени оттаивания грунтов и деформаций в соответствии с требованиями документов по стандартизации (СП), утвержденных на территории Российской Федерации, и межгосударственных стандартов (ГОСТ) .

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРРИТОРИИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Физико-географическая характеристика

Изучаемая территория расположена в пределах аэропортового комплекса «Полярный», в 9 км от административного центра – города Удачный, Республики Саха (Якутия), Дальневосточного федерального округа (рис. 1).

Город Удачный – город улусного значения в Мирнинском районе (улусе), расположен в западной части Якутии в 930 км от столицы региона – города Якутска.

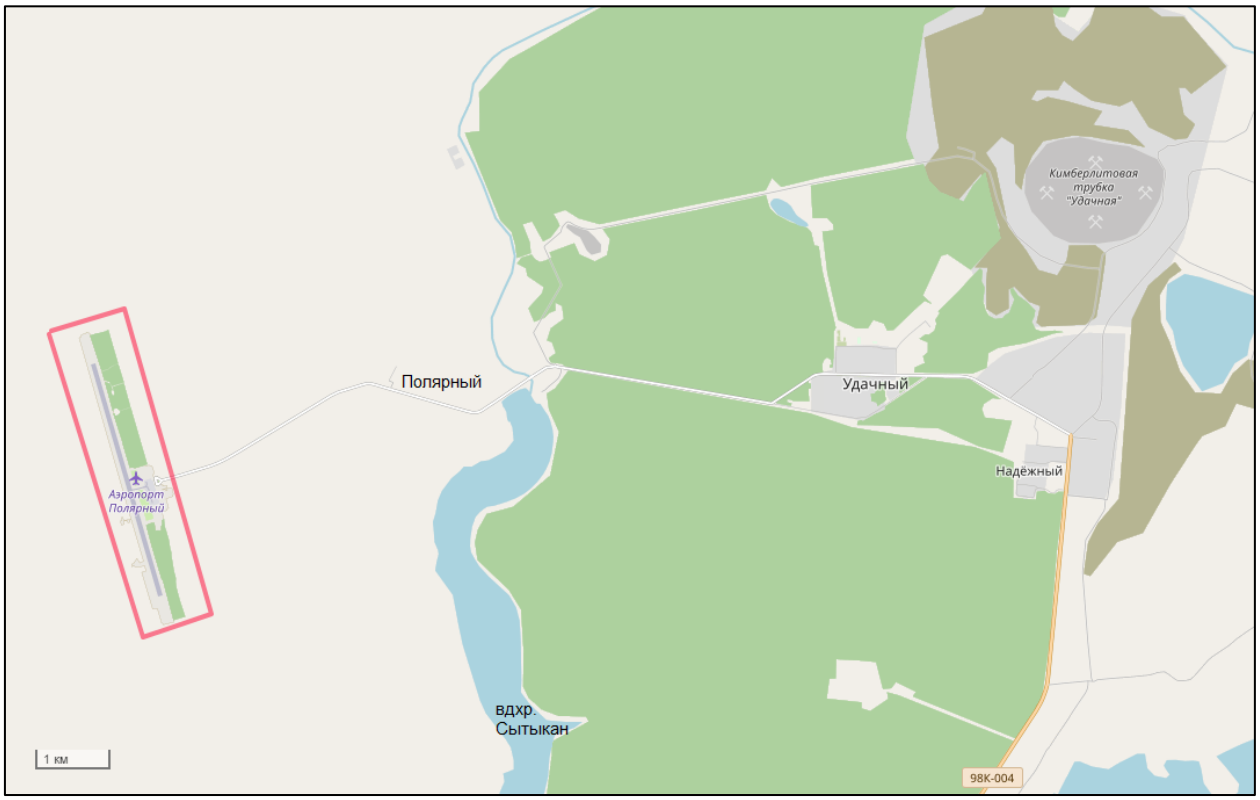


Рис. 1. Местоположение исследуемой территории в пределах административного центра – города Удачный. [34]

Основные виды транспорта – автомобильный и авиационный, последний имеет огромное значение. Аэропорт «Полярный», принимающий большинство типов самолетов, связан со многими районными центрами Республики Саха и Российской Федерации в целом.

Кроме того, связь с городом Мирный – административным центром района, осуществляется по автомобильной дороге IV категории. [2]

Основу экономики района составляет алмазодобывающая промышленность.

1.2. Климатическая характеристика

Основные метеорологические характеристики исследуемого района представлены по материалам наблюдений метеорологической станции «Полярный» за период 1969-2021 г.г. по предоставленным данным ФГБУ «Якутское УГМС». [33]

Средняя годовая температура воздуха составляет -9,5 ºС. Самым холодным месяцем является январь, среднемесячная его температура составляет -30,6 ºС. Абсолютный минимум температуры воздуха составляет -55,4 ºС. Самым теплым месяцем на рассматриваемой территории является июль, со средней температурой воздуха +15,0 ºС. Абсолютный максимум температуры воздуха составляет +33,6 ºС (табл. 1).

Таблица 1.

Средние значения температуры воздуха (ºС) по данным наблюдений на м/ст. «Полярный».

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
-30,6	-28,9	-20,3	-9,8	0,2	10,4	15,0	10,9	2,3	-10,8	-23,0	-29,0	-9,5

Средняя годовая относительная влажность воздуха составляет 74% (табл. 2). Наибольшая влажность наблюдается в октябре-ноябре, наименьшая – в июне.

Таблица 2.

Характеристика влажности воздуха по данным наблюдений на станции «Полярный» (средняя относительная влажность, %).

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
82	82	76	66	64	61	62	71	78	84	84	82	74

В течение года осадки выпадают неравномерно: большая их часть приходится на теплый период (май-октябрь), меньшая на холодный период (ноябрь-апрель). В среднем за год выпадает 344 мм осадков.

Максимум осадков приходится, обычно, на июль (58 мм), а минимум на февраль (9 мм). В отдельные годы такая закономерность нарушается, и как максимум осадков, так и минимум могут наблюдаться в разные месяцы. Сведения о режиме осадков приведены в таблице 3. Суточный максимум осадков составляет 57,7 мм.

Таблица 3.

Средние значения атмосферных осадков (мм) по данным наблюдений на станции «Полярный».

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
10	9	12	20	30	50	58	47	38	32	18	12	344

В исследуемом районе преобладают ветра северо-западного и западного направлений, повторяемость которых колеблется от 19 до 22%.

На территории в теплый и холодный периоды преобладают слабые ветры скоростью 2,5-3,4 м/с. Среднегодовая скорость ветра составляет 3,0 м/с. Максимальная скорость ветра без учета порыва составляет 19 м/с, с учетом порыва – 27 м/с. Сведения о ветровом режиме представлены в таблицах 1.4-1.5.

Таблица 4.

Средняя скорость ветра (м/с) у земли по данным наблюдений на станции «Полярный».

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
2,5	2,6	2,9	3,4	3,4	3,4	3,1	2,9	3,1	3,1	2,7	2,6	3,0

Таблица 5.

Повторяемость (%) направлений ветра и штилей по данным наблюдений на станции «Полярный».

Направление	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
С	3	3	8	13	17	15	16	13	10	6	4	3	9
СВ	2	2	3	7	12	12	15	9	8	3	2	1	6
В	6	8	7	10	11	12	15	13	9	7	7	7	9
ЮВ	6	6	7	8	7	8	8	8	7	7	7	7	7
Ю	12	12	13	13	10	12	11	12	12	13	12	15	13
ЮЗ	18	16	15	15	11	11	10	13	16	18	17	16	15
З	30	28	24	16	16	14	12	17	21	28	28	31	22
СЗ	23	25	23	18	16	16	13	15	17	18	23	20	19
штиль	7	6	3	2	2	2	2	2	2	3	6	7	4

Время выпадения первого снега близко к дате перехода средней суточной температуры воздуха через 0 ºС. Характеристика снежного покрова на исследуемой территории представлена в таблице 6.

Таблица 6.

Высота (см) снежного покрова по постоянной рейке на последний день декады по данным наблюдений на станции «Полярный».

Месяц, декада	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	Наибольшая за зиму		
I	-	-	-	-	-	52	57	62	53	-	сред.	макс.	мин.
II	-	22	36	43	48	53	58	63	39	-			
III	-	-	-	-	49	54	59	63	15	-	69	89	46

1.3. Геоморфология и рельеф

В орографическом отношении район исследования расположен в пределах Сибирской платформы в северо-восточной части Среднесибирского плоскогорья, на территории Далдынского промышленного района, который относится к Вилюйскому трапповому плато (палеозойские известняково-доломитовые осадочные породы переслаиваются и покрываются траппами), и представляет собой сильно расчлененное пологоволнистое плато, приподнятое на 430-440 м над уровнем моря (рис. 2).

С трапповым вулканизмом связано проникновение кимберлитовой магмы в толщи битуминозных известняков и доломитов и образование алмазоносных трубок, в связи с чем ведущее место среди полезных ископаемых принадлежит алмазам (рис. 3).

На территории города расположено коренное месторождение алмазов – трубка «Удачная»; в 15 км от города – трубка «Зарница». [32]

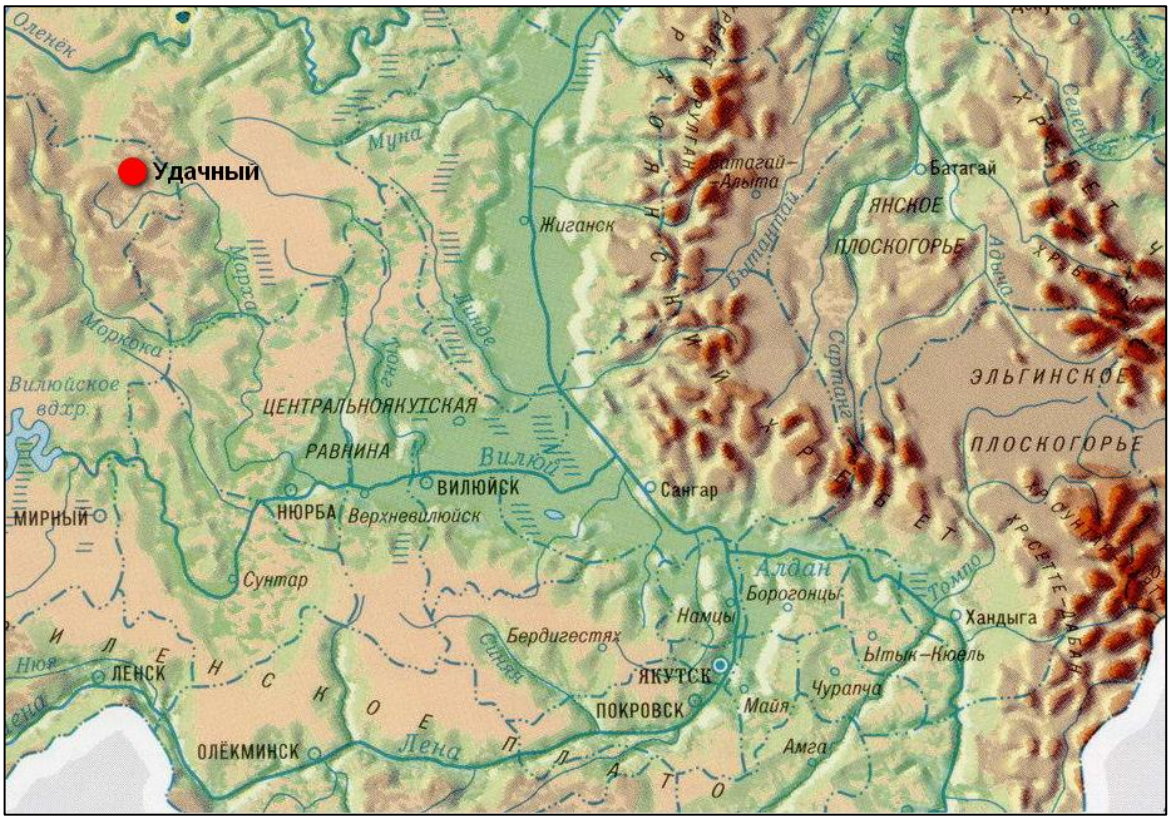


Рис. 2. Физико-географическое расположение исследуемой территории. [31]

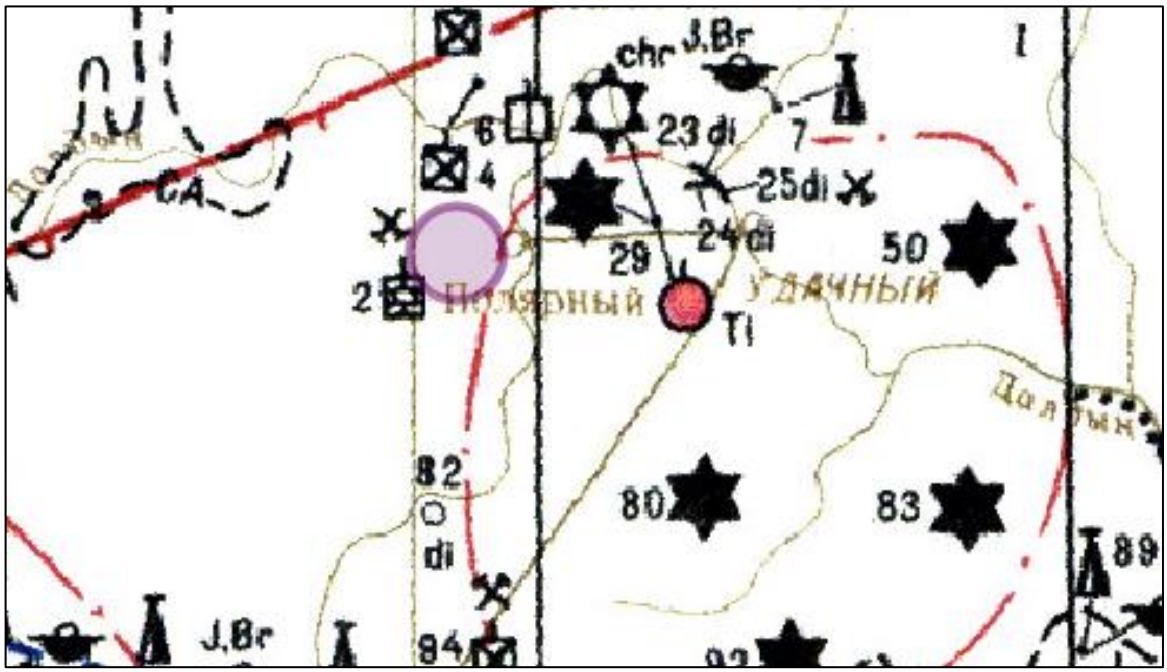


Рис. 3. Карта полезных ископаемых исследуемой территории. [35]

1.4. Гидрография и гидрология

Плато расчленено густой сетью глубоких речных долин, причем более половины площади приходится на склоны долин и междуречий. Наиболее крупными реками района являются Марха и ее левый приток Далдын. Глубина рек в среднем 1,5-2,0 м, в межень на перекатах она не превышает 0,2-0,5 м. Скорость течения Мархи – 0,9-1,1 м/с. Вследствие повсеместного развития вечномерзлых пород, подземный сток грунтовых вод практически отсутствует и питание рек находится в прямой зависимости от климатических факторов (от количества и режима выпадения осадков, от температуры воздуха и снеготаяния). Режим рек характеризуется большим непостоянством, резким подъемом и последующим быстрым спадом паводковых вод. Весенний паводок приходит в конце мая – первой половине июня, осенний в конце августа в период сильных дождей и максимальной глубины сезонного оттаивания. Реки замерзают в конце сентября.

Водотоки района относятся к рекам Восточно-Сибирского типа, который характеризуется хорошо выраженным весенне-летним половодьем, летне-осенней меженью, прерываемой дождевыми паводками и отсутствием стока в зимний период из-за полного промерзания.

По типу питания они относятся к рекам смешанного, преимущественно снегового питания. Основной средой водного режима является весеннее половодье, начало которого совпадает с началом интенсивного снеготаяния. Сток воды начинается в середине мая, после перехода среднесуточных температур через 0 ºС и в начальный период (2-3 дня) вода идет поверх льда из-за полного промерзания русел. С началом подъема уровней воды лед на глубоких плесах отрывался от дна и всплывал, на перекатных участках оттаивал на месте. Густой ледоход на р. Далдын отмечается 1-2 дня, общая продолжительность его не превышает 3-4 дня. Продолжительность весеннего подъема уровней непостоянна и зависит от метеорологических условий весеннего периода. В отдельных случаях она может достигать 10 дней. Продолжительность спада зависит от температуры и количества осадков, выпадающих в этот период, и колеблется для р. Далдын в пределах от 23 до 40 дней. В конце июня – начале июля наступает период межения, в течение которого норма стока составляет в среднем 27 %, изменяясь от степени водности за счет осадков в пределах от 9% для очень маловодного года, до 35% для многоводного. Верховья ручьев пересыхают полностью.

Осенью, после перехода температуры воздуха через 0 ºС, наблюдается резкое уменьшение уровней и расходов воды. Первые забереги на р. Далдын и притоках появляются в конце сентября – начале октября. Начало ледостава отмечено на 9-11 ноября.

Осенний ледоход, как правило, не наблюдается. Перемерзание перекатов на ручьях отмечено на 24 октября, на р. Далдын в конце ноября. На перекатах в течение длительного периода (до 1,5 месяца) сохраняются полыньи.

Водосбор рек и ручьев расположен в зоне распространения многолетней мерзлоты, изолирующей поверхностный сток от подземного. Вследствие слабого протаивания грунтов, грунтовые надмерзлотные воды имеют малую мощность и участвуют в питании водотоков в незначительной степени и небольшой период. Основным источником питания являются поверхностные воды.

Надмерзлотные грунтовые воды залегают на глубине от 2 м до 8 м, в зависимости от подошвы талика. Водоупором для них являются вечномерзлые грунты. Наибольшее обводнение грунтов приурочено к сентябрю, когда происходит наибольшая оттайка и наступает период со значительным количеством осадков.

Территория района приурочена к зоне распространения непрерывной толщи вечномерзлых грунтов с часто встречающимися таликовыми зонами техногенного характера. Толщина слоя вечномерзлых грунтов более 300 м.

Мощность сезонно-оттаивающего слоя зависит от характера грунта, степени залесенности и экспозиции поверхности. В естественных условиях, наиболее глубоко грунты оттаивают на гарях и на склонах южной экспозиции, где мощность слоя сезонного оттаивания достигает 3 м. Незначительные мощности деятельного слоя обусловили близкое залегание надмерзлотных вод к дневной поверхности. В период сильных дождей эти воды насыщают деятельный слой. Зимой надмерзлотные воды полностью перемерзают (Ефимов, Зайцев, 1970).

2. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ТЕРРИТОРИИ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Геологическое строение и свойства грунтов

В геологическом строении района принимают участие отложения нижнего палеозоя (кембрийской системы) и четвертичные образования. Инженерно-геологические разрезы территории представлены в приложениях 1-2.

Породы кембрия представлены чередованием известняков и мергелей. Известняки являются наиболее распространенными породами. Окрашены они обычно в серый, желтоватый, реже красно-бурый цвет.

Четвертичные отложения представлены элювиально-делювиальными образованиями.

Элювиально-делювиальные образования пользуются широким площадным распространением, покрывая сплошным чехлом все дочетвертичные породы.

Геологический разрез территории изучен до глубины 10,0-30,0 м. В возрастном отношении, это верхнекембрийские отложения ($Є_3$) – голоцен (Q_{IV}).

В геологическом строении территории до исследованной глубины 10,0-30,0 м принимают участие грунты следующих литологических комплексов:

- комплекс верхнекембрийских отложений ($Є_3$);
- комплекс элювиально-делювиальных отложений (edQ);
- современные техногенные отложения (tQ_{IV}).

Верхнекембрийские отложения, развиты повсеместно, представлены известняками и мергелями серо-зелеными и зеленовато-серыми. Залегают с глубин 0,3-4,7 м до глубин 10,0-30,0 м, вскрытая мощность 9,7-28,7 м. На участке изысканий отложения находятся в многолетнемерзлом состоянии.

Элювиально-делювиальные отложения в районе проведения изысканий встречены практически повсеместно. Залегают на верхнекембрийских отложениях. На исследованной территории элювиально-делювиальные отложения представлены крупнообломочными грунтами: суглинком темно-бурым с дресвой и щебнем, дресвяным грунтом серовато-зеленым с супесчаным заполнителем, а также щебенистым грунтом серо-зеленым с суглинистым заполнителем. Залегают с глубин 0,1-3,5 м до глубин 0,5-4,7 м, мощность отложений составляет 0,5 до 3,6 м. На участке изысканий отложения находятся в многолетнемерзлом и сезонно-мерзлом состояниях.

Современные техногенные отложения распространены на спланированных участках, представлены щебенистым грунтом бурого цвета с суглинистым заполнителем, в момент изысканий находились в сезонно-мерзлом состоянии. Залегают с поверхности на элювиально-делювиальных отложениях до глубин 0,3-3,5 м, мощность отложений составляет 0,3-3,5 м.

2.2. Основные инженерно-геологические типы пород

Ниже приведено описание грунтов каждого из выделенных инженерно-геологических элементов (ИГЭ) согласно ГОСТ 25100-2020 (сверху-вниз) [1], нормативные и расчетные характеристики физико-механических свойств мерзлых и скальных грунтов представлены в приложениях 3 и 4 соответственно:

Комплекс техногенных грунтов (tQ_{IV}):

ИГЭ 1. Насыпной грунт: Щебенистый грунт с суглинистым заполнителем (22.1%) твердомерзлый, слабольдистый, криотекстура массивная. В талом состоянии неоднородный, средней степени водонасыщения, незасоленный.

На участке изысканий техногенный грунт распространен локально – на спланированных площадках, патрульной автодороге. Залегает с поверхности элювиально-делювиальных отложениях до глубин 0,3-3,5 м, мощность отложений составляет 0,3-3,5 м.

Комплекс элювиально-делювиальных отложений (edQ):

ИГЭ 2. Суглинок твердомерзлый, слабольдистый, криотекстура слоистая. В талом состоянии легкий песчанистый, тугопластичный, среднепучинистый, незасоленный, с дресвой и гравием

Получил практически повсеместное распространение на участке изысканий. Залегает с поверхности под почвенно-растительным слоем и техногенными грунтами с глубины 0,0-3,2 м до глубин 0,9-4,7 м, мощность отложений составляет от 0,5 до 3,5 м.

ИГЭ 3. Дресвяный грунт с супесчаным заполнителем (13.8%), твердомерзлый, слабольдистый, криотекстура массивная. В талом состоянии неоднородный, малой степени водонасыщения, незасоленный.

Получил практически повсеместное распространение на участке изысканий. Залегает с поверхности под суглинком (ИГЭ 2), почвенно-растительным слоем и техногенными грунтами с глубины 0,1-1,9 м до глубин 1,4-3,9 м, мощность отложений составляет от 0,5 до 3,6 м.

ИГЭ 4. Щебенистый грунт с суглинистым заполнителем (20.8%) твердомерзлый, слабольдистый, криотекстура массивная. В талом состоянии неоднородный, малой степени водонасыщения, незасоленный.

Получил локальное распространение на участке изысканий. Залегает с поверхности под почвенно-растительным слоем, суглинком (ИГЭ 2) и дресвяным грунтом (ИГЭ-3) с глубины 0,1-1,8 м до глубин 1,5-3,6 м, мощность отложений составляет от 0,7 до 3,4 м.

Комплекс верхнекембрийских отложений (Є3):

ИГЭ 5. Известняк твердомерзлый, льдистый, средней прочности, плотный, непористый, неразмягчаемый, средневыветрелый.

Получил повсеместное распространение на участке изысканий. Залегает с глубины 0,3-27,1 м до глубин 3,0-30,0 м, мощность отложений составляет от 1,1 до 27,4 м.

ИГЭ 6. Мергель известковый, твердомерзлый, льдистый, низкой прочности, средней плотности, непористый, размягчаемый.

Получил повсеместное распространение на участке изысканий. Залегает с глубины 0,9-14,1 м до глубин 4,5-30,0 м, мощность отложений составляет от 0,9 до 27,4 м.

2.3. Инженерно-геокриологические условия

Распространение многолетнемерзлых грунтов на исследуемой территории определяется совместным влиянием зональных климатических и геолого-тектонических факторов, наряду с местными условиями теплообмена горных пород с атмосферой и поверхностными водами.

Исследуемая территория находится в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых грунтов, сливающегося типа.

Тип сезонного промерзания и оттаивания пород – длительно устойчивый.

Глубина сезонного колебания температур грунтов составляет 10 м.

При бурении инженерно-геологических скважин проводились замеры температуры грунтов на глубину до 10-15 м. В соответствии с (СП) 25.13330.2020, нормативные значения среднегодовой температуры многолетнемерзлых грунтов принимается равным температуре на глубине 10 м от поверхности [6]. Замеры температуры грунтов проводились в октябре 2019 года.

Температура грунтов на глубине 10 м (глубине нулевых годовых амплитд) в пределах территории исследования составляет от -0,1 ºС до -1,4 ºС.

Сезонно-талый (сезонно-мерзлый) слой (СТС, СМС) представляют собой верхний горизонт толщ мерзлый пород, подвергающихся сезонным преобразованием. Особенностью района является его расположение в тундровой зоне, обусловливающее большое разнообразие и дифференцированность поверхностных условий, что приводит к значительной изменчивости характеристик СТС (СМС).

Верхнекембрийские отложения (Є3) - представлены известняком и мергелем. Отложения классифицируются как льдистые (Ii≤0.01) по ГОСТ 25100-2020 [1].

В период проведения изысканий (октябрь 2019 года) рассматриваемые многолетнемерзлые грунты данного комплекса встречены в твердомерзлом состоянии.

Развиты повсеместно, залегают с глубин 0,3-4,7 м до глубин 10,0-30,0 м, вскрытая мощность 9,7-28,7 м.

Элювиально-делювиальные отложения (edQ) - представлены суглинком с дресвой и щебнем, дресвяным грунтом с супесчаным заполнителем, а также щебенистым грунтом с суглинистым заполнителем. Отложения классифицируются как слабольдистые (Ii≤0.20) по ГОСТ 25100-2020 [1]. Криогенная текстура суглинков – слоистая, дресвяных и щебенистых грунтов - массивная.

В период проведения изысканий (октябрь 2019 года) рассматриваемые сезонно-мерзлые и многолетнемерзлые грунты данного комплекса встречены в твердомерзлом состоянии.

Встречены повсеместно. Залегают на верхнекембрийских отложениях, с поверхности под почвенно-растительным слоем и техногенными грунтами с глубин 0,1-3,5 м до глубин 0,5-4,7 м, мощность отложений составляет 0,5 до 3,6 м.

Голоценовые техногенные отложения (t Q_{IV}) - представлены щебенистым грунтом с суглинистым заполнителем. Отложения классифицируются как слабольдистые (Ii≤0.20) по ГОСТ 25100-2020 [1]. Криогенная текстура – массивная.

В период проведения изысканий (октябрь 2019 года) рассматриваемые сезонно-мерзлые грунты данного комплекса встречены в твердомерзлом состоянии.

Распространены на спланированных участках, залегают с поверхности на элювиально-делювиальных отложениях до глубин 0,3-3,5 м, мощность отложений составляет 0,3-3,5 м.

Многолетнемерзлые грунты относятся к группе специфических грунтов. В естественных условиях они обладают высокими прочностными свойствами. Их механические характеристики соизмеримы с соответствующими показателями полускальных грунтов. При сохранении мерзлоты эти грунты будут являться надежным основанием сооружений. Однако изменение условий залегания грунтов, деградация и

нарушение температурного режима многолетнемерзлых грунтов, приводят к ухудшению их прочностных свойств.

2.4. Гидрогеологические условия

В период проведения инженерно-геологических изысканий (октябрь 2019) подземные воды не были вскрыты.

Для района исследований характерно кратковременное развитие надмерзлотных вод приуроченных к сезонно-талому слою, которые на момент проведения изысканий отсутствовали. Данный водоносный горизонт претерпевает ежегодные фазовые переходы. Воды залегают обычно в зоне свободного водообмена. Водовмещающими являются насыпные грунты, залегающие с поверхности, а водоупором служат подстилающие их глинистые грунты.

Прогнозируемый максимальные уровень надмерзлотных вод приходится на период максимального оттаивания сезонно-мерзлого слоя и в летне-осенние месяцы составляет 0,0-0,1 м. Продолжительность существования данного горизонта подземных вод 3-4 месяца в течение теплого времени года. Уровень надмерзлотных вод характеризуется непостоянством и зависит от климатического фактора.

По данным фондовых источников по химическому составу подземные воды сульфатно-гидрокарбонатные, натриево-кальциевые, кальциево-магниевые и магниево-кальциевые. Минерализация варьируется от 0,6 до 1,0 мг/л, т.е. воды на исследуемой территории являются пресными. Согласно СП 28.13330.2017, воды неагрессивные по отношению к бетонам всех марок; по содержанию сульфатов – воды неагрессивны к бетону на портландцементе марок W10-W14 и W16-W20; агрессивное воздействие жидких сульфатных сред, содержащих бикарбонаты, к бетону на портландцементе марок W4-W8 отсутствует; к арматуре железобетонных конструкций – неагрессивные при постоянном погружении и периодическом смачивании. Степень агрессивности воды к металлическим конструкциям при свободном доступе кислорода – средняя. [7]

2.5. Специфические грунты

К специфическим грунтам на участке изысканий в соответствии со СП 47.13330.2016 и СП 11-105-97 (часть III) отнесены многолетнемерзлые грунты ИГЭ 3, 4, а также техногенные грунты ИГЭ-1. [3, 8]

Многолетнемерзлые грунты распространены на территории изысканий повсеместно.

Представлены они дресвяным грунтом с супесчаным заполнителем (ИГЭ 3), щебенистым грунтом с суглинистым заполнителем (ИГЭ 4). Грунты находятся в твердомерзлом состоянии.

По показателю льдистости за счет видимых ледяных включений грунты представленные в инженерно-геологических элементах №3 и №4 являются крупнообломочными слабольдистыми.

Криогенная текстура многолетнемёрзлых грунтов – массивная.

Температура грунта на глубине 10,0 м (глубине нулевых годовых амплитуд) в пределах исследуемых объектов варьирует от минус 0.1°С до минус 1.4 °С на период изысканий (октябрь 2019 года). В процессе строительства и эксплуатации при оттаивании мёрзлых грунтов могут происходить неравномерные осадки грунта. По этой причине необходимо исключить теплопередачу на грунты в ходе строительства и эксплуатации проектируемых сооружений.

К специфическим грунтам на территории проведения изысканий также относится ИГЭ 1 - насыпной грунт: щебенистый грунт с суглинистым заполнителем (22.1%) твердомерзлый, слабольдистый. В талом состоянии неоднородный, средней степени водонасыщения, незасоленный.

Распространен на спланированных участках и залегает с поверхности на элювиально-делювиальных отложениях до глубин 0,3-3,5 м, мощность отложений составляет 0,3-3,5 м.

Согласно СП 11-105-97, часть III, таблице 9.1 – ориентировочное время самоуплотнения насыпных грунтов (ИГЭ 1) при планомерном возведении насыпи 0,5 – 2 года. [3]

2.6. Геологические и инженерно-геологические процессы

Эндогенные процессы. На существующей нормативной «Карте сейсмического районирования Республики Саха (Якутия)» Мирнинский район относится к 5-бальной зоне сейсмического воздействия [14]. Согласно СП 14.13330.2018, площадка по сейсмической интенсивности не опасна для массового строительства, а также строительства объектов повышенной ответственности [4].

Экзогенные процессы. На момент проведения инженерно-геологических изысканий (октябрь 2019 года.) на территории исследования более широкое развитие получили экзогенные процессы. Они представлены сезонными процессами промерзания грунтов, процессами морозного пучения грунтов, сезонным подтоплением, а также техногенными процессами.

Процессы сезонного промерзания пород развиты повсеместно. Нормативная глубина сезонного промерзания грунтов (на открытой, оголенной от снежного покрова поверхности), рассчитанная согласно СП 25.13330.2020, приведена в таблице 5.2 [6].

Для района проведения изысканий характерно развитие процессов морозного пучения грунтов, расположенных в зоне сезонного промерзания и оттаивания.

Сезонное пучение связано с обогащенностью связных грунтов гидрофобными минералами, что является основной причиной пучинистости. Фактором, провоцирующим проявление пучения, является промораживание замоченных перед промерзанием грунтов.

По относительной деформации пучения грунты на участке проектируемых сооружений – среднепучинистые.

Таким образом, согласно таблице 5.1 СП 115.13330.2016, на территории изысканий, категория опасности по процессу сезонного пучения – «опасная» [10].

Действенными мероприятиями, направленными на нейтрализацию и недопущение процессов пучения являются:

– выполнение строительных работ в зимнее время года (желательно в конце зимы) с целью исключения замачивания и растепления грунтов естественного основания;

– подготовка грунтов естественного основания фундаментов путем отсыпки песчано-гравийной смеси с послойным уплотнением мощностью не менее 0,5 м.

На исследуемом участке с поверхности получили распространение мерзлые грунты, процесс подтопления носит преимущественно сезонный характер и развит в теплый период года. Этому процессу благоприятствует быстрота протекания процессов снеготаянья, при относительной близости водоупора (сезонно-мерзлых грунтов), а также

приуроченность района к зоне избыточного увлажнения при малой испаряемости, слабая в целом расчлененность междуречных пространств, ограниченность инфильтрации поверхностных вод в области практически сплошного распространения многолетнемерзлых пород и покровных отложений преимущественно суглинистого и песчаного состава. Мощность СТС изменяется в пределах от 0,5м до 4,7 м. Продолжительность существования данного горизонта подземных вод, составляет примерно 3 – 4 месяца в течение теплого времени года.

В теплый период года (в периоды положительных температур воздуха и активного снеготаянья) практически на всей территории изысканий произойдет активизация процессов подтопления в грунтах деятельного слоя. Прогнозируемый максимальный уровень подземных вод приходится на период максимального оттаивания сезонно-мерзлого слоя, когда образуется горизонт надмерзлотных вод, а уровень подземных вод отложений поднимается. В данный период уровень подземных вод в пределах проектируемых объектов может достигать 0,0 – 3,7 м.

В ходе проектирования необходимо учесть наличие данного процесса и предусмотреть мероприятия по водоотведению с территории в теплый период года и недопущение негативного влияния высокого уровня грунтовых вод на проектируемые сооружения в соответствии с п. 10 СП 116.13330.2012 [11].

Согласно таблице 5.1 СП 115.13330.2016 данный процесс, на территории исследований, относится к «весьма опасной» категории [10].

В соответствии с п. 5.1.2 СП 11-105-97 часть II к районам развития карста следует относить территории, в пределах которых распространены водорастворимые горные породы и имеют место или возможны поверхностные и подземные проявления карста. На момент проведения инженерных изысканий на территории проектируемых зданий и сооружений видимых проявлений данного процесса не наблюдалось, с учетом того что верхнекембрийские отложения залегают ниже глубины сезонного-промерзания оттаивания и вышезалегающие глинистые грунты служат водоупором сезонных надмерзлотных вод, данный процесс на изучаемой территории не развивается. На основании этого и в соответствии с табл. 5.1 СП 11-105-97 часть II категория устойчивости территории относительно интенсивности образования карстовых провалов – VI (провалообразование исключается). [3]

Согласно таблице 5.1 СП 115.13330.2016 данный процесс, на территории исследований, относится к категории – «умеренно опасные» [10].

Одним из распространенных криогенных физико-геологических процессов на территории исследований (и в целом на всей территории Республики Саха (Якутия)) является термокарст. С его развитием связаны значительные трудности при освоении территории с ММГ.

Условие образования термокарста – начинает образовываться в том случае, если происходит таяние льда или оттаивание льдистого грунта, находящихся до этого в многолетнемерзлом состоянии. В настоящее время принята следующая форма условия возникновения термокарста:

$$h_{от} > h_{л}, \quad (1)$$

где $h_{от}$ – глубина оттаивания;

$h_{л}$ – глубина залегания верхней поверхности льда или льдистого грунта.

Исходя из данных полученных в главе 2.4 (водовмещающими являются насыпные грунты, залегающие с поверхности (ИГЭ-1), а водоупором служат подстилающие их глинистые грунты (ИГЭ-2)) и главе 3.2 (нормативная глубина сезонного оттаивания ИГЭ-1 составляет 3,22 м) территория исследований подвержена образованию термокарста, что требует специальных защитных мероприятий. К числу таких мероприятий в соответствии с СП 116.13330.2012 можно отнести: сохранение растительных покровов, отсыпка территории слоем песчаного или гравийно-песчаного грунта, укладка на поверхности теплоизоляционных покрытий, устройство охлаждающих систем из труб вертикального и горизонтального заложения, создание вентилируемых подполий при строительстве сооружений со значительным тепловыделением. [11]

Техногенное воздействие на рассматриваемую территорию постоянно возрастает. Процессы, связанные с будущим строительством, приводят к увеличению мощности сезонного промерзания грунтовых массивов, образованию переувлажненных участков, образованию специфических грунтов – техногенных, нарушение естественного стока атмосферных осадков и их инфильтрации. В результате отсыпки площадок, особенно на склонах, нарушается естественный дренаж поверхностных и надмерзлотных вод, образуются талики, участки застоя поверхностных вод, и, как правило, заболачивание, развитие эрозии.

Среди антропогенных факторов развития эрозии выделяют:

– нарушение растительного покрова;

– перераспределение снегонакопления вдоль линейных сооружений, приводящее к увеличению и перераспределению поверхностного стока;

– тепловое воздействие сооружений и соответственное увеличение мощности сезонно-талого слоя.

В процессе проектирования и строительства необходимо учитывать возможность возникновения данных процессов и предусмотреть возможные защитные мероприятия.

Подводя итог вышеперечисленным сведениям, было отмечено, что согласно таблице 5.1 СП 115.13330.2016 категория опасности природных геологических процессов в пределах изученного района следующая [10]:

- землетрясения по интенсивности – умеренно опасная категория;
- пучение (сезонное) – опасная категория;
- подтопление территории – весьма опасная категория.

3. ОТЕПЛЯЮЩЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ПРОЕКТИРУЕМЫХ СООРУЖЕНИЙ

3.1. Расчет изменения среднегодовой температуры грунтов и глубины сезонного оттаивания грунтов в зависимости от мощности снежного и напочвенного растительного покровов

На исследуемой территории планируются следующие воздействия на среду: подсыпка и выемка грунта, срезка почвенно-растительного слоя, эпизодическое или систематическое удаление снежного покрова. Эти процессы в значительной степени определяют условия теплообмена грунтов с внешней средой и их нарушение сопровождается изменением основных геокриологических характеристик – среднегодовой температуры пород и мощности слоя сезонного оттаивания (промерзания), а в определенных условиях может приводить и к смене физического состояния (талое – мерзлое) пород.

Прогнозный расчет осуществляется для следующих наиболее распространенных видов дисперсных грунтов на исследуемой территории: супеси, суглинки. Скальные, полускальные и крупнообломочные грунты не учитываются в данном расчете в виду их высоких прочностных характеристик.

Теплофизические свойства пород, необходимые для выполнения расчетов, были получены на основе проведенных лабораторных исследований. Грунты являются преимущественно слабольдистыми. Засоленность грунтов составляет 0,1-0,2 Dsal,% и может считаться незначительной (Хрусталев, 2019).

Снежный покров является одним из самых мощных температурообразующих факторов при формировании среднегодовой температуры пород. Этому способствует его высокая теплоизоляционная способность и сезонность существования (только в холодный период года). Максимальная за зимний период мощность снежного покрова ($h_{сн}$) на открытых участках исследуемой территории составляет 0,3 м при среднезимней плотности $\rho_{сн}$=0,26 г/см^3.

Для определения коэффициента теплопроводности снега по его плотности используется формула Б.В. Проскурякова:

$$\lambda_{сн} = 0{,}021+1{,}009*\rho_{сн}\ , \qquad (2)$$

где $\lambda_{сн}$ – коэффициент теплопроводности снега (Вт/м*К), $\rho_{сн}$ – плотность снега (г/см^3). По полученным расчетам, коэффициент теплопроводности снега равен $\lambda_{сн}$ = 0,283 Вт/м*К (Осокин и др., 2017).

Снег также является «непромерзающим» покровом и учитывается как слой изоляции. Теплозащитные свойства определяются его термическим сопротивлением по формуле:

$$R_{сн} = h_{сн} / \lambda_{сн} , \quad (3)$$

где $h_{сн}$ – толщина снежного покрова, $\lambda_{сн}$ – коэффициент эффективной теплопроводности снега.

Таким образом, исходя из формулы (3), максимальное термическое сопротивление снежного покрова на открытых участках территории при максимальной мощности снега за зимний период $h_{сн} = 0,3$ м составит $R_{сн} = 1,06$ (м^2*К)/Вт.

Напочвенные растительные покровы. Видовое разнообразие биогенных напочвенных образований на рассматриваемой территории весьма велико. Сюда входят травяные, осоковые, моховые и лишайниковые покровы в различных сложных сочетаниях друг с другом. Мощность этих покровов не превышает 0,1-0,2 м. Однако, биогенные теплоизоляционные покровы, даже при столь незначительной мощности, оказывают заметное воздействие на геокриологическую обстановку.

В теплофизическом плане напочвенные покровы являются сухими (непромерзающими) и рассматривается как слой теплоизоляции, термическое сопротивление которого рассчитывается по формуле:

$$R_{п} = h_{п} / \lambda_{п} , \quad (4)$$

где $h_{п}$ – толщина растительного покрова, $\lambda_{сн}$ – коэффициент эффективной теплопроводности.

Данных о теплопроводности напочвенных покровов нет, однако, имея в виду довольно плотное строение развитых покровов на исследуемом участке и ориентируясь на оценки для сходных районов, средняя теплопроводность растительного покрова принята равной $\lambda_{п} = 0,35$ Вт/м*К и ее значение считается неизменным на протяжении всего года. Тогда, исходя из формулы (4), термическое сопротивление растительного покрова на исследуемой территории равно $R_{п} = 0,43$ (м^2*К)/Вт.

Для прогнозирования техногенных воздействий на геокриологические параметры осуществлялось решение серии одномерных тепловых задач в спектре изменения теплоизоляционных характеристик поверхностных покровов при сохранении неизменными всех остальных параметров (Хрусталев, 2021).

Расчетная область имела вертикальные размеры 40-50 м, т.е. примерно вдвое превосходящие глубину проникновения годовых температурных колебаний, что практически исключало влияние нижней границы. На нижней и боковых границах задавалось условие полной теплоизоляции, на верхней границе – граничные условия III

рода, учитывающие среднемесячные величины температуры поверхности и коэффициента теплообмена пород с атмосферой. Температуры дневной поверхности задавались в соответствии с таблицей 1.

По полученным значениям термических сопротивлений снежного и растительного покровов находится коэффициент теплоотдачи на поверхности пород по формуле:

$$\alpha = \frac{1}{Rсн + Rп}, \quad (5)$$

Для задания иных характеристик снежного покрова вначале принимается новое значение максимальной высоты снежного покрова и производится новый расчет высоты снега и его термического сопротивления для всех зимних месяцев. Далее эти термические сопротивления суммируются с выбранными для очередного расчета значениями термического сопротивления растительного покрова и по зависимости (5) находятся коэффициенты теплообмена α.

В ходе математического моделирования теплоизоляционные характеристики поверхностны покровов задавались в достаточно широком спектре их изменения, охватывающем природное разнообразие этих характеристик. Расчет каждой задачи осуществлялся на ПЭВМ с использованием программы «Тепло» и продолжался до практической стабилизации температурного поля в новых условиях. В результате для различных грунтовых условий построены графики, позволяющие как оценивать геокриологические характеристики (среднегодовую температуру ММП и глубины сезонного оттаивания) в естественных условиях, так и прогнозировать воздействие тех или иных техногенных нарушений поверхностных покровов на геокриологическую обстановку (рис. 4-7). На графиках отражены изменения среднегодовой температуры пород и глубины их сезонного оттаивания в зависимости от величины максимальной высоты снежного покрова $h_{сн}$ и мощности напочвенного растительного покрова $h_{п}$.

На графиках толстая красная линия соответствует смене фазового состояния пород – т.е. их перехода из мерзлого состояния в талое. На графике для среднегодовых температур – это линия нулевой среднегодовой температуры (рис 4,6). На графике для глубины слоя сезонного оттаивания пород – это линия максимально возможных глубин сезонного оттаивания при нулевой среднегодовой температуре пород; за это линией сезонное оттаивание сменяется сезонным промерзанием талых пород (рис 5,7).

Полученные графики позволяют сразу определить критические параметры снежного и растительного покровов, приводящие к переходу температуры пород в область положительных значений и началу деградации ММП. Однако, это будет справедливо только для больших по площади участков техногенных изменений, так, узкая канава,

засыпанная снегом даже мощностью 2-3 метра, не сможет привести к образованию талика в силу охлаждающего влияния окружающих низкотемпературных ММП.

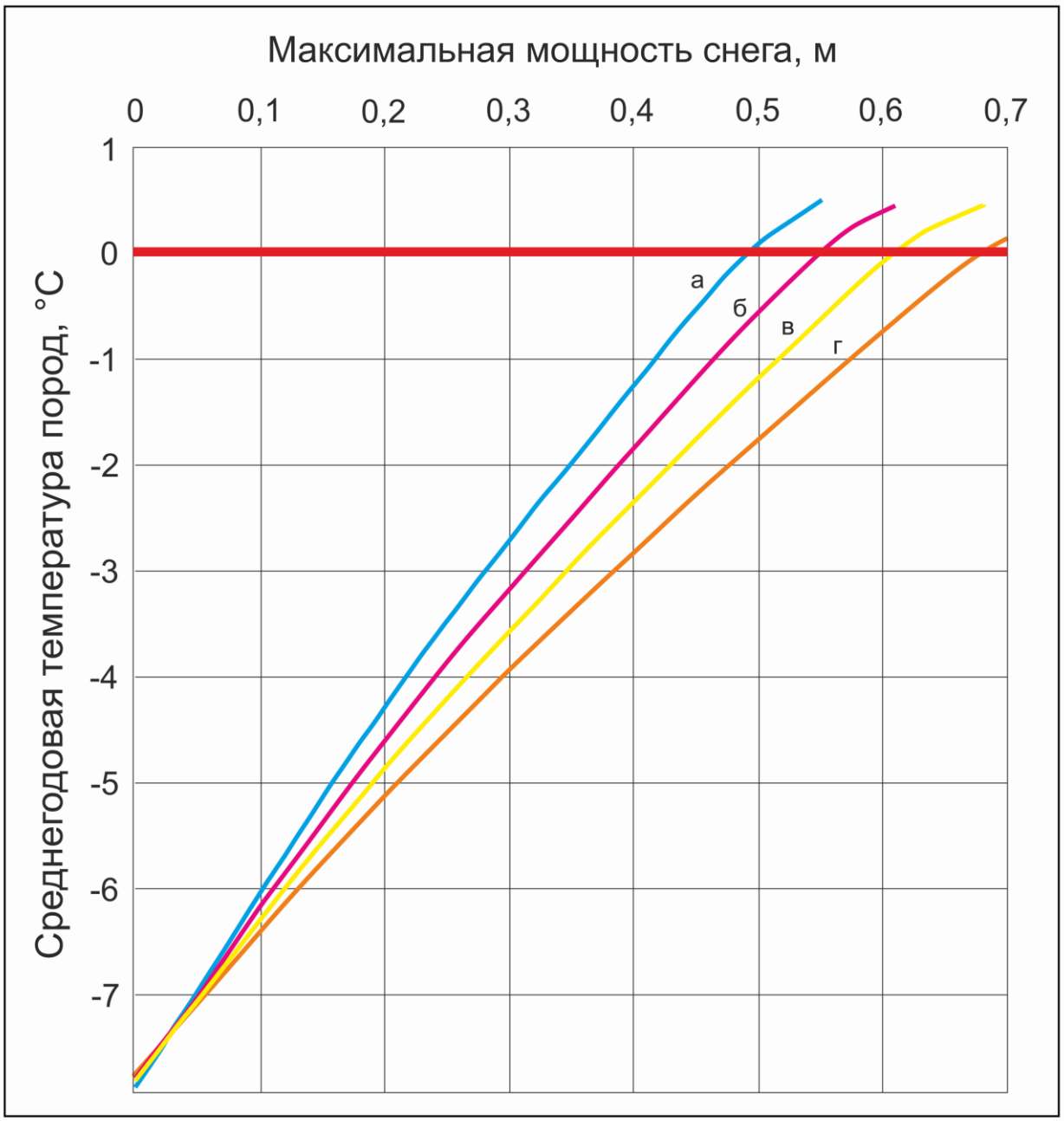


Рис. 4. Среднегодовая температура супесей при различных характеристиках снежного и растительного покровов. Цвет кривых соответствует различным мощностям растительного покрова (а – 0 м, б – 0,035 м, в – 0,07 м, г – 0,105 м).

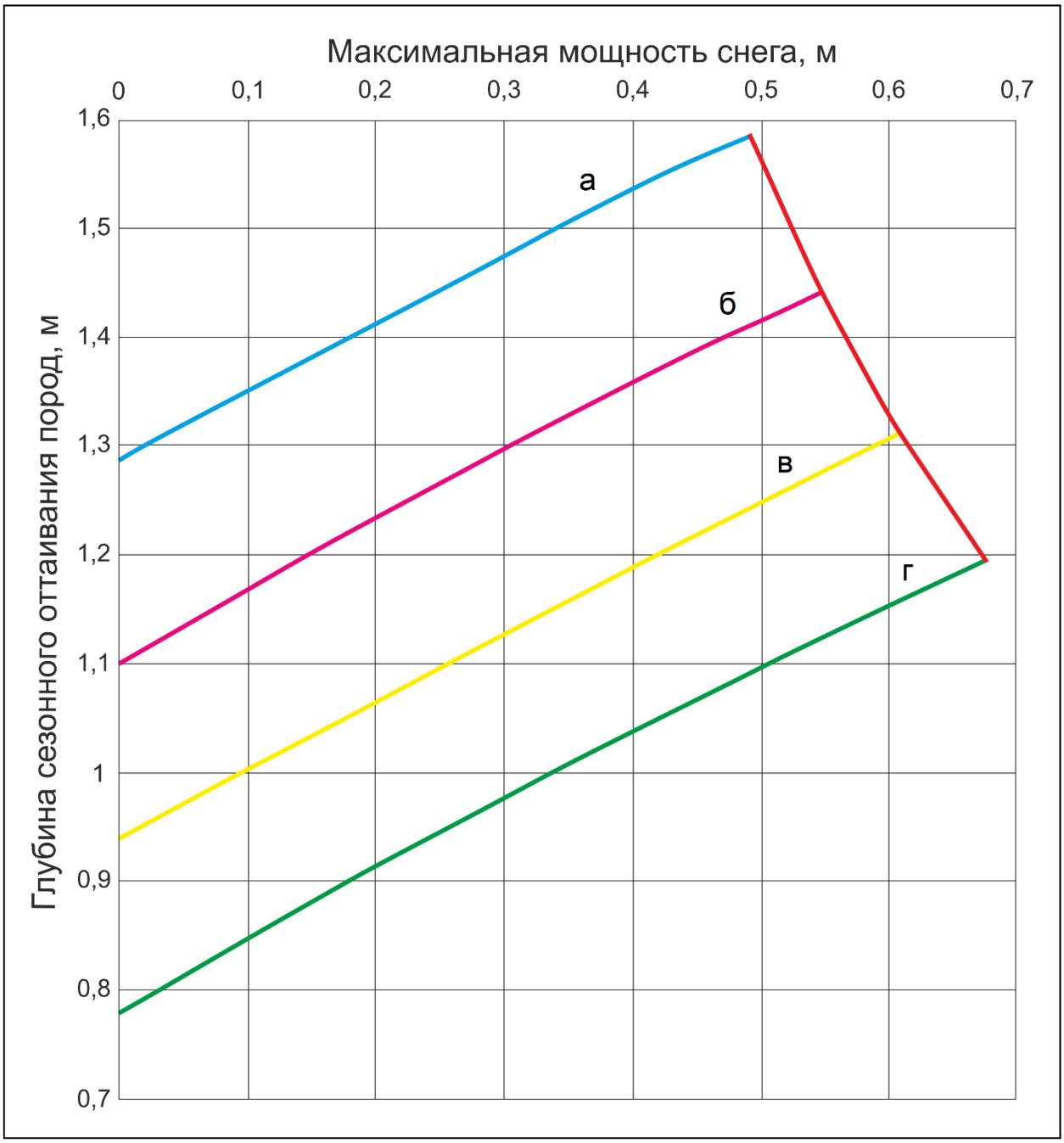


Рис. 5. Глубина сезонного оттаивания супесей при различных характеристиках снежного и растительного покровов. Цвет кривых соответствует различным мощностям растительного покрова (а – 0 м, б – 0,035 м, в – 0,07 м, г – 0,105 м).

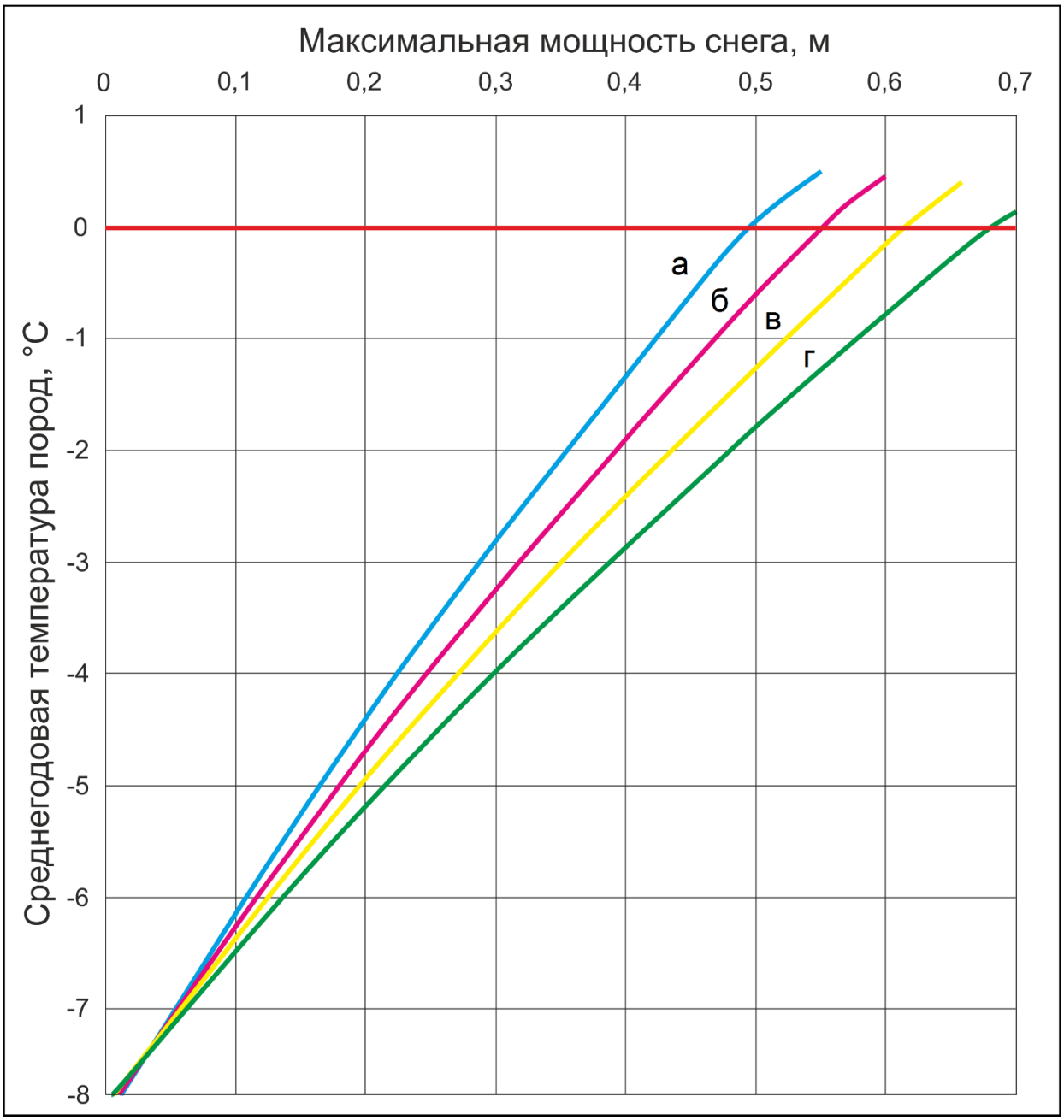


Рис. 6. Среднегодовая температура суглинков при различных характеристиках снежного и растительного покровов. Цвет кривых соответствует различным мощностям растительного покрова (а – 0 м, б – 0,035 м, в – 0,07 м, г – 0,105 м).

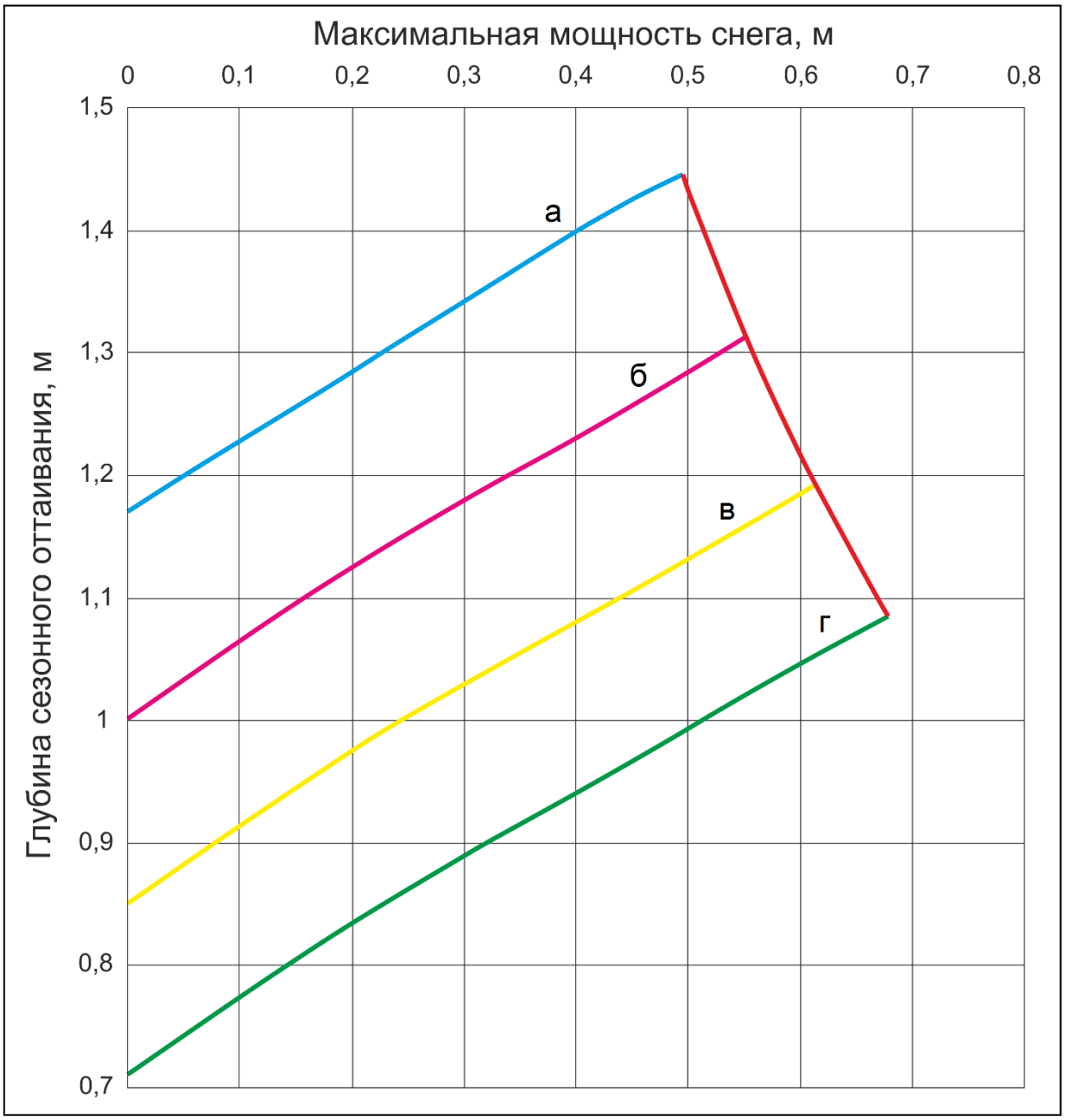


Рис. 7. Глубина сезонного оттаивания суглинков при различных характеристиках снежного и растительного покровов. Цвет кривых соответствует различным мощностям растительного покрова (а – 0 м, б – 0,035 м, в – 0,07 м, г – 0,105 м).

В результате выполненного исследования составлены графики, отражающие возможные изменения инженерно-геокриологической обстановки под влиянием изменения условий теплообмена пород с внешней средой вследствие различных нарушений напочвенных покровов – снежного и растительного. Следствием указанных изменений будет являться возникновение или активизация одних видов опасных экзогенно-геологических процессов и явлений и видоизменение или затухание других.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что максимальное влияние на изменения температурного режима пород оказывает нарушение (уплотнение или удаление) снежного покрова. Эти нарушения приводят к понижению среднегодовых температур на 4-6 ºС. Для исследуемой территории, где преимущественно развиты сплошные относительно низкотемпературные ММП, такое ужесточение мерзлотной обстановки в целом не представляет опасности. Напротив, из основных опасных процессов пучение затухает, лишь активизируется процесс морозобойного растрескивания.

Хуже обстоит дело, если в результате техногенных нарушений создаются условия для повышенного снегонакопления – это могут быть выемки, высокие насыпи, длинные корпуса и т.д., где в результате ветрового перераспределения могут накапливаться мощные снега, приводящие к переходу ММП в талое состояние, в случае уничтожения растительного напочвенного покрова составляют для исследуемых участков всего 0,4-0,65 м, что лишь ненамного превышает фоновые значения естественного снегонакопления.

Растительный покров, несмотря на незначительную его мощность, заметно влияет на температурный режим пород и его уничтожение даже может стать причиной начала деградации ММП. При этом не менее существенным является то, что одновременно существенно увеличивается глубина сезонного пучения, рост скорости солифлюкционного смещения грунта.

С уничтожением растительного покрова также связано возникновение таких опасных процессов, как термоэрозия и дефляция. Эти процессы не связаны напрямую с изменением условий теплообмена на поверхности пород, а являются следствием ликвидации механической укрепляющей роли корневой системы растительного покрова.

Таким образом, исходя из полученных результатов, можно дать основную рекомендацию о необходимости сохранения целостности напочвенного растительного покрова, уничтожение которого в рассматриваемых природных условиях является существенно более опасным, чем нарушения снежного покрова.

3.2. Расчет нормативной глубины сезонного оттаивания и промерзания грунтов

Сезонное оттаивание представляет собой оттаивание мерзлых грунтов, имеющих среднюю годовую температуру ниже 0 ºС. Слой сезонного оттаивания подстилается многолетнемерзлыми грунтами и образуется за счет теплообмена при положительных температурах (Николаева, Усов, 2013).

При проектировании фундаментов различают нормативные и расчетные глубины сезонного оттаивания и промерзания. Нормативная глубины сезонного оттаивания определяется как наибольшая его глубина, наблюдаемая за срок не менее 10 лет на участках, где слой сезонно-промерзающего (-оттаивающего) грунта сливается с ММП; при этом опытная площадка должна быть без растительного и торфяного покрова и очищаться весной от снега. Следует учитывать, что нормативная глубина сезонного оттаивания и промерзания отличается от тех же глубин в естественных условиях, где на них действует ряд дополнительных факторов – снежный и растительный покров, инфильтрация атмосферных осадков, радиационная составляющая и т.п. Нормативные глубины учитывающие условия строительной площадки, обычно оказываются выше. (Усов, 2013)

В связи с отсутствием организации режимных наблюдений во время изысканий многолетних данных, нормативные глубины сезонного оттаивания рассчитываются в соответствии с п. Г.3, прил. Г, СП 25.13330.2020 [6].

Исходя из вышесказанного, расчет нормативной глубины сезонного оттаивания грунта $d_{th,n}$, м, определяется по формуле:

$$d_{th,n} = \sqrt{\frac{2\lambda_{th}(T_{th.c} - T_{bf})t_{th,c}}{q_1} + \left(\frac{Q}{2q_1}\right)^2} - \frac{Q}{2q_1}, \quad (6)$$

где Q – теплопоток в мерзлые породы (тепло, расходуемое на летний обогрев ММП), ккал/м^2, определяемый по формуле:

$$Q = \left(0{,}25 - \frac{t_{th,c}}{t_1}\right)(T_0 - T_{bf})k_m\sqrt{\lambda_f C_f t_{th,c}}; \quad (7)$$

q_1 – количество открытой теплоты, поглощаемой при плавлении льда, содержащегося в породе, ккал/м^3, определяемой по формуле:

$$q_1 = L_v + \left(\frac{t_{th,c}}{t_2} - 0{,}1\right)\left[C_{th}\left(T_{th,c} - T_{bf}\right) - C_f(T_0 - T_{bf})\right]; \quad (8)$$

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

$$t_{th,c} = 1{,}15 \cdot t_{th,m} + 0{,}1 \cdot t_1\,; \quad (9)$$

t_1 – время, принимаемое равным 3600 ч; t_2 – время, принимаемое равным 7500 ч; $t_{th,m}$ – средняя продолжительность периода положительных температур, ч, принимаемая по СП 131.13330.2020 [12]; $T_{th,c}$ – расчетная температура поверхности грунта в летний период, °С, определяемая по формуле:

$$T_{th,c} = 1{,}4T_{th,m} + 2{,}4\ ; \quad (10)$$

$T_{th,m}$ – средняя по многолетним данным температура воздуха за период положительных температур, °С, принимаемая по СП 131.13330.2020 [13]; T_0 – расчетная среднегодовая температура ММП, °С; C_f и C_{th} – объемная теплоемкость мерзлого и талого грунта соответственно, Дж/(м^3·°С) [ккал/(м^3·°С)]; λ_f и λ_{th} – теплопроводность, соответственно, мерзлого и талого грунта, Вт/(м·°С) [ккал/(м·ч·°С)]; k_m – коэффициент, принимаемый для песчаных грунтов равным 1,0, а для глинистых – по табл. Г.1, прил. Г, СП 25.13330.2020 в зависимости от значения теплоемкости C_f и средней температуры грунта $\bar{T}$, °С, определяемой по формуле (11) [6];

$$\overline{T} = (T_0 - T_{bf})\left(\frac{t_{th,c}}{t_1} - 0{,}22\right), \quad (11)$$

L_v – теплота таяния (замерзания) грунта, Дж/м^3, определяемая по формуле:

$$L_v = L_0(w_{tot}\text{-}w_w)\rho_d\ , \quad (12)$$

где L_0 – удельная теплота плавления (замерзания), равна 80 ккал/кг, или $3{,}35\cdot10^5$ Дж/кг, или 93 Вт·ч/кг; w_{tot} – суммарная влажность ММП, д.е.; w_w – влажность за счет незамерзшей воды, д.е.; ρ_d – плотность скелета грунта, г/см^3.

Переход от одной размерности к другой при выборе теплофизических параметров осуществляется с учетом, что 1 кал = 4,19 Дж, а 1 Вт = 1 Дж/с = 3600 Дж/ч = 0,859 ккал/ч.

В соответствии с вышесказанным были рассчитаны нормативные глубины сезонного оттаивания грунтов по каждому выделенному ИГЭ в мерзлом состоянии, для открытой, оголенной от снежного покрова поверхности, приведенные в таблице 7.

Данные вычисления справедливы для случаев, когда планируется расчистка территории от снега и напочвенного растительного покрова, а также удаление несоответствующих требованиям строительства инженерно-геологических элементов.

В случае, если вышеописанные нарушения не планируются, необходимо проведение расчета глубины сезонного оттаивания в естественных условиях.

Таблица 7.

Нормативные глубины сезонного оттаивания грунтов.

Наименование слоя	Температура грунта, °С	Температура начала замерзания грунта, °С	Коэффициент теплопроводности в мерзлом состоянии, Вт/м·°С	Коэффициент теплопроводности в талом состоянии, Вт/м·°С	Объемная теплоемкость в мерзлом состоянии, Дж/(м^3·	Объемная теплоемкость в талом состоянии, Дж/(м^3·°С)10^6	Суммарная влажность, д.е.	Влажность за счет незамерзшей воды, д.е.	Плотность скелета грунта, г/см^3	**Нормативная глубина сезонного оттаивания, м**
	T_0	T_{bf}	λ_f	λ_{th}	C_f	C_{th}	W_{tot}	W_w	ρ_d	**$d_{th,n}$**
ИГЭ-1	-0,30	-0,20	1,99	1,39	2,28	2,78	0,12	0,01	1,18	**3,22**
ИГЭ-2	-1,00	-0,21	2,04	1,43	2,17	3,01	0,29	0,18	1,45	**2,63**
ИГЭ-3	-0,30	-0,20	2,34	1,74	2,25	2,67	0,07	0,01	1,92	**3,25**
ИГЭ-4	-0,30	-0,20	1,89	1,29	2,26	2,67	0,07	0,01	1,96	**3,21**
ИГЭ-5	-0,80	-0,02	1,75	1,15	1,70	2,09	0,09	0,01	2,11	**3,65**
ИГЭ-6	-0,80	-0,02	2,52	1,93	2,69	3,08	0,11	0,01	1,83	**3,87**

Расчет ведется по методике В.А. Кудрявцева для ИГЭ-1 (насыпной грунт: щебенистый грунт с суглинистым заполнителем (22.1%) твердомерзлый, слабольдистый, криотекстура массивная) в связи с тем, что данный инженерно-геологический элемент развит повсеместно, а его удаление приведет к нарушению естественных условий, что делает данный расчет бессмысленным для всех инженерно-геологических элементов, кроме первого. (Кудрявцев, 1974)

Отепляющее воздействие снега на породу рассчитывается по формуле:

$$\Delta t_{сн} = \Delta A_{сн} = \frac{A_в}{2}\left(1 - e^{-z\sqrt{\frac{\pi}{KT}}}\right), \quad (13)$$

где $A_в$ – метеорологическая амплитуда годовых колебаний температуры воздуха, °С; T – период колебания температур равный 8760 ч; z – мощность снежного покрова, м; К – коэффициент температуропроводности снежного покрова.

Так как отепляющее воздействие снежного покрова ограничивается зимним временем, можно принять, что $\Delta t_{сн} = \Delta A_{сн}$.

Абсолютные значения величины воздействия напочвенного растительного покрова ($h_п$=0,1) на температуру ($\Delta t_{раст}$) и амплитуду годовых колебаний ($\Delta A_{раст}$) составляют 0,4 и 2,1 соответственно.

Значения среднегодовой температуры (t_0) и амплитуды колебаний (A_0) температур на поверхности вычисляются по формулам:

$$t_0 = t_в + \Delta t_{сн} - \Delta t_{раст}\,, \tag{14}$$

$$A_0 = \frac{A_в}{2} - \Delta A_{сн} - \Delta A_{раст}. \tag{15}$$

Сведения о среднегодовой температуре воздуха и амплитуде колебаний температур за год подробно представлены в главе 1.2.

В качестве исходных параметров для расчета глубины сезонного оттаивания в естественных условиях по методике В.А. Кудрявцева взяты значения теплопроводности ($\lambda_{ср}$) и теплоемкости (C_{th}) в соответствии с таблицей 7.

Для дальнейшего расчета необходимо вычислить две безразмерные переменные по формулам:

$$a = \frac{A_0 \cdot 2C_{th}}{z_v}, \tag{16}$$

$$b = \frac{|t_0| \cdot 2C_{th}}{z_v}. \tag{17}$$

По полученным значениям определяется безразмерная величина ξ^*, а затем глубина сезонного оттаивания в естественных условиях ($\xi_{сез}$) по формулам:

$$\xi* = \sqrt{(m+n)^2 + n} - m\,, \tag{18}$$

$$\xi_{сез} = \sqrt{\frac{\lambda_{ср} T}{\pi C_{th}}}\,\xi\,, \tag{19}$$

где

$$n = \ln\frac{a+1}{b+1}, \tag{20}$$

$$m = \frac{1}{2}\left[(a-b)\left(1+\frac{1}{n}\right) - n\left(2+\frac{1}{a-b}\right)\right]. \tag{21}$$

В результате выполненного расчета была получена глубина сезонного оттаивания грунтов в естественных условиях, представленная в таблице 8.

Таблица 8.

Глубина сезонного оттаивания грунтов в естественных условиях.

Наименование слоя	Среднегодовая температура на поверхности, °С	Амплитуда колебаний температур на поверхности за год, °С	Объемная теплоемкость в талом состоянии, Дж/(м^3·°С)10^6	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С	Суммарная влажность, д.е.	Влажность за счет незамерзшей воды, д.е.	Плотность скелета грунта, г/см^3	**Глубина сезонного оттаивания грунта в естественных условиях, м**
	t_0	A_0	C_{th}	λ_{cp}	W_{tot}	W_w	ρ_d	$\mathbf{d_{th,e}}$
ИГЭ-1	-6,41	17,21	2,78	1,90	0,12	0,01	1,18	**2,59**

Сезонное промерзание представляет собой промерзание талых грунтов, имеющих среднюю годовую температуру выше 0 °С. Слой сезонного промерзания подстилается немерзлыми грунтами и образуется в результате теплообмена при отрицательных температурах наружного воздуха.

Нормативная глубина сезонного промерзания грунта принимается равной средней из ежегодных максимальных глубин сезонного промерзания грунтов (по данным наблюдений не менее 10 лет) на открытой, оголенной от снега горизонтальной площадке при уровне подземных под, расположенном ниже глубины сезонного промерзания грунтов. (Усов, 2013)

Нормативные глубины сезонного промерзания $d_{f,n}$, м, рассчитываются в соответствии с п. Г.4, прил. Г, СП 25.13330.2020 по формуле (22) [6]:

$$d_{f,n} = \sqrt{\frac{2\lambda_f\left(T_{bf} - T_{f,m}\right)t_{f,m}}{q_2}}, \tag{22}$$

где

$$q_2 = L_v - 0.5 * C_f\left(T_{f,m} - T_{bf}\right). \tag{23}$$

Нормативные глубины сезонного промерзания грунтов по каждому выделенному ИГЭ в мерзлом состоянии, для открытой, оголенной от снежного покрова поверхности, приведены в таблице 9.

Таблица 9.

Нормативные глубины сезонного промерзания грунтов.

Наименование слоя	Температура начала замерзания грунта, °С	Коэффициент теплопроводности в мерзлом состоянии, Вт/м·°С	Объемная теплоемкость в мерзлом состоянии, Дж/(м^3·	Суммарная влажность, д.е.	Влажность за счет незамерзшей воды, д.е.	Плотность скелета грунта, г/см^3	**Нормативная глубина сезонного промерзания, м**
	T_{bf}	λ_f	C_f	W_{tot}	W_w	ρ_d	$\mathbf{d_{f,n}}$
ИГЭ-1	-0,20	1,99	2,28	0,12	0,01	1,18	**3,41**
ИГЭ-2	-0,21	2,04	2,17	0,29	0,18	1,45	**2,81**
ИГЭ-3	-0,20	2,34	2,25	0,07	0,01	1,92	**3,46**
ИГЭ-4	-0,20	1,89	2,26	0,07	0,01	1,96	**3,43**
ИГЭ-5	-0,02	1,75	1,70	0,09	0,01	2,11	**3,91**
ИГЭ-6	-0,02	2,52	2,69	0,11	0,01	1,83	**3,96**

3.3. Расчет глубины оттаивания грунтов под зданием аэровокзала

Одной из важнейших особенностей проектирования зданий и сооружений на многолетнемерзлых породах является необходимость учета теплового воздействия сооружений на температурное поле и свойства грунтов основания вплоть до формирования чаши протаивания. При расчете глубины оттаивания грунтов для II принципа строительства в качестве оснований будут использоваться предварительно оттаянные грунты или грунты, оттаивающие в период эксплуатации сооружения (Усов, 2013).

Расчет глубины оттаивания грунтов под проектируемым сооружением выполняется в соответствии с прил. К, СП 25.13330.2020 [6].

Расчет глубины оттаивания грунтов в основании сооружения H, м (считая от поверхности грунта под сооружением), за время его эксплуатации t, ч, производится по формулам для двух случаев – под серединой сооружения по формуле (24) и под краем сооружения по формуле (25).

$$H_c = k_n(\xi_c - k_c)B \tag{24}$$

$$H_e = k_n\left(\xi_e - k_e - 0{,}1\beta\sqrt{\psi}\right)B\,, \tag{25}$$

где H_c и H_e – глубина оттаивания грунтов под серединой и краем сооружения соответственно, м; k_n – коэффициент, определяемый по таблице К.1, СП 25.13330.2020 в зависимости от отношения L/B (L – длина сооружения, м; B – ширина сооружения, м) и значений параметров β и ψ [6]; ξ_c и k_c – коэффициенты, определяемые по графикам (рис. К.1, СП 25.13330.2020 [6]) в зависимости от значений параметров α_R, β и ψ; ξ_e, k_e – коэффициенты, определяемые по графикам (рис. К.2, СП 25.13330.2020 [6]) в зависимости от значений параметров α_R, β и ψ.

Коэффициенты α_R, β и ψ, используемые в формулах (24) и (25), рассчитываются, в свою очередь, по формулам:

$$\alpha_R = \frac{\lambda_{th} R_0}{B}; \tag{26}$$

$$\beta = -\frac{\lambda_f(T_0 - T_{bf})}{\lambda_{th}(T_{in} - T_{bf})}; \tag{27}$$

$$\psi = \frac{\lambda_{th} T_{in} \tau}{L_v B^2}, \tag{28}$$

где λ_{th} и λ_f – коэффициенты теплопроводности талого и мерзлого грунта соответственно, Вт/(м·°С); R_0 – сопротивление теплопередаче пола первого этажа или подвала сооружения, м^2·°С/Вт (в соответствие с СП 50.13330.2012 [9]); T_0 – расчетная

среднегодовая температура ММП на подошве слоя сезонного оттаивания вне контура здания, °С; T_{in} – расчетная температура воздуха внутри сооружения, °С; τ - продолжительность расчетного периода, ч; L_v - теплота таяния мерзлого грунта, Вт·ч/м^3, рассчитывается по формуле (12).

В ходе проведения лабораторных исследований грунтов, используемых в качестве несущего слоя для проектируемого сооружения, были получены характеристики, представленные в таблице 7.

Также, для расчета использовались следующие параметры сооружения: длина сооружения (L, м) – 85; ширина сооружения (B, м) – 20, температура воздуха в помещении (T_{in}, °С) – 20; термическое сопротивление пола (R_0, м$^{2\cdot}$°С/Вт) – 1,4.

В качестве основания используются грунты, представленные в ИГЭ-2 (суглинок твердомерзлый, слабольдистый, незасоленный), мощность которых на участке планируемого возведения сооружения составляет 3,0 м. Однако, на данном участке также встречены грунты, представленные в ИГЭ-1 (щебенистый грунт с суглинистым заполнителем (22,1%) твердомерзлый, слабольдистый, незасоленный), но его мощность (H = 0,2 м) незначительна и рекомендуется к удалению.

Таким образом, имея физические характеристики грунтов основания, по формуле (12) рассчитывается количество теплоты, необходимой для таяния льда в единице объема. При удельной теплоте плавления грунта L_0=93 Вт·ч/кг, его суммарной влажности w_{tot}=0,29 д.е., влажности за счет незамерзшей воды w_w=0,18 д.е. и плотности скелета ρ_d=1,45 г/см^3, количество теплоты необходимо в размере L_v=14,83 Дж/м^3.

Коэффициенты, необходимые для расчета глубины оттаивания грунтов в соответствии с формулами (26), (27) и (28) равны α_R=0,10, β=0,06 и ψ=0,05.

В результате полученных данных можно рассчитать глубину оттаивания грунтов под серединой и краем сооружения согласно формулам (24) и (25), которая составляет H_c = 5,20 м и H_e = 2,38 м соответственно.

Учитывая особенности региона и его приуроченность к территории повсеместного распространения ММП, строительство на исследуемом участке рекомендуется производить по I принципу – ММП основания используются в мерзлом состоянии.

Для сохранения мерзлого состояния грунтов, использующихся в качестве основания, и обеспечения их расчетного теплового режима предусматривается устройство вентилируемого подполья.

В связи с периодической расчисткой территории от снега высота подполья принимается равной 1,2 м от поверхности грунта.

Температурный режим вентилируемого подполья характеризуется среднегодовой температурой в подполье $T_{c,a}$, устанавливаемой расчетом в зависимости от предусмотренного проектом значения среднегодовой температуры многолетнемерзлого грунта на его поверхности T'_0, теплового режима сооружения и режима вентилирования подполья.

Среднегодовая температура воздуха в вентилируемом подполье $T_{c,a}$, °С, обеспечивающая предусмотренную среднегодовую температуру ММГ на его поверхности T'_0, °С, вычисляется по формуле:

$$T_{c,a} = k_0 * T'_0 , \quad (29)$$

где k_0 – коэффициент, принимаемый по таблице Д.1 СП 25.13330.2020 в зависимости от значений $t_{f,n}$ и λ_f/λ_{th} [6];

$t_{f,n}$ – продолжительность периода с отрицательной среднесуточной температурой воздуха, сут, принимаемая по СП 131.13330.2020 [13];

λ_f и λ_{th} – теплопроводность мерзлого и талого грунтов соответственно.

Среднегодовая температура многолетнемерзлого грунта на его верхней поверхности T'_0, °С, устанавливаемая при эксплуатации сооружений, назначается из условия обеспечения требуемых расчетных температур грунта охлаждающими устройствами. Для зданий и сооружений значение T'_0 определяется по формуле:

$$T'_0 = T_0 + \Delta T , \quad (30)$$

где T_0 – температура многолетнемерзлого грунта, °С;

ΔT – понижение температуры, которое должно быть обеспечено охлаждающими устройствами (в данном случае – проветриваемое подполье), °С, принимаемое по таблице Д.2 СП 25.13330.2020 [6].

Таким образом, в результате проведенного расчета среднегодовой температуры воздуха в вентилируемом подполье ($T_{c,a}$) по формуле (29) и среднегодовой температуры ММГ на его верхней поверхности (T'_0) по формуле (30) для сохранения мерзлого состояния грунтов, использующихся в качестве основания, и обеспечения их расчетного теплового режима предусмотренного устройством вентилируемого подполья, были получены следующие значения: $T_{c,a}$ = -1,86 °С и T'_0 = -2,29 °С.

3.4. Расчет глубины оттаивания грунтов под взлетно-посадочной полосой

При проектировании аэродромов, размещаемых в районах распространения многолетнемерзлых грунтов, следует принимать один из двух принципов использования грунтов в качестве естественных оснований аэродромных покрытий:

I – многолетнемерзлые грунты основания используются в мерзлом состоянии, сохраняемом в процессе строительства и в течение всего периода эксплуатации аэродромных покрытий;

II – многолетнемерзлые грунты основания используются в оттаянном состоянии или оттаивающем состоянии (с их предварительным оттаиванием на расчетную глубину до начала устройства аэродромного покрытия или с допущением их оттаивания в период эксплуатации покрытия).

Принципы I и II использования вечномерзлых грунтов в качестве основания аэродромного покрытия должны применяться, если годовой температурный баланс покрытия отрицателен (сумма отрицательных градусо-часов покрытия не меньше суммы положительных градусо-часов), т.е. при соблюдении условия

$$\sum_{i=1}^{12} t_{mp_i} * \tau_i \leq 0 , \qquad (31)$$

где i – месяц года;

t_{mpi} – среднемесячная температура поверхности покрытия, определяемая в соответствии с формулой (32);

τ_i – продолжительность i-го месяца, ч.

Техническая характеристика взлетно-посадочной полосы с искусственным покрытием (ИВПП):

- Длина – 2500 м;
- Ширина – 42 м;
- Тип фундамента – естественное основание;
- Нагрузка на фундамент – воздушное судно типа Boeing 737-800 с максимальным взлетным весом 79000 кг;
- Тип покрытия – асфальтобетонное покрытие.

Теплотехническим расчетом, проведенным в соответствии с приложением Д, СП 121.13330.2019, определяется требуемая толщина теплоизоляционного слоя ИВПП, при

которой естественное основание сохраняется в постоянно мерзлом состоянии или подвергается сезонному оттаиванию до установленной глубины. [12]

Для теплотехнического расчета используются следующие исходные данные:

– принятая конструкция покрытия и искусственного основания;

– допускаемая глубина сезонного оттаивания естественного основания, м;

– теплофизические характеристики материалов покрытия и искусственного основания, определяемые по таблице Д.1 СП 121.13330.2019, а грунтов – по таблице Д.2 СП 121.13330.2019 [12];

– средняя за период оттаивания температура поверхности покрытия, вычисляемая как среднеарифметическое из среднемесячных температур поверхности покрытия за теплый период года, определяемых согласно Д.3 СП 121.13330.2019 [11];

– продолжительность периода оттаивания, определяемая согласно Д.5 СП 121.13330.2019 [12];

– температура вечномерзлого грунта, °С, на уровне годовых нулевых амплитуд (за которую принимают среднегодовую температуру грунта на глубине 10 м), определяемая по данным инженерно-геологических изысканий.

Среднемесячная температура поверхности покрытия t_{mp}, °С, вычисляется по формуле:

$$t_{mp} = t_{ma} + \Delta t_{ma} + \frac{\Phi_m - Q}{\alpha_q}, \quad (32)$$

где t_{ma} – среднемесячная температура воздуха, °С, определяемая по СП 131.13330.2020 [13];

Δt_{ma} – поправка к среднемесячной температуре воздуха t_{ma}, °С, принимаемая по таблице Д.3 СП 121.13330.2019 [12];

Φ_m – среднемесячный радиационный баланс покрытия, Вт/м^2, рассчитываемый по формуле:

$$\Phi_m = 0{,}61 * \Phi_{sd} - 20\,, \quad (33)$$

Φ_{sd} -расчетная суммарная солнечная радиация, Вт/м^2, которая вычисляется по формуле:

$$\Phi_{sd} = \Phi_s + \Delta\Phi\,, \quad (34)$$

Φ_s – суммарная солнечная радиация, Вт/м^2, устанавливаемая по данным гидрометеорологической службы;

$\Delta\Phi$ – поправка к суммарной солнечной радиации Φ_s, Вт/м^2, определяемая по таблице Д.4 СП 121.13330.2019 [12];

Q – тепловой поток, учитывающий теплосодержание аэродромной одежды и подстилающих грунтов, а также процессы испарения и фазовые переходы, Вт/м^2, рассчитываемый по формуле:

$$Q = 0{,}49 * \Phi_{sd} - 60\,, \tag{35}$$

α_q – коэффициент теплообмена, Вт/(м^2*^{o}С), принимаемый равным:

$$\alpha_q = 2{,}4 * v_a + 2{,}3 \text{ при } v_a \leq 4{,}6 \text{ м/с};$$
$$\alpha_q = 3{,}7 * (v_a - 1) \text{ при } v_a > 4{,}6 \text{ м/с}; \tag{36}$$

v_a – средняя за месяц скорость ветра, м/с, представленная в таблице 4.

В результате вычислений получены данные, представленные в таблице 8.

Таблица 8.

Данные среднемесячной температуры поверхности покрытия t_{mp}, ^{o}С.

Месяц	Среднемесячная температура воздуха, ^{o}С	Среднемесячный радиационный баланс покрытия, Вт/м^2	Расчетная суммарная солнечная радиация, Вт/м^2	Суммарная солнечная радиация, Вт/м^2	Тепловой поток, Вт/м^2	Коэффициент теплообмена, Вт/(м^2*^{o}С)	**Среднемесячная температура поверхности покрытия, ^{o}С**
	t_{ma}	Φ_m	Φ_{sd}	Φ_s	Q	α_q	**t_{mp}**
I	-30,60	-16,95	5,00	5,00	-57,55	8,30	**-25,71**
II	-28,90	-6,58	22,00	22,00	-49,22	8,54	**-23,91**
III	-20,30	36,73	93,00	93,00	-14,43	9,26	**-14,78**
IV	-9,80	83,70	170,00	170,00	23,30	10,46	**-4,03**
V	0,20	120,30	230,00	230,00	52,70	10,46	**6,66**
VI	10,40	120,30	230,00	230,00	52,70	10,46	**16,86**
VII	15,00	111,15	215,00	215,00	45,35	9,74	**21,76**
VIII	10,90	65,40	140,00	140,00	8,60	9,26	**17,03**
IX	2,30	22,70	70,00	70,00	-25,70	9,74	**7,27**
X	-10,80	-1,70	30,00	30,00	-45,30	9,74	**-6,32**
XI	-23,00	-13,90	10,00	10,00	-55,10	8,78	**-18,31**
XII	-29,00	-20,00	0,00	0,00	-60,00	8,54	**-24,32**

По полученным данным, средняя за период оттаивания (теплый период года) температура поверхности покрытия составляет 13,92 °С, а за весь год -3,98 °С.

При определении годового температурного баланса среднемесячная температура поверхности покрытий принимается без учета поправок Δt_{ma} и $\Delta\Phi$. Тогда, исходя из условия (31), годовой температурный баланс покрытия на исследуемом участке отрицателен и составляет -34878,92.

Расчетная глубина сезонного оттаивания dt, м, первого (верхнего) однородного слоя грунта определяется по формуле:

$$d_t = \left(\sqrt{\frac{7{,}2 * \lambda_t * \theta_m}{\eta_t} + \beta^2} - \beta \right) * \sqrt{\tau_t}\,, \tag{37}$$

где θ_m – абсолютная средняя температура на поверхности покрытия за период оттаивания, °С:

η_t – количество тепла, затрачиваемое на фазовые переходы и нагрев материала слоя, кДж/м^3:

$$\eta_t = 0{,}5 * \theta_m * C_t + p_d * (w - w_w) * 334\,, \tag{38}$$

w_w – влажность грунта за счет незамерзшей воды, доли единицы;

β – значение, учитывающее поток холода снизу, (м/ч)^{0,5}:

$$\beta = \frac{\theta}{\eta_t} * \sqrt{\frac{\lambda_f * C_f}{\pi}}\,, \tag{39}$$

Θ – абсолютная температура на уровне нулевых годовых амплитуд, °С;

τ_t – продолжительность периода оттаивания (время действия положительных среднемесячных температур поверхности покрытия), ч;

w, p_d – принимаются по данным инженерно-геологических изысканий;

λ_t, λ_f, C_t, C_f – принимаются по таблице Д.2 СП 121.13330.2019 [12].

Расчетная глубина сезонного оттаивания dt, м, многослойной по глубине конструкции аэродромной одежды и основания определяется по формуле:

$$d_t = \sum_{1}^{n-1} t_i + d_h, \tag{40}$$

где ti – толщина отдельных однородных слоев аэродромной одежды и основания, м;

dh – глубина оттаивания последнего (нижнего) слоя естественного основания, м.

При этом, значение d_h следует определять путем последовательного (начиная с верхнего слоя) вычисления глубины оттаивания d_{ti}, каждого однородного слоя (с учетом вышележащих слоев) по формуле:

$$d_{t_i} = (d_{t_{(i-1)}} - t_{(t-1)} * \frac{\sqrt{\frac{7{,}2*\lambda_{t_i}}{\eta_{t_i}} * \theta_m * \left(1-\frac{t_1}{d_{t_1}}\right)\ldots\left(1-\frac{t_{(i-1)}}{d_{t_{(i-1)}}}\right)+\beta_i^2-\beta_i}}{\sqrt{\frac{7{,}2*\lambda_{t_{(i-1)}}}{\eta_{t_{(i-1)}}} * \theta_m * \left(1-\frac{t_1}{d_{t_1}}\right)\ldots\left(1-\frac{t_{i-1}}{d_{t_{(i-1)}}}\right)+\beta_{(i-1)}^2-\beta_{(i-1)}}}, \quad (41)$$

В результате проведенных вычислений расчетная глубина сезонного оттаивания d_t многослойной по глубине конструкции аэродромной одежды и основания по формуле (40) составляет 5,36 м.

4. ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ

Геокриологический прогноз особенностей формирования инженерно-геокриологических условий и развития или активизации опасных инженерно-геокриологических процессов в результате техногенного нарушения естественных теплоизоляционных покровов (снега и напочвенных растительных покровов) на поверхности пород является одним из основных видов инженерно-геокриологического прогноза.

Инженерно-геокриологические условия исследуемого участка характеризуются распространением и залеганием многолетнемерзлых грунтов, температурным режимом грунтов, толщиной сезоннопротаивающего слоя, физико-механическими свойствами грунтов, геокриологическими процессами и др.

Температура ММГ – один из решающих факторов, определяющих пригодность мерзлых грунтов в качестве основания. Многолетнемерзлые породы в естественных условиях обладают высокими прочностными свойствами. При сохранении температурного состояния мерзлых грунтов они служат надежным основанием для инженерных сооружений. Однако, при освоении территории мерзлые породы могут претерпевать значительные изменения температурного режима, которые, в свою очередь, активизируют опасные инженерно-геокриологические процессы.

Изменчивость свойств мерзлых грунтов в зависимости от температурного режима, их повышенная пластичность и ползучесть, происходящие в них процессы пучения, осадки, смерзания с фундаментами являются причинами многих особенностей работы мерзлых грунтов в качестве основания у различных видов сооружений. Вследствие этого основной особенностью проектирования и строительства на ММГ, в отличие от обычных условий, является необходимость учета и регулирования теплообмена грунта с сооружениями и с внешней средой. Тепловая форма взаимодействия часто превращается в механическую, которая, в свою очередь, может приводить к деформации сооружений. При недостаточном учете всех возможных тепловых и механических взаимодействий мерзлых грунтов и сооружений такие деформации могут быть катастрофическими.

Механическое взаимодействие сооружений с основаниями проявляется различно в зависимости от того, является ли грунт мерзлым, промерзающим или протаивающим. Оно зависит от многих факторов, но главным образом от состава мерзлых грунтов, от их температурного режима и реологических свойств.

Эти условия определяют предельные напряжения в мерзлых грунтах и становятся решающим фактором прочности и устойчивости сооружений.

В настоящее время практически имеются два способа управления механическим взаимодействием сооружений с мерзлыми грунтами:

1. конструктивный способ, при котором обеспечиваются пределы напряженного состояния, деформаций и ползучести мерзлого грунта, льда и материала сооружений, гарантирующие устойчивость сооружений;

2. теплотехнический способ, заключающийся в поддержании температурного режима оснований и материала сооружений в пределах, обеспечивающих их достаточную прочность.

Механическое взаимодействие между сооружениями и промерзающими грунтами часто проявляется в процессе пучения, которое может вызывать неравномерные местные напряжения и деформации. С действием сил пучения борются заложением фундаментов глубже слоя сезонного промерзания (протаивания) путем их закрепления (заанкеривания). Возможны также разрывы сооружений морозобойными трещинами, рассекающими грунты в случаях, когда сооружение и грунты представляют единые массивы. Это происходит вследствие значительных сил смерзания.

Протаивание мерзлых оснований вследствие изменений природного теплообмена или теплового взаимодействия с сооружениями обычно сопровождается уменьшением прочности и несущей способности грунтов. При этом могут возникать неравномерные осадки и пластические деформации оснований, неблагоприятно воздействующие на сооружения.

Все тепловые взаимодействия грунтов и сооружений связаны с нестационарным характером теплооборотов и выражаются изменением средних температур грунта, амплитуд температурных колебаний в грунтах, льдистости (влажности) и механических свойств грунтов. Поэтому тепловые взаимодействия мерзлых грунтов и сооружений должны обязательно учитываться при их проектировании и эксплуатации.

Проектируемым сооружением, на которое направлено особое внимание, является взлетно-посадочная полоса с искусственным покрытием, в связи с тем, что в холодный период на ее территории будет происходить техногенное нарушение естественных теплоизоляционных покровов на поверхности, а именно – расчистка снега и использование систем противообледенения.

Использование данных мероприятий заметно влияет на температурный режим пород и даже может стать причиной увеличения глубины сезонно-мерзлого слоя.

Также нельзя оставить без внимания оставшиеся сооружения, где будет происходить тепловое и механическое взаимодействие инженерных сооружений с грунтами основания. Вследствие теплопередачи на грунты основания будет происходить

увеличение глубины сезонного оттаивания пород, как следствие увеличение сезонного пучения.

Необходимость учета теплового режима грунтов при строительстве сооружений в области распространения ММП привела к нескольким методам или способам строительства в зависимости от более или менее суровых мерзлотных условий.

В настоящее время предложены следующие методы строительства сооружений на мерзлых грунтах, обеспечивающие в пределах их применимости нормальную работу сооружений:

1. Сохранение мерзлого состояния оснований (грунтов). Этот метод строительства на мерзлых грунтах применяется в случаях сплошного распространения ММГ с их относительно низкой среднегодовой температурой. Он особенно актуален, когда протаивание грунтов сопровождается значительным ухудшением их качества. Для сохранения мерзлого состояния оснований под зданиями чаще всего используют проветриваемые зимой подполья, закрываемые летом.

2. Приспособление конструкции сооружения к неравномерным осадкам протаивания мерзлых грунтов. Этот метод используется в случаях затруднительности сохранения мерзлого состояния грунтов после постройки сооружения. Это обычно имеет место в районах распространения мерзлых грунтов с температурой, близкой к нулю. В этом случае даже небольшое выделение тепла сооружением или естественное потепление может приводить к протаиванию мерзлых грунтов и соответствующим осадкам сооружений. Метод применим в случае относительно небольшой неравномерности ожидаемых осадок.

3. Предпостроечное протаивание мерзлых грунтов. Этот метод имеет целью искусственное улучшение строительных свойств грунтов и их приведение к обычным условиям строительства. При постройке фундаментов этот метод устраняет самый опасный промежуток существования сооружения во время протаивания основания. Метод признан рациональным для оснований, образованных песками и галечниками. В случае глинистых и пылеватых, сильнольдистых грунтов, способных значительно уплотняться после протаивания, его применение встречает затруднения. Предпостроечное протаивание рекомендуется если сооружения выделяют большие количества тепла, исключающие промерзание оснований при эксплуатации сооружений. (Кудрявцев, 1974)

Как показывают теплотехнические расчеты, образование чаши протаивания под зданием аэровокзала является неизбежным, в таком случае сохранность здания может быть обеспечена, например применением фундаментов глубокого заложения (свайных, столбчатых), т.е. закладываемых ниже максимальной глубины установившейся чаши

протаивания. Эффективным методом недопущения формирования чаши протаивания и полного сохранения мерзлого состояния грунтов основания является отвод тепла, выделяемого зданием в грунт. Инженерным решением вопроса будет полное удаление тепла, выделяемого зданием по всей площади подполья, т.е. применение системы проветриваемого зимой или круглогодично подполья, что гарантирует сохранение и даже усиление мерзлого состояния грунтов основания. Отвод тепла можно осуществлять также по специальным трубам (каналам) при естественной или побудительной их вентиляции, и путем устройства продуваемых крупнопористых каменных подсыпок под всей площадью нагрева основания здания. (Цытович, 1973)

Рекомендуется в течение всего периода строительства и эксплуатации сооружений проводить систематические наблюдения за состоянием грунтов, а также проводить мероприятия, направленные на уменьшение или устранение теплового воздействия сооружений на мерзлые грунты, посредством сохранения и восстановления почвенно-растительного покрова, укладки на поверхности земли теплоизоляционных покрытий, отсыпки застраиваемой территории песчаным и гравийно-песчаным грунтом, регулирования стока поверхностных вод.

Обеспечение I принципа строительства возможно при отсыпке территории непучинистым песчаным грунтом. При этом, при проведении теплофизических расчетов, необходимо учитывать, что многолетнемерзлые породы данной территории являются достаточно высокотемпературными.

Для сооружений с тепловыделением при проектировании следует предусмотреть проветриваемые подполья.

Исключить при строительстве объектов и инженерной подготовке территории удаление напочвенного растительного покрова. Доставку груза и проезд транспорта осуществлять в зимний период.

На участках с предполагаемым повышенным снегонакоплением, для сохранения мерзлых грунтов в основании сооружений, при проектировании рекомендуется предусмотреть установку сезонно-действующих охлаждающих устройств.

На проектируемых участках при строительстве и последующей эксплуатации будут происходить нарушения естественных поверхностных условий, обычно сопровождающие любой вид освоения – частичное или полное удаление растительного покрова и верхнего слоя грунта, перераспределение и уплотнение снежного покрова; выемка, экскавация грунта и пр. В пределах этих районов для предотвращения активного развития экзогенных процессов необходима разработка специальных мероприятий и инженерных решений.

В связи с хозяйственной деятельностью человека вышеуказанные процессы и явления могут заметно активизироваться.

При проектировании и строительстве необходимо предусмотреть мероприятия по инженерной защите от возможных вышеуказанных процессов.

При мониторинге в процессе строительства и эксплуатации сооружений необходимо следить за очагами проявления опасных инженерно-геокриологических процессов, предотвращая и минимизируя их развитие.

Для уменьшения влияния на проектируемые сооружения процессов пучения фундаменты в пределах деятельного слоя рекомендуется покрывать незамерзающими обмазками на основе битума или эпоксидной смолы. Приемлемы и противопучинистые засыпки из сухого гравия, гальки, шлака или засоленной глины, имеющей пониженную температуру замерзания. Конструктивными мероприятиями является заанкерирование фундаментов в вечномерзлый грунт, что достигается увеличением глубины заложения. При этом проверяется прочность фундамента на разрыв от действия сил пучения. (Зыкова, 2017)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследуемая территория расположена в Республике Саха (Якутия), Дальневосточный федеральный округ.

Средняя годовая температура воздуха составляет -9,5 ºС. Самым холодным месяцем является январь, среднемесячная его температура составляет -30,6 ºС. Абсолютный минимум температуры воздуха в районе изысканий оставляет -55,4 ºС. Самым теплым месяцем на рассматриваемой территории является июль, со средней температурой воздуха +15,0 ºС. Абсолютный максимум температуры воздуха составляет +33,6 ºС.

В орографическом отношении район строительства расположен в северо-восточной части Средне-Сибирского плоскогорья и представляет собой сильно расчлененное пологоволнистое плато, приподнятое на 430-440 м над уровнем моря.

Плато расчленено густой сетью глубоких речных долин, причем более половины площади приходится на склоны долин и междуречий. Наиболее крупными реками района являются Марха и ее левый приток Далдын. Глубина рек в среднем 1,5-2,0 м, в межень на перекатах она не превышает 0,2-0,5 м. Скорость течения Мархи – 0,9-1,1 м/с. Вследствие повсеместного развития многолетнемерзлых грунтов, подземный сток грунтовых вод практически отсутствует и питание рек находится в прямой зависимости от климатических факторов (от количества и режима выпадения осадков, от температуры воздуха и снеготаяния). Режим рек характеризуется большим непостоянством, резким подъемом и последующим быстрым спадом паводковых вод. Весенний паводок проходит в конце мая – первой половине июня, осенний в конце августа в период сильных дождей и максимальной глубины сезонного оттаивания. Реки замерзают в конце сентября.

В геологическом строении на исследуемой территории до глубины 10,0-30,0 м принимают участие грунты 4-х литологических комплексов:

- комплекс верхнекембрийский отложений ($Є_3$);
- комплекс элювиально-делювиальных отложений (edQ);
- современные техногенные отложения (tQ_{IV}).

Температура грунта на глубине 10,0 м (глубине нулевых годовых амплитуд) в пределах территории проектируемых сооружений составляет от -0,1 до -1,4 ºС.

К специфическим грунтам на участке исследования в соответствии с СП 47.13330.2016 и СП 11-105-97 отнесены многолетнемерзлые грунты ИГЭ-3, ИГЭ-4, а также техногенные грунты ИГЭ-1 [3, 8].

Согласно таблице 5.1 СП 115.13330.2016 категория опасности природных геологических процессов в пределах изученного района следующая [10]:

- землетрясения по интенсивности – умеренно опасная категория;
- пучение (сезонное) – опасная категория;
- подтопление территории – весьма опасная категория.

На исследуемой территории планируются следующие воздействия на среду: подсыпка и выемка грунта, срезка почвенно-растительного слоя, эпизодическое или систематическое удаление снежного покрова. Эти процессы в значительной степени определяют условия теплообмена грунтов с внешней средой и их нарушение сопровождается изменением основных геокриологических характеристик – среднегодовой температуры пород и мощности слоя сезонного оттаивания (промерзания), а в определенных условиях может приводить и к смене физического состояния (талое – мерзлое) пород.

Снежный покров является одним из самых мощных температурообразующих факторов при формировании среднегодовой температуры пород. Этому способствует его высокая теплоизоляционная способность и сезонность существования (только в холодный период года). Максимальная за зимний период мощность снежного покрова ($h_{сн}$) на открытых участках исследуемой территории составляет 0,3 м при среднезимней плотности $\rho_{сн}$=0,26 г/см^3.

Видовое разнообразие биогенных напочвенных образований на рассматриваемой территории весьма велико. Сюда входят травяные, осоковые, моховые и лишайниковые покровы в различных сложных сочетаниях друг с другом. Мощность этих покровов не превышает 0,1-0,2 м. Однако, биогенные теплоизоляционные покровы, даже при столь незначительной мощности, оказывают заметное воздействие на геокриологическую обстановку.

Для прогнозирования техногенных воздействий на геокриологические параметры осуществлялось решение серии одномерных тепловых задач в спектре изменения теплоизоляционных характеристик поверхностных покровов при сохранении неизменными всех остальных параметров.

Расчет каждой задачи осуществлялся с использованием программы «Тепло» и продолжался до практической стабилизации температурного поля в новых условиях. В результате для различных грунтовых условий построены графики, позволяющие как оценивать геокриологические характеристики (среднегодовую температуру ММП и глубины сезонного оттаивания) в естественных условиях, так и прогнозировать

воздействие тех или иных техногенных нарушений поверхностных покровов на геокриологическую обстановку (рис. 4-7). На графиках отражены изменения среднегодовой температуры пород и глубины их сезонного оттаивания в зависимости от величины максимальной высоты снежного покрова $h_{сн}$ и мощности напочвенного растительного покрова $h_{п}$.

Таким образом, исходя из полученных результатов, можно дать основную рекомендацию о необходимости сохранения целостности напочвенного растительного покрова, уничтожение которого в рассматриваемых природных условиях является существенно более опасным, чем нарушения снежного покрова.

Сезонное оттаивание представляет собой оттаивание мерзлых грунтов, имеющих среднюю годовую температуру ниже 0 ^{o}C. Слой сезонного оттаивания подстилается многолетнемерзлыми грунтами и образуется за счет теплообмена при положительных температурах.

Расчет нормативных глубин сезонного оттаивания и промерзания грунтов осуществлялся согласно СП 25.13330.2020 [6]. Результаты расчета приведены в таблицах 7 и 9 соответственно.

Данные вычисления справедливы для случаев, когда планируется расчистка территории от снега и напочвенного растительного покрова, а также удаление несоответствующих требованиям строительства инженерно-геологических элементов. В случае, если вышеописанные нарушения не планируются, необходимо проведение расчета глубины сезонного оттаивания в естественных условиях, результаты которого приведены в таблице 8.

Одной из важнейших особенностей проектирования зданий и сооружений на многолетнемерзлых породах является необходимость учета теплового воздействия сооружений на температурное поле и свойства грунтов основания вплоть до формирования чаши протаивания. При расчете глубины оттаивания грунтов под зданием аэровокзала для II принципа строительства в качестве оснований будут использоваться предварительно оттаянные грунты или грунты, оттаивающие в период эксплуатации сооружения.

Расчет глубины оттаивания грунтов под проектируемым сооружением выполнялся в соответствии с прил. К, СП 25.13330.2020 [6]. По формулам (24) и (25) были получены следующие значения глубины оттаивания грунтов под серединой и краем сооружения: H_c = 5,20 м и H_e = 2,38 м соответственно.

Учитывая особенности региона и его приуроченность к территории повсеместного распространения ММП, строительство на исследуемом участке рекомендуется производить по I принципу – ММП основания используются в мерзлом состоянии.

Для сохранения мерзлого состояния грунтов, использующихся в качестве основания, и обеспечения их расчетного теплового режима предусматривается устройство вентилируемого подполья.

В результате проведенного расчета среднегодовой температуры воздуха в вентилируемом подполье ($T_{c,a}$) по формуле (29) и среднегодовой температуры ММГ на его верхней поверхности (T'_0) по формуле (30) для сохранения мерзлого состояния грунтов, использующихся в качестве основания, и обеспечения их расчетного теплового режима предусмотренного устройством вентилируемого подполья, были получены следующие значения: $T_{c,a}$ = -1,86 ºС и T'_0 = -2,29 ºС.

Принципы I и II использования вечномерзлых грунтов в качестве основания аэродромного покрытия должны применяться, если годовой температурный баланс покрытия отрицателен (сумма отрицательных градусо-часов покрытия не меньше суммы положительных градусо-часов), который на исследуемой территории составляет -0,28 ºС

Теплотехническим расчетом, проведенным в соответствии с приложением Д, СП 121.13330.2019, определяется требуемая толщина теплоизоляционного слоя ИВПП, при которой естественное основание сохраняется в постоянно мерзлом состоянии или подвергается сезонному оттаиванию до установленной глубины [12].

В результате проведенных вычислений расчетная глубина сезонного оттаивания d_t многослойной по глубине конструкции аэродромной одежды и основания по формуле (40) составляет 5,36 м.

Инженерную защиту территории рекомендуется выполнять в соответствии с требованиями СП 116.13330.2012 («Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов») и СП 25.13330.2020 («Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах»), основными из которых являются следующие [6, 11]:

– мероприятия по инженерной защите и охране окружающей среды – проектировать комплексно;

– строительство рекомендуется в холодных период года с ноября по май.

При проектировании по I принципу:

– соблюдать требования п.6.3 СП 25.13330.2020 [6];

– для территорий, на которых слои сезонного оттаивания-промерзания не сливаются с многолетнемерзлым грунтом и разделены с ним таликом, необходимо предусмотреть меры по стабилизации или поднятию верхней поверхности ММГ до расчетного уровня путем предварительного охлаждения и промораживания грунтов основания (допускается закладывать фундаменты в пределах намерзлого слоя грунта, если это обосновано расчетом основания).

В рамках данной выпускной квалификационной работы основные расчеты велись согласно действующим версиям СП 25.13330.2020 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах» и СП 121.13330.2019 «Аэродромы», а также использовалось дополнительное программное обеспечение: пакет прикладных программ «NormCAD» (ООО «Центр развития систем автоматизированного проектирования «САПРОТОН») – для проверки полученных результатов при расчете глубин оттаивания грунтов; система автоматизированного проектирования «AutoCAD» (Autodesk Inc.) – для построения инженерно-геологических разрезов; векторный графический редактор «CorelDraw» (Corel Corp.) – для редактирования графических материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ И ИСТОЧНИКОВ

а) нормативная

1. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. М.: Кодекс, 2022.
2. ГОСТ Р 52398-2005. Классификация автомобильных дорог. Основные параметры и требования. – М.: Стандартинформ, 2006.
3. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть 1. Общие правила производства работ. – М.: ПНИИИС Госстроя России, 1997.
4. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. – М.: Стандартинформ, 2018.
5. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. – М.: Кодекс, 2022.
6. СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. – М.: АО «НИЦ «Строительство», 2020.
7. СП 28.13330.2017. Защита строительных конструкций от коррозии. – М.: Кодекс, 2022.
8. СП 47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства. – М.: Кодекс, 2022.
9. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. – М.: Кодекс, 2022.
10. СП 115.13330.2016. Геофизика опасных природных воздействий. – М.: Стандартинформ, 2018.
11. СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. – М.: Кодекс, 2022.
12. СП 121.13330.2019. Аэродромы. – М.: Стандартинформ, 2019.
13. СП 131.13330.2020. Строительная климатология. – М.: Кодекс, 2022.
14. ТСН 22-301-97. Строительство в сейсмических районах. Республика Саха (Якутия). – М.: СО РАН, 1997.

б) опубликованная

15. Аншпиз Е.С., Вавринюк Т.С. Расчет деформаций насыпей в районах мерзлоты. // Мир транспорта, 2012. №3, с. 102-107.
16. Дашко Р.Э. Механика горных пород: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1987. – 264 с.
17. Достовалов Б.Н., Кудрявцев В.А. Общее мерзлотоведение. – М.: Изд-во МГУ, 1967. – 404 с.

18. Емельянова Т.Я., Крамаренко В.В. Практикум по мерзлотоведению: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 120 с.

19. Ершов Э.Д. Общая геокриология: Учебник. – М.: Изд-во МГУ, 2002. – 682 с.

20. Ефимов А.И., Зайцев И.К. Гидрогеология СССР. Том 20. Якутская ССР. – М.: Недра, 1970. – 384 с.

21. Зыкова В.К., Лекчалов Р.О. Строительство зданий и сооружений в районах многолетней мерзлоты. // «Актуальные вопросы науки и хозяйства: новые вызовы и решения», 2017. С. 64-67.

22. Кудрявцев В.А. Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях. – М.: Изд-во МГУ, 1974. – 131 с.

23. Осокин Н.И., Сосновский А.В., Чернов Р.А. Коэффициент теплопроводности снега и его изменчивость. // Криосфера Земли, 2017. №3, с. 60-68.

24. Парфенов Л.М., Кузьмин М.И. Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). – М.: МАИК «Наука», 2001. – 571 с.

25. Усов В.А., Николаева Т.Н. Инженерное мерзлотоведение. – СПб: НМСУ «Горный», 2013. – 53 с.

26. Хрусталев Л.Н. Прогноз теплового и механического взаимодействия инженерных сооружений с многолетнемерзлыми грунтами в примерах и задачах. – Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2019. – 164 с.

27. Хрусталев Л.Н. Расчет инженерных сооружений на многолетнемерзлых грунтах. – Москва, Берлин: Директ-Медиа, 2021. – 124 с.

28. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. – М.: «ВШ», 1973. – 448 с.

29. Crawford C.B., Johnston G.H. Construction on permafrost. // Canadian Geotechnical Journal, 1971. №2, pp. 236-251.

30. Shur Y., Goering, D.J. Climate change and foundations of buildings in permafrost regions. // Permfrost soils, 2009. Vol. 16, pp. 251-260.

в) интернет-ресурсы

31. Топографические карты России: Подробная физическая карта Республики Саха (Якутия). URL: https://clck.ru/gLzoM.

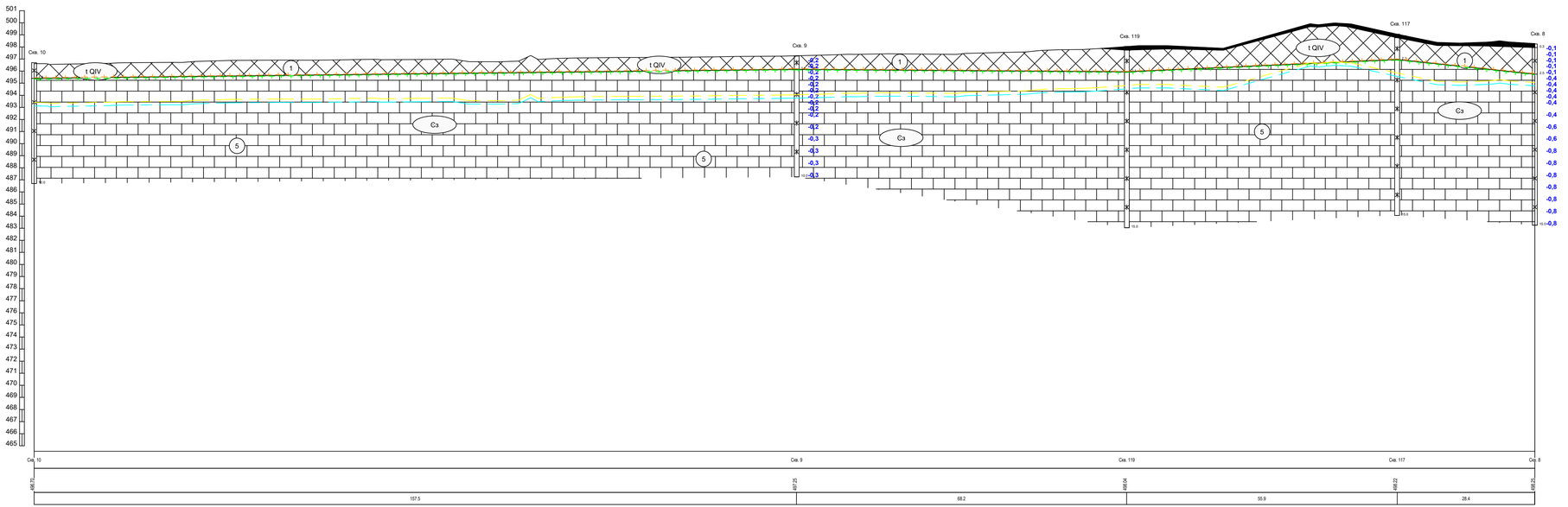
32. Муниципальное образование «Город Удачный». URL: https://clck.ru/gMAM6.

33. ФГБУ «Якутское УГМС». URL: https://ykuthydromet.ru.

34. OpenStreetMap. URL: https://openstreetmap.org/

35. SahkaGIS: Геологическая карта полезных ископаемых Республики Саха (Якутия). URL: https://clck.ru/gLzw9.

Инженерно-геологический разрез по линии 21-21



ГОРИЗОНТАЛЬНЫЙ 1:500

МАСШТАБЫ ВЕРТИКАЛЬНЫЙ 1:200

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ 1:200

464.54

Номер скважины	
Отметки устья, м	
Расстояние, м	

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

tQIV (1) — Насыпной грунт – щебенистый грунт с суглинистым заполнителем, твердомерзлый, слабольдистый

С3 (5) — Известняк твердомерзлый, твердомерзлый, льдистый

Обозначение состояния грунта	Консистенция глинистых грунтов		Степень влажности грунтов
	суглинки	супеси	скальные и крупнообломочные
	мерзлые	мерзлые	мерзлые

(1) — Номер инженерно-геологического элемента (ИГЭ)

С3 — Стратиграфический индекс

Граница ИГЭ

Граница стратиграфогенетического комплекса

Место отбора пробы грунта ненарушенного сложения (монолит)

скв.8 / 498.25 — Номер инженерно-геологической выработки/ абсолютная отметка устья, м, (БС)

-0,1 — Температура грунта

15.0 — Глубина выработки, м, слева

Включения дресвы и гравия

Граница сезонномерзлых грунтов

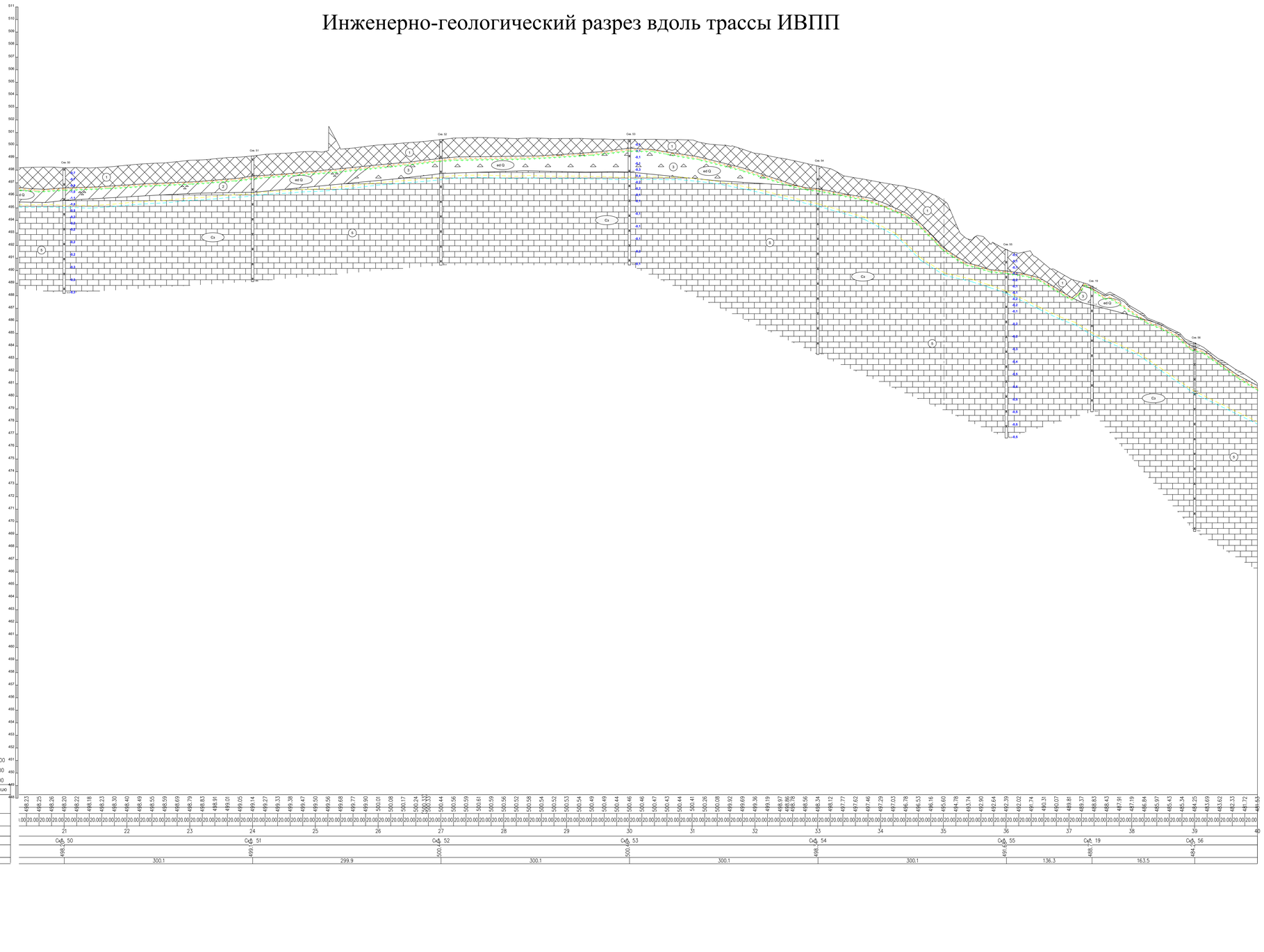
Граница многолетнемерзлых грунтов

Нормативная глубина сезонного промерзания грунтов по преобладающему ИГЭ до глубины 3.0м

Нормативная глубина сезонного оттаивания грунтов по преобладающему ИГЭ до глубины 3.0м

Инженерно-геологический разрез вдоль трассы ИВПП

Инженерно-геологический разрез вдоль трассы ИВПП



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- IQV (1) — Насыпной грунт – щебенистый грунт с суглинистым заполнителем, твердомерзлый, скальноцистый
- edQ (2) — Суглинок твердомерзлый, скальноцистый
- edQ (3) — Дресвяный грунт с супесчаным заполнителем, твердомерзлый, скальноцистый
- edQ (4) — Щебенистый грунт с суглинистым заполнителем, твердомерзлый, скальноцистый
- Cз (5) — Известняк твердомерзлый, твердомерзлый, выдержанный
- Cз (6) — Мергель твердомерзлый, твердомерзлый, выдержанный

Обозначение глубины грунта	Консистенция глинистых грунтов		Степень безводности грунтов
	суглинки	супеси	пески и крупнообломочные
	твердые	твердые	твердые

- (1) — Номер инженерно-геологического элемента (ИГЭ)
- Cз — Стратиграфический индекс
- Граница ИГЭ
- Граница стратиграфогенетического комплекса
- Место отбора пробы грунта ненарушенного сложения (монолит)
- скв.17 / 498.25 — Номер инженерно-геологической выработки/ абсолютная отметка устья, м. (БС)
- 10.0 / 4.1 — Литология грунта / Глубина выработки, м. слоёв
- Включения дресвы и гравия
- Граница сезономерзлых грунтов
- Граница многолетнемерзлых грунтов
- Нормативная глубина сезонного промерзания грунтов по преобладающему ИГЭ до глубины 3.0м.
- Нормативная глубина сезонного оттаивания грунтов по преобладающему ИГЭ до глубины 3.0м.

Приложение 3.

Нормативные и расчетные характеристики физико-механических свойств мерзлых грунтов.

Наименование показателей по ГОСТ 25100-2020, СП 25.13330.2020 [1,6]		Индекс	Единицы измерения	ИГЭ-1	ИГЭ-2	ИГЭ-3	ИГЭ-4
Влажность	за счет ледяных включений	W_i	Д.ед.	0,009	0,013	0,011	0,01
	за счет порового льда	W_{ic}	Д.ед.	0,1	0,104	0,053	0,048
	за счет незамерзшей воды	W_w	Д.ед.	0,011	0,176	0,01	0,01
	грунта между ледяных включений	W_m	Д.ед.	0,111	0,28	0,063	0,058
	суммарная	W_{tot}	Д.ед.	0,12	0,293	0,074	0,068
Плотность	частиц грунта	r_s	г/см3	2,74	2,71	2,75	2,75
	грунта в ест. состоянии	r_f	г/см3	2,03	1,88	2,06	2,09
	плотность грунта, при а = 0.95	r_1	г/см3	2,01	1,88	2,06	2,09
	плотность грунта, при а = 0.85	r_2	г/см3	2,03	1,88	2,06	2,09
	грунта в сухом состоянии	r_d	г/см3	1,81	1,45	1,92	1,96
Коэффициент пористости		e	Д.ед.	0,514	0,869	0,432	0,403
Влажность грунта на границе текучести		W_p	Д.ед.	0,172	0,344	0,113	0,1
Влажность грунта на границе раскатывания		W_l	Д.ед.	0,085	0,256	0,054	0,02
Число пластичности		I_p	Д.ед.	0,087	0,088	0,059	0,087
Показатель консистенции		I_l	Д.ед.	0,4	0,42	0,34	0,6
Льдистость	за счет лед.включений	I_i	Д.ед.	0,02	0,02	0,03	0,02
	за счет порового льда	I_{ic}	Д.ед.	0,19	0,16	0,1	0,1
	суммарная	I_{tot}	Д.ед.	0,21	0,18	0,13	0,12
Степень заполнения объема пор льдом и незамерзшей водой		S_r	Д.ед.	0,645	0,907	0,435	0,429
Коэффициент фильтрации в плотном состоянии		Кф	м/сут	12,21	0,13	14,02	13,39
Коэффициент фильтрации в рыхлом состоянии		Кф	м/сут	32,01	0,32	32,23	32,87
Относительное содержание органического вещества		I_r	%	2,17	2,23	1,93	2,46
Температура начала замерзания грунта		T_{bf}	град. С	-0,2	-0,21	-0,21	-0,2
Коэффициент сжимаемости оттаявшего грунта		a	МПа-1	-	0,025	-	-
Коэффициент оттаивания		A	Д.ед.	-	0,005	-	-
Теплопроводность	талого	λ_{th}	Вт/(м*С)	1,39	1,43	1,74	1,29
	и мерзлого грунта	λ_f		1,99	2,04	2,34	1,89
Объемная теплоемкость	талого	C_{th}	МДж/(м3*С)	2,78	3,01	2,97	2,67
	и мерзлого грунта	C_f	Дж/м3*10^7	2,28	2,17	2,25	2,26
Теплота таяния (замерзания) грунта		Z_v	МПа	6,61	5,68	4,12	3,81
Сопротивление срезу по поверхности смерзания грунт-грунт		R_{sh}	МПа	-	0,123	-	-
Сопротивление срезу по поверхности смерзания грунт-грунт, при а = 0.95		R_{sh1}	МПа	-	0,12	-	-
Сопротивление срезу по поверхности смерзания грунт-грунт, при а = 0.85		R_{sh2}	МПа	-	0,122	-	-
Сопротивление срезу по поверхности смерзания грунт-металл		R_{af}	МПа	-	0,152	-	-
Сопротивление срезу по поверхности смерзания грунт-металл, при а=0,95		R_{af1}	МПа	-	0,146	-	-
Сопротивление срезу по поверхности смерзания грунт-металл, при а=0,85		R_{af2}	МПа	-	0,149	-	-
Предельно длительное значение эквив. сцепления		C_{eq}	МПа	-	0,031	-	-
Относительная деформация пучения		ε_{fh}	Д.ед.	0,008	0,05	0,008	0,008

Приложение 4.

Нормативные и расчетные характеристики физико-механических свойств скальных грунтов.

Наименование показателей по ГОСТ 25100-2020, СП 25.13330.2020 [1,6]		Индекс	Единицы измерения	ИГЭ-5	ИГЭ-6
Влажность:	природная	W_i	Д.ед.	0,009	0,013
Плотность:	частиц грунта	r_s	г/см3	2,74	2,71
	грунта в ест.состоянии	r_f	г/см3	2,03	1,88
	плотность грунта, при а = 0,95	r_1	г/см3	2,01	1,88
	плотность грунта, при а = 0,85	r_2	г/см3	2,03	1,88
	грунта в сухом состоянии	r_d	г/см3	1,81	1,45
Коэффициент пористости		e	Д.ед.	0,514	0,869
Коэффициент фильтрации		Кф	м/сут	0,2	0,22
Предел прочности на одноосное сжатие (возд.сух.)		R_{bc}	МПа	33	12
Предел прочности на одноосное сжатие (возд.сух.), при а = 0,95		R_{bc1}	МПа	32,9	11,8
Предел прочности на одноосное сжатие (возд.сух.), при а = 0,85		R_{bc2}	МПа	32,9	11,9
Предел прочности на одноосное сжатие (водонас.)		R_c	МПа	25,2	8,4
Предел прочности на одноосное сжатие (водонас.), при а = 0,95		R_{c1}	МПа	25	8,2
Предел прочности на одноосное сжатие (водонас.), при а = 0,85		R_{c2}	МПа	25,1	8,8
Коэффициент размягчаемости		K_{sof}	Д.ед.	0,76	0,7
Коэффициент выветрелости		K_{wrt}	Д.ед.	0,85	0,85
Содержание CaCO3			%	91,8	56,6
Содержание MgCO3			%	3,2	4,9
Карбонатность			%	83	83,1
Показатель качества грунта		R_{QD}	%	67	22