

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЗАДНЕЕВА Анастасия Александровна

Выпускная квалификационная работа

Прогноз взаимодействия газопровода и сопутствующих сооружений инфраструктуры с многолетнемерзлыми породами на побережье Байдарацкой губы

Уровень образования: магистратура

Направление *05.04.01 «Геология»*

Основная образовательная программа *ВМ.5515.2018 «Геология»*

Профиль «Инженерная геология»

Научный руководитель:

доцент каф. грунтоведения и инженерной геологии

к.г.-м.н., Усов В.А.

Рецензент:

начальник грунтовой испытательной лаборатории

«ОАО «Трест ГРИИ»,

Семенова Л.К.

Санкт-Петербург

2020

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. Геолого-географическая характеристика района	4
1.1. Физико-географический очерк	4
1.1.1. Местоположение исследуемого района	4
1.1.2. Геоморфология	6
1.1.3. Климат	8
1.2. Геологическое строение территории	9
1.2.1. Стратиграфия	9
1.2.2. Тектоника	12
Глава 2. Инженерно – геологическая характеристика участка	14
2.1 Геоморфология участка	14
2.2. Состав и строение грунтов	17
2.3. Инженерно-геологическая структуризация разреза	22
Глава 3. Прогноз взаимодействия газопровода и сопутствующих сооружений инфраструктуры с многолетнемерзлыми породами на побережье Байдарацкой губы	25
3.1. Расчет нормативной глубины сезонного оттаивания	25
3.2. Расчет ореола оттаивания вокруг подземного трубопровода	28
3.3. Расчет глубины оттаивания грунтов под сооружением по СП 25.13330.2012	33
3.4. Прогноз изменения мерзлотных условий при естественных колебаниях климата	36
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	39
Список использованной литературы	41

ВВЕДЕНИЕ

В районах вечной мерзлоты находится около 63% территории России (10,7 млн км²). При всем при этом северные регионы играют важную роль в экономике страны, так как именно здесь сосредоточено более 80% разведанных запасов нефти и около 70% природного газа. В связи с этим остро встает вопрос о транспортировке углеводородов в условиях Крайнего Севера. В процессе строительства и эксплуатации трубопроводных систем происходит вживление их техногенных элементов в естественную природную среду, которое самым непосредственным образом сказывается на динамике изменения мерзлотного слоя. Полуостров Ямал является стратегически важным нефтегазоносным регионом России. Вековая история изучения, разведки и освоения данного региона сделала его одним из наиболее перспективных районов добычи нефти и газа. На сегодняшний день разведанные и предварительно оцененные запасы газа здесь превышают ~ 16,5 трлн м³.

Однако, развитие месторождений требует параллельного развития инфраструктуры для полноценного функционирования системы нефте- и газодобычи. Поэтому, непременно следует прогнозировать взаимодействие газопровода и сопутствующих сооружений инфраструктуры с многолетнемерзлыми породами и оценивать его риски.

Целью данной работы является прогноз взаимодействия газопровода и сопутствующих сооружений инфраструктуры с многолетнемерзлыми породами на побережье Байдарацкой губы.

Основными задачами являются составление инженерно-геологических разрезов изучаемой территории, инженерно-геологические расчеты, необходимые для прокладки трубопровода, а также дальнейший прогноз взаимодействия газопровода, инфраструктуры с ММП.

Глава 1. Геолого-географическая характеристика района

1.1. Физико-географический очерк

1.1.1. Местоположение исследуемого района

Полуостров Ямал (рис. 1.) расположен между координатами по широте 68° и 73° с.ш. и долготе – между 66° и 73° в.д. С запада омывается Карским морем (на юго-западе – Байдарацкой губой), с востока – Обской губой. С севера полуостров отделен от акватории Карского моря находящимся через пролив Малыгина островом Белый, имеет длину около 700 км, а ширину – около 240 км. Рельеф Ямала исключительно ровный, перепады высот не превышают 90 м. Средняя высота полуострова около 50-ти метров. Ландшафты полуострова представлены тундрой, на юге – с лесотудровыми участками. Имеется большое количество озер, самое крупное из которых – Ямбуто, входящее в систему озер Нейто. [15]



Рис. 1. Расположение полуострова Ямал [19]

Климат холодный. Основная часть полуострова находится в субарктическом поясе, а северное побережье – в арктическом. Средняя температура зимой составляет примерно - 25°C, а летом – около 9°C [15]. Повсеместно распространена многолетняя мерзлота. Талые грунты встречаются под крупными реками и озерами.

Морфологически территория полуострова представляет собой преимущественно заболоченную равнину с небольшими высотами (до 200 м) [15].

Карское море – окраинное море Северного Ледовитого океана, площадью около 900 тыс. км². Ограничено побережьями п-овов Ямал и Гыдан, архипелагами Новая Земля и Северная Земля. Наибольшая глубина составляет примерно 620 м, а средняя – не превышает 100 м. В море впадают полноводные реки Обь и Енисей. Также это море является одним из самых холодных – температура выше 0 °С летом только вблизи устьев рек, а большую часть года море покрыто льдами. В морфологии дна выделяются два желоба – Святой Анны (максимальная глубина 620 м) и Воронин (максимальная глубина 420 м). [13]

Район исследований находится в шельфовой зоне прибрежной части Байдарацкой губы. Байдарацкая губа — один из крупнейших бассейнов эстуарного типа Карского моря. Она представляет собой обширный морской залив, врезанный в материк в направлении с северо-запада на юго-восток на 180 км [15]. Ширина губы меняется от 78 км до 17 км. Температура воды на поверхности летом 5 – 6 °С [15]. С октября по июнь почти полностью покрыта льдом. Подвижки льда в центральной части губы могут происходить только при сильных ветрах и в приливы (амплитуда последних составляет 0,5-1,0 м) [15]. Шторма в открытой части Карского моря могут поднять волну в Байдарацкой губе и взломать лед в её северной и центральных частях. Граница устойчивого стояния льдов изменяется ежегодно.

Берег преимущественно пологий, покрыт тундровой растительностью, местами сильно заболочен. В залив впадает порядка 70 рек. Крупнейшие из них (с юго-запада на северо-запад): Сибирчатаяха, Кара, Лабияха, Пэкучаяха, Нгояха, Нгосавэйяха, Талвтаяха, Тунгомаях, Нгындермаяха, Нензояха, Байдарата, Ёркутаяха, Явхалютосе, Тамбьяха, Нганораяха, Хэяха, Юрибей, Ясавэйяха, Тоясё, Юмбьяха, Лыяха, Юрёяха, Лыхыяха, Седатаяха, Хаяха, Мараяха и Ябтояха [15].

В акватории Байдарацкой губы расположено пять островов: Литке, Нгонярко, Полумесяц, Левдиев, Торасавэй [15]. Все они необитаемы.

По дну Байдарацкой губы проложены подводные газопроводы, которые свяжут крупнейшие газовые месторождения Ямала, прежде всего, Бованенковское, Харасавэйское и Южно-Тамбейское, с Европейской частью России. Пять веток пройдут от компрессорной станции КС «Байдарацкая» до КС «Ярынская» сквозь центральную часть губы; ещё одна

ветка пойдет гораздо севернее, на выходе из губы между собственно Бованенковским месторождением и КС «Усть – Кара» возле одноимённого поселка.

1.1.2. Геоморфология

Территория полуострова Ямал является молодым аккумулятивным равнинным рельефом, расчлененным эрозионной сетью [5]. Причиной равнинности территории является ее активное прогибание в мезозое и кайнозое, что привело к обширной трансгрессии моря в четвертичный период, а, следовательно, накоплению толщи четвертичных отложений и формированию обширных низменных морских и лагунно-морских аккумулятивных равнин [14]. Формирование современного облика рельефа полуострова началось в конце среднего плейстоцена в ходе регрессии моря. В его создании ведущую роль играли морская аккумуляция и абразия, речная эрозия и аккумуляция, озерная эрозия и аккумуляция, а также ледниковая и водно-ледниковая аккумуляция. Одним из главных условий формирования современного рельефа территории стало положением кровли дочетвертичных пород, которая отражает тектонический план осадочного мезокайнозойского чехла [14]. Характерной особенностью территории является ступенчатое строение ее поверхности. Она сформировалась в позднечетвертичное время в регрессивный этап морского бассейна, занимавшего север Западной Сибири.

Морские аккумулятивные равнины и террасы повсеместно распространены на территории полуострова, занимая его внутреннюю, наиболее возвышенную часть [13]. Морская равнина среднеплейстоценового возраста (салехардская) достигает отметок ~ 85 м. Верхняя толща сложена песчаными отложениями мощностью до 10 м, что говорит о регрессивном цикле осадкообразования. В северной части полуострова рельеф характеризуется плоскими участками, сильно расчлененными густой сетью речных долин. К югу же поверхность морской равнины приобретает холмистый характер. Салехардская равнина характеризуется широким распространением мерзлотного рельефа [2]. Также характерной особенностью является наличие термокарстовых форм, например, аласы, заболоченные понижения. Помимо термокарстовых явлений, особенно для склонов южной экспозиции, характерно такое явление, как солифлюкция. Она распространена на севере территории и приурочена к участкам, сложенным с поверхности супесчано-суглинистыми породами.

Морская равнина верхнеплейстоценового возраста (казанцевская) окаймляет со всех сторон среднеплейстоценовую равнину. Ее абсолютные отметки составляют 45 – 65 м. Поверхность равнины имеет пологохолмистый рельеф. К северу борта равнины приобретают крутой характер. Территория характеризуется высокой степенью заозеренности,

интенсивной заболоченностью. В районах со слабо расчлененным рельефом, совпадающим с площадью отрицательных тектонических структур, широко распространено явление бугров пучения. На участках пологих склонов развиты солифлюкционные формы в виде террас, а по берегам и склонам рек – оплывин и солифлюкционных потоков. [13, 14]

Морские аккумулятивные террасы распространены в северной и западной частях полуострова Ямал, особенно, по периферии. Характер рельефа преимущественно плоский. Всего выделяют четыре террасовых уровня: третья морская терраса (абсолютные отметки достигают 25 м, поверхность этой террасы отделена от более молодых уровней четким абразионным уступом, поверхность слабоволнистая), вторая морская терраса (абсолютные отметки равняются ~ 20 м, имеет ограниченное распространение на территории полуострова, характер рельефа плоский), первая морская терраса (абсолютные отметки достигают 12 м, также имеет ограниченное распространение, имеет плоский рельеф), морская лайда (распространена по окраинам Ямала и прослеживается вдоль всего побережья, абсолютные отметки колеблются в пределах 2 – 5 м, поверхность лайды характеризуется сильной заозеренностью) [5, 13, 14].

Лагунно-морские аккумулятивные террасы распространены на территории, обрамляющей Обскую губу [14]. Так же выделяют 4 террасовых уровня: третья, вторая, первая лагунно-морские аккумулятивные террасы и лайда.

Озерные аккумулятивные террасы представлены тремя позднеплейстоценовыми террасами и современной озерной поймой. Террасы занимают небольшие площади и приурочены в основном к центральной части полуострова. Абсолютные отметки достигают 55 – 60 м, а в отдельных местах и 65 м. на поверхности террас развиты следующие мерзлотные формы рельефа: бугры пучения, термокарстовые понижения. [13, 14]

Аллювиальные аккумулятивные и эрозионно-аккумулятивные террасы наблюдаются в долинах наиболее крупных левых притоков реки Обь ее устья. О молодости этих долин свидетельствует отсутствие ярко выраженных террас. Территория характеризуется большим количеством торфяников и сильной степенью заозеренности. [14]

Ледниковые аккумулятивные равнины распространены в Приуральской части полуострова. Происхождение данной формы рельефа связано с аккумулятивной деятельностью ледника. По периферии они сменяются плоской равниной с общим уклоном на юго-восток, которая сформировалась под воздействием талых ледниковых вод. Отметки равнин колеблются от 75 – 110 м. [14]

1.1.3. Климат

Климат района субарктический с коротким летом и продолжительной зимой. Средняя температура января составляет от минус 21 до минус 22 °С, июля плюс 6–8 °С [15]. Лето прохладное, с большим количеством осадков в виде дождя, реже – снега. Количество осадков – от 400 до 800 мм в год [15]. Устойчивый снежный покров обычно устанавливается в конце сентября и сходит в июне. Относительная влажность почти всегда близка к 100 %. Многолетнемерзлые породы оттаивают на глубину 0,4 м, редко – до 1,2 м [15]. Зимой преобладают ветры юго-западного, весной и осенью – северного и северо-западного, летом – северного направлений. Нередки штормовые ветры до 7–8 баллов. Максимальная скорость ветра (до 40 м/с) отмечается зимой и в переходные сезоны, летом средняя скорость ветра снижается до 5–6 м/с. Развитие ветрового волнения ограничено размерами и мелководностью губы. Вероятность волн высотой менее 1 м составляет 60% [15]. Волны высотой 3–5 м наблюдаются только в сентябре-октябре и их вероятность не превышает 3–5%, в исключительных случаях наблюдаются волны до 8 м [15].

Важнейшей особенностью территории полуострова Ямал, которая во многом определяет инженерно-геологические условия региона, является широкое распространение многолетнемерзлых пород (рис. 2.).



Рис. 2. Карта распространения многолетнемерзлых пород на территории России [20]

К основным факторам, влияющим на распространение многолетнемерзлых пород по территории Ямала, можно отнести климатическую составляющую природных условий, историю геологического развития территории в плейстоцене и голоцене. Полуостров Ямал

характеризуется практически сплошным распространением многолетнемерзлых пород по своей территории. Эта особенность обусловлена малым радиационным балансом, низкими среднегодовыми температурами воздуха, малой мощностью снежного покрова и т.д. Повсеместное распространение многолетнемерзлых пород прерывается лишь у южных границ полуострова, где встречаются талики. Многолетнемерзлые породы, находящиеся в материковой части полуострова (вне акватории), залегают, как правило, под слоем сезоннотальных пород. По данным Трофимова Виктора Титович [14] для отложений, развитых в пределах казанцевской морской равнины, а именно, для третьей, второй и первой морских террас, характерны следующие значения глубин распространения многолетнемерзлых пород (представленные данные являются среднеарифметическими) – 245 м, 210 м и 125 м соответственно.

1.2. Геологическое строение территории

1.2.1. Стратиграфия

В основании Ямала залегает плита эпипалеозойской платформы с мезо-кайнозойским осадочным чехлом [11]. Выступов кристаллического фундамента не наблюдается. На Ямале сосредоточено много месторождений природного газа, в основном расположенных на юге и западном побережье полуострова. Разведанные запасы газа на 2009 год составляют ~ 16 трлн м³.

Вся территория суши находится в составе складчатой структуры Урало-Новоземельского пояса, акваториальная часть принадлежит к Западно-Сибирской плите [11]. В пределах большей части Ямала непосредственно на породах палеозойского фундамента залегает маломощная кора выветривания. Эти отложения вскрыты рядом скважин профиля Щучье - Салета и, по данным С.А. Чирвы и С.Г. Галеркиной [14], представлены сильно измененными бесструктурными, каолинизированными породами. Кора выветривания имеет незначительную мощность и сохраняется, вероятно, в западинах рельефа фундамента. Девонские отложения представлены нижним, средним и верхним отделами. Нижне- и среднедевонские отложения выражены мощной толщей известняков светло-серых и светло-коричневых, рифовых или органо-обломочных. Изредка они замещаются вулканогенными породами, среди которых преобладают пироксен-плагиоклазовые порфириты и туфы с известняками. Верхнедевонские отложения выражены песчаниками, кремнистыми и глинистыми сланцами с маломощными прослоями известняков. Каменноугольные отложения выражены серыми массивными известняками, а также песчаниками, глинистыми и известковыми сланцами, мергелями. [5, 14]

Мезозойские отложения представлены триасовыми, юрскими и меловыми породами. Триасовые отложения широко представлены на юго-западе полуострова. Нижняя часть их разреза представлена чередованием глин, мергелей, песчаников, алевролитов. Средняя – алевролиты и песчаные породы, которые содержат прослой карбонатных глин, мергелей. Верхняя часть толщи состоит из глин, мергелей, песчаников. Юрские отложения вскрыты на глубинах порядка 700 м на юге полуострова. Разрез юрских отложений представлен песками, песчаниками, переслаивающимися с глинами и алевролитами. Выше залегают плотные глины с прослоями алевролитов и алевролитов. Разрез меловых отложений снизу представлен глинистыми разностями с пачками песчано-алевролитовых пород. Выше по разрезу залегают песчано-алевролитовые породы с карбонатными и глинистыми прослоями, мощность которых достигает 5 м. Верхняя часть разреза меняется на серые плотные глины с прослоями алевролитов и песчаников. Отложения мезозоя на п-ове Ямале изучены чрезвычайно слабо. Данные по этому вопросу получены лишь в самое последнее время, после проведения бурения в Новом Порту (1959 г.) и на профилях Щучье - Салета, Салехард - Яр-Сале (1961-1962 гг.). [6,14]

Кайнозойские отложения в пределах исследуемой территории изучены очень широко. Они представлены палеогеновыми и четвертичными отложениями. Последние покрывают всю территорию полуострова мощным чехлом и слагают разные по возрасту и генезису геоморфологические уровни. Сведения о палеогеновых отложениях полуострова незначительны. Отложения палеоцена представлены прибрежно-морскими фациями, для которых характерно переслаивание алевролитов, алевролитистых глин и песков, содержащих растительный детрит и маломощные прослой бурых углей. Мощность отложений достигает 100 м. [14]

Четвертичные отложения, как было сказано ранее, чрезвычайно широко распространены на полуострове, образуя сплошной чехол. Мощность колеблется от первых десятков метро до 250-300 м. Отложения представлены главным образом глинистыми, суглинистыми и песчаными разностями морского генезиса. На западе и севере полуострова также распространены голоценовые террасы. Морской генезис этих террас подтвержден работами Троицкого С.Л., в которых говорится о находках макро- и микрофауны [14]. Самыми мощными отложениями являются нижне- и среднеплейстоценовые (до 300 м). Они представлены супесчано-суглинистыми породами, среди которых выделяются два типа: хорошо отсортированные породы с четко выраженной горизонтальной и диагональной слоистостью и плохо отсортированные супеси и суглинки, содержащие включения гравийно-галечникового и валунного материала [6].

Верхнеплейстоценовые отложения имеют широкое распространение на территории всего полуострова. В западной части наиболее широко представлены отложения казанцевской свиты (mQ_{III}^1), морскими отложениями третьей (mQ_{III}^{2-3}) и второй (mQ_{III}^{3-4}) и первой террас [14]. Морские отложения казанцевской свиты широко развиты на территории Ямала, где формируют хорошо выраженную террасовидную равнину с высотой ~ 55 м. Данные отложения представлены слоистыми толщами песков, супесей, суглинков и глин, содержащих большое количество растительных остатков [14]. Также отложения казанцевской свиты содержат фауну моллюсков, который свидетельствует о том, что температурный режим казанцевского моря был благоприятнее нынешнего, наблюдаемого в Байдарацкой губе [6].

Морские отложения третьей террасы (mQ_{III}^{2-3}) слагают хорошо выраженную террасу с абсолютными отметками 22-35 м. Отложения представлены песками, супесями, суглинками и глинами, часто переслаивающимися в разрезе. [14]

Морские отложения второй террасы (mQ_{III}^{3-4}) занимают небольшие площади полуострова. В исследуемой части Ямальского полуострова отложения представлены тяжелыми серыми супесями с тонкими прослоями мелких и пылеватых песков. [14]

Отложения первой морской террасы также широко распространены по территории полуострова и представлены песками пылеватыми и супесями с суглинками [14].

Верхнеплейстоценовые – голоценовые отложения представлены озерными отложениями первой террасы (IQ_{III-IV}). Они развиты вдоль всего побережья Карского моря. В большинстве районов они представлены пылеватыми слоистыми песками, супесями, суглинками и глинами, зачастую содержащими значительную примесь органики. В верхней части отложения иногда перекрыты торфом. [14]

Голоценовые отложения представлены морскими отложениями лайды (mQ_{IV}) и голоценовыми аллювиальными отложениями (aQ_{IV}) [14].

Морские отложения лайды (mQ_{IV}) развиты вдоль побережья Карского моря. Лайды представляют собой обширные сильно заболоченные и заозеренные пространства, подвергающиеся действию приливов и отливов [14]. Характерно, что лайды также имеют два уровня, причем верхний из них (4- 6 м) уже не подвергается действию приливов и отливов. На этой поверхности часто наблюдаются обширные участки полигональных тундр, имеющие четкую морфологическую выраженность. Следует отметить, что как пойменный комплекс террас, так и лайды прекрасно дешифрируются на аэрофотоснимках. Они представлены супесчано-суглинистыми и глинистыми породами с прослоями пылеватых песков. Суглинки, как правило, тяжелые, темно-серого цвета, слоистые [6]. Часто в суглинке наблюдаются включения органики. Слоистость четкая, горизонтальная. Пески зачастую заилены. Помимо

вышесказанного следует отметить, что в настоящее время вдоль побережья Карского моря происходит формирование осадков на пляже, которые сложены песком, иногда с гравием и галькой, вымытыми из более древних пород [14].

Современные аллювиальные отложения (aQ_{IV}), слагающие поймы рек, широко распространены в пределах Ямала. В целом они представлены суглинистыми, супесчаными, песчаными и гравийно-галечниковыми породами. Суглинки имеют сизые и серые тона, а пески – светло-серые. Кроме того, в разрезах часто встречаются прослой и линзы торфа небольшой мощности. [14]

Болотные отложения (bQ_{IV}) распространены на территории полуострова повсеместно. Представлены, как правило, плохо разложившимся торфом, мощности которого увеличиваются с севера на юг. [14]

1.2.2.Тектоника

В геологической истории развития полуострова Ямал, как и в истории развития Западно-Сибирской плиты, выделяют три этапа: нижний структурно-тектонический этаж – отвечает эпохе формирования фундамента плиты (от байкальско-каледонской до герцинской), второй структурно-тектонический этаж – парагеосинклинальный этап развития территории (~ триас), третий структурно-тектонический этаж – платформенная стадия развития территории (мезозойско-кайнозойский возраст) [5, 14].

Тектоническое строение территории полуострова Ямал сложное, неоднородное и слабо изучено. Мощности платформенного чехла колеблются от сотен до тысяч метров. Однако, для изучения инженерной составляющей, необходимы данные преимущественно о породах верхней части платформенного чехла, сложенной четвертичными отложениями. Почти все структуры мезокайнозойского чехла достаточно интенсивно и унаследовано развивались в новейшее время. Они контролировали условия осадконакопления и в кайнозойское время, что, безусловно, нашло отражение в их строении, составе и мощности. В том числе, этот фактор нашел выраженность в формировании современного рельефа, в частности в пространственном распределении абсолютных высот местности, площадном развитии различных геоморфологических уровней, степени их заозеренности и т.д. Эти факторы имеют, несомненно, важнейшее инженерно-геологическое значение.

Среди новейших тектонических движений выделяется два типа [14]. Первые, или региональные новейшие движения, которые охватывают огромные пространства на севере Западно-Сибирской плиты, воздействовали на трансгрессии и регрессии моря, что несомненное оказало влияние на формирование толщ морских четвертичных отложений [14]. Роль в рельефообразовании состоит в создании следующих уровнях рельефа – морские,

лагунно-морские, озерные и аллювиальные. Параллельно с первым типом новейших тектонических движений проходит второй, или локальный. Именно эти движения привели к формированию неоднородных мощностей одинаковых по генезису и одновозрастных четвертичных отложений, а также обусловил различное строение и степень эрозионного расчленения одинаковых по возрасту и генезису геоморфологических уровней [14]. Сильно расчлененные участки приурочены к локальным и значительным по площади поднятиям, а наибольшие по мощности четвертичные отложения расположены в отрицательных структурах.

Территория полуострова также сочетает в себе относительно небольшой размах амплитуд новейших тектонических движений (~220-250 м). Именно в пределах Байдарацкой и Обской губ амплитуда опускания достигает 150-200 м. Центральные же районы северного Ямала, западные районы центральной части, а также район возвышенности Хой испытали в новейшее время значительные поднятия. Их суммарная амплитуда в данных районах составляет 50-75 м. [14]

2.1 Геоморфология участка

Полуостров Ямал имеет молодой аккумулятивный равнинный рельеф, главной причиной развития которого стали устойчивые прогибания территории на протяжении большей части мезозоя и кайнозоя [14]. Формирование современного рельефа приурочено к концу среднего плейстоцена, в течение которого территория находилась под влиянием морских трансгрессий. В связи с установившейся палеогеографической обстановкой, характерной особенностью полуострова стало его ступенчатое строение (морские аккумулятивные террасы). Характер рельефа преимущественно плоский. Таким образом, на изучаемой территории выделяют четыре террасовых уровня [3, 14]:

- третья морская терраса (абсолютные отметки достигают 25 м, поверхность этой террасы отделена от более молодых уровней четким абразионным уступом, поверхность слабоволнистая),
- вторая морская терраса (абсолютные отметки равняются ~ 20 м, имеет ограниченное распространение на территории полуострова, характер рельефа плоский),
- первая морская терраса (абсолютные отметки достигают 12 м, также имеет ограниченное распространение, имеет плоский рельеф),
- морская лаида (распространена по окраинам Ямала и прослеживается вдоль всего побережья, абсолютные отметки колеблются в пределах 2 – 5 м, поверхность лаиды характеризуется сильной заозеренностью).

В современном рельефе дна Байдарацкой губы выделяются формы как субаэрального, так и субаквального генезиса [8]. Субаквальный рельеф в большей степени выражен на глубинах от 0 до 15 м, следовательно, в зоне наиболее интенсивного гидродинамического и ледового воздействия на дно, где формируются подводные ложбины, отмели и т.д [4].

Подводный береговой склон исследуемой территории представляет собой наклонную абразионную равнину на глубинах ~ 6 – 8 м. В средней части профиля на глубине 5 – 6 м встречается ступень, которая соответствует глубине морской границы волноприбойной зоны ежегодно повторяющихся штормов. Области аккумуляции в пределах прибрежной зоны ограничены пологонаклонными мелководьями, заливами и закрытыми лагунами, а также приустьевыми участками, вблизи которых встречаются конуса выноса песчано-алевролитового материала. В приурезовой части выделяют обширные ветровые и приливные осушки, максимальные размеры которых приходятся на мелководные заливы. Зачастую осушки сочетаются с серией из нескольких (2-4) подводных береговых валов, положение которых не всегда выдержано по простиранию. [3, 4]

В пределах подводного склона с поверхности расположены наиболее пестрые по гранулометрическому составу прибрежно-морские осадки, характер распределения которых соответствует условиям гидродинамики района. Для них типично волновое распределение гранулометрических типов. Также преобладают хорошо отсортированные песчаные разности, сочетающиеся в разрезе и плане с супесчано-суглинистыми прослоями. В затишных гидродинамических условиях можно встретить инверсионное распределение наносов по крупности, таким образом, вблизи берега отлагается относительно тонкозернистый материал. [3, 5]

За береговым склоном вне зоны активного волнового воздействия (до глубины 15 – 20 м) следует слабонаклонная террасовидная слабонаклонная абразионно-аккумулятивная равнина. По мере нарастания глубины ведущую роль в перемещении наносов начинают играть приливо-отливные и другие течения. Поверхность абразионно-аккумулятивной равнины сложена множеством положительных форм, количество которых значительно увеличивается в южной части губы. Преобладающе большинство этих форм является волновыми аккумулятивными образованиями – подводными валами, частично или полностью перекрытыми позднеголоценовыми осадками. Сложены они мелкопесчаным и алевритовым материалом, а их подошва часто наложена на глинистые толщи. Помимо выделенной равнины следует отметить валообразные, косовидные и клювовидные образования длиной до 10 – 15 км и шириной до 2 – 3 км. Высота образований достигает 2 м.

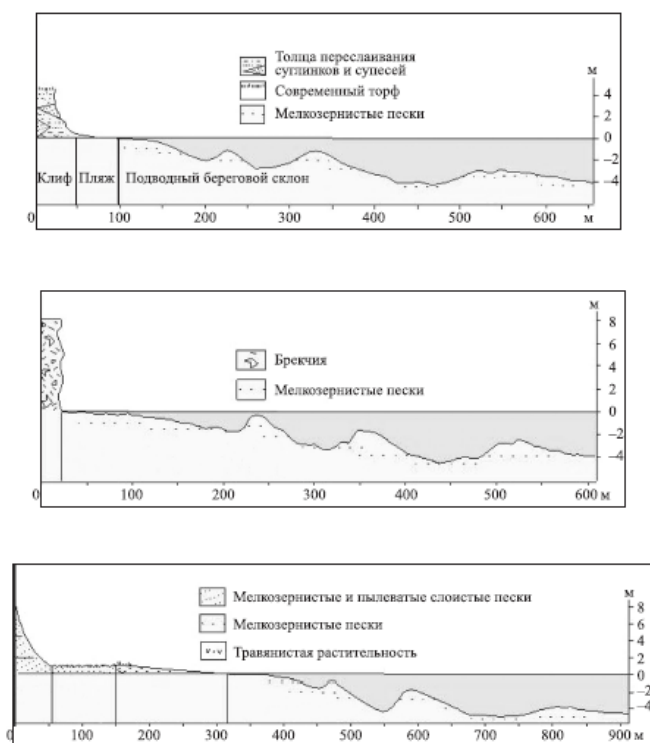


Рис. 3. Схематические разрезы берега с мелководьями [3]

По данным некоторых исследователей морфология, литология и пространственное размещение вышеперечисленных образований дают основания считать их древними береговыми формами, сформированными в периоды стабилизации уровня моря в ходе послеледниковой трансгрессии, которая протекала на фоне колебаний ледовитости моря и носила дискретный характер [3, 4, 5, 10]. Серии данных форм прослеживаются на различных гипсометрических уровнях и позволяют выделить фрагменты древних береговых линий на следующих глубинах – 10 – 12, 13 – 15, 17 – 19, 21 – 23, 25 – 27 м [3].

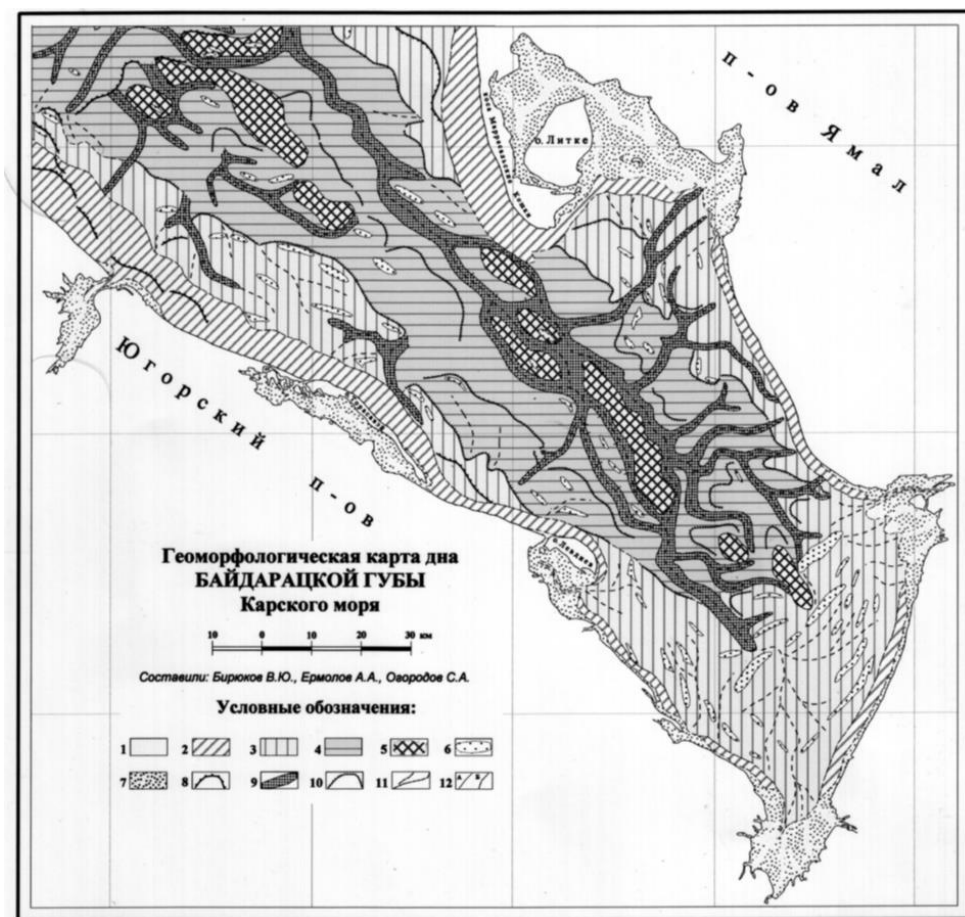


Рис. 2. Геоморфология дна Байдарацкой губы Карского моря: I — основные типы рельефа дна: 1 — пологонаклонные прибрежные аккумулятивные равнины (мелководья, закрытые лагуны и заливы) (Q_4); 2 — наклонные абразионные равнины в зоне современного волнового воздействия (Q_4); 3 — слабонаклонные абразионно-аккумулятивные равнины вне зоны активного волнового воздействия (Q_4); 4 — пологонаклонные, преимущественно аккумулятивные, вторично расчлененные равнины вне зоны активного волнового воздействия (Q_{3-4}); II — отдельные элементы и формы рельефа дна: 5 — крупные положительные формы субаэрального рельефа; 6 — аккумулятивные донные формы; 7 — ветровые и приливные осушки; 8 — абразионные уступы; фрагменты древней флювиальной сети: 9 — ложбины субаэрального происхождения (фрагменты затопленных долин); 10 — эрозионные уступы; 11 — тальвеги; III — прочие обозначения: 12 — геоморфологические границы (А — четкие, и Б — нечеткие)

Рис. 4. Геоморфология дна Байдарацкой губы Карского моря [3]

Одинаково с аккумулятивными процессами волновая деятельность затопляемой территории сопровождалась созданием абразионных уровней, о чем свидетельствует характерный ступенчатый профиль равнины и подводного берегового склона в северной части Байдарацкой губы. Абразионные уступы длиной до 35 км ориентированы в соответствии с положением изобат и отмечаются на глубине 10 – 11, 15 – 16, 20 – 22, 25 – 27, 30 – 32, 37 – 38. [3, 4]

Наибольшую часть дна Байдарацкой губы, которая расположена вне волнового воздействия, занимает пологонаклонная аккумулятивная вторично расчлененная равнина. С поверхности она перекрыта толщей глинистых грунтов. Морфология данной территории с регрессивным этапом развития шельфа Карского моря и глубоким эрозионным расчленением осушенной поверхности крупными и мелкими водотоками. Специфика перигляциальной обстановки выражалась в активизации криогенных, эоловых и склоновых процессов, развитии термоэрозии и термокарста, что способствовало увеличению сноса терригенного материала с суши. [4, 14]

Помимо вышеперечисленных форм рельефа дна Байдарацкой губы нельзя не отметить микроформы, которые формируются под экзарационным воздействием деформированных морских льдов. Некоторые авторы приводят исследования, связанные с динамической деформацией ледового покрова и ледовыми нагромождениями, которые формируют различные образования, например, наслоения, отдельные торосы и их гряды, несяки, стамухи. Данные микроформы характерны для Байдарацкой губы и могут занимать до 2/3 площади акватории в зависимости от особенностей атмосферной циркуляции в тот или иной сезон. Под воздействием течений и ветра подводные части ледяных образований способны врезаться в донный грунт, тем самым образуя борозды и углубления различной глубины, ширины, длины ориентировки. Такие деформации встречаются повсеместно и имеют глубину до 1,5 м, а ширину до 40 м. [3, 12]

Береговая линия простирается в северо-западном направлении, часто представляет собой абразионный обрыв высотой от 5–6 до 25–30 м, отделенный от моря узкой полосой пляжа, частично затопляемой приливами. Средняя высота их составляет 0,8 м, сизигийные приливы могут достигать величины 1,5 м. [3]

2.2. Состав и строение грунтов

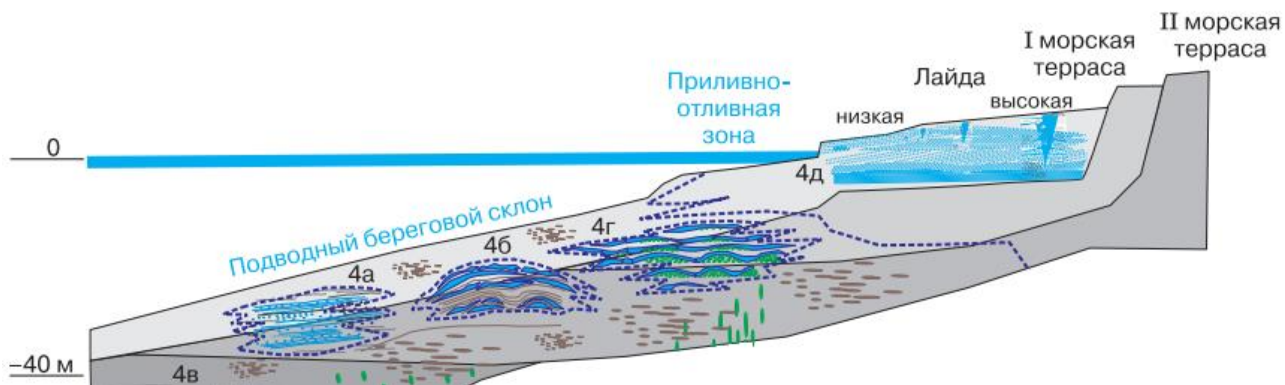


Рис. 5. Схематическое изображение геолого-геоморфологического строения прибрежной зоны исследуемых участков [1].

Морские отложения лайды (mQIV), развитые вдоль побережья Карского моря, представлены супесчано-суглинистыми и глинистыми породами с прослоями пылеватых песков. Суглинки, как правило, тяжелые, темно-серого цвета, слоистые. Часто в суглинке наблюдаются включения органики [14]. Слоистость четкая, горизонтальная. Пески зачастую заилены.

Отложения 1-ой морской террасы (mQIII) широко распространены по территории полуострова и представлены песками пылеватыми и суглинками. Пески и песчаная фракция глинистых пород являются кварцевыми, а среди глинистых минералов отмечается преобладание гидрослюд с редким включением монтмориллонита и каолинита [14].

Отложения 2-ой морской террасы (mQII) представлены представлены песками пылеватыми и суглинками. Для данного комплекса характерны следующие закономерности: 1) наличие в большинстве районов песчано-супесчаной пачки мощностью 1 – 3 м, которая сформировалась в регрессивный период и 2) возрастание дисперсности разрезов с продвижением на север [14]. Пески в основном кварцевые, глинистые же породы имеют преимущественно гидрослюдистый состав, в меньших количествах встречаются монтмориллониты и каолиниты.

Криогенная текстура представляет собой неполносетчатую среднешлифовую.

Отметки кровли многолетнемерзлых пород на территории полуострова сильно разнятся. В пределах разреза I-I (рис. 6.) кровля ММП составляет примерно -2 – -5,5 м в прибрежной части, однако, наблюдается тенденция к их уменьшению по мере удаления от берега, где отметки составляют от -6 до -30 м.

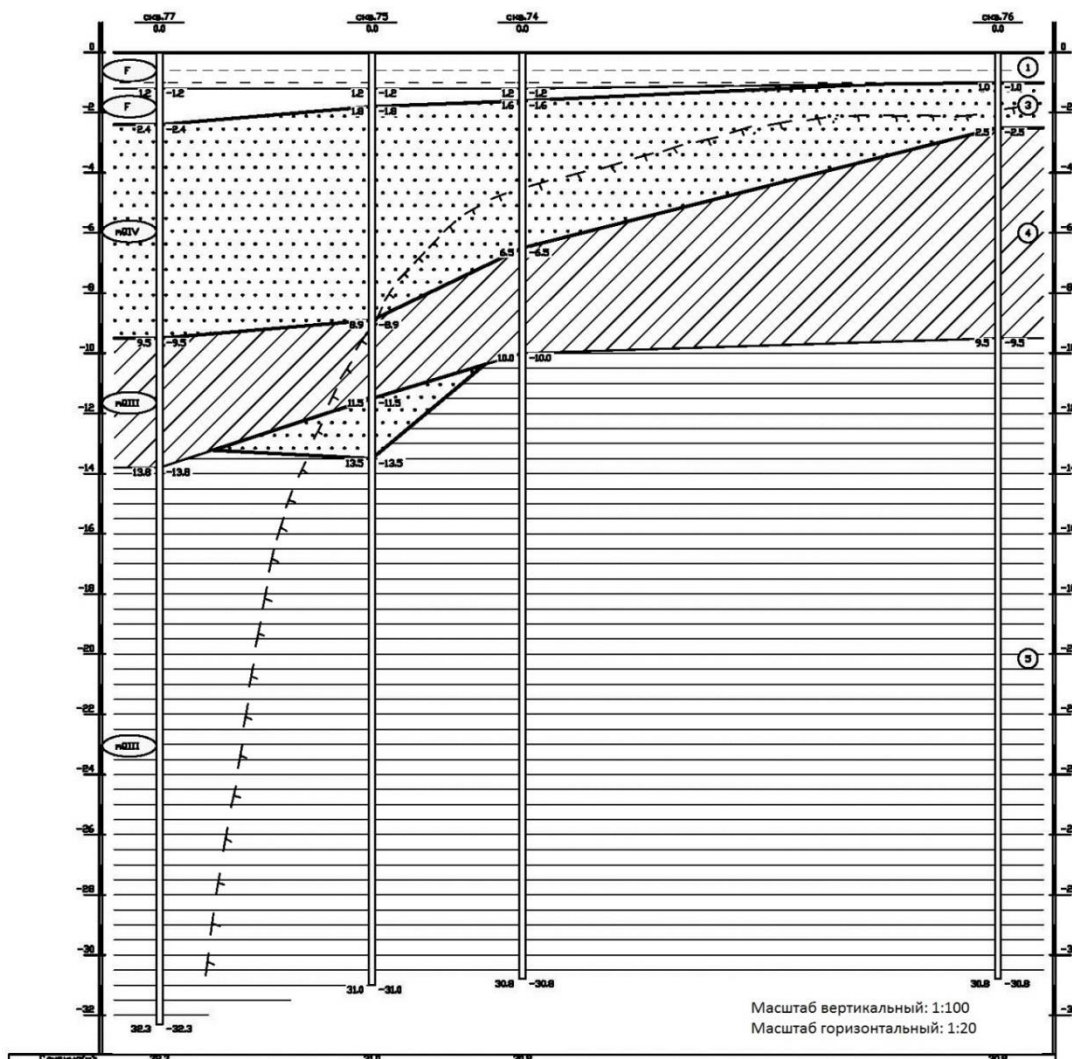


Рис. 6. Разрез I-I. Условные обозначения: F1 – лед, F2 – вода, mQIV – песок, mQIII – суглинок, mQII – глина, пунктиром отмечена граница ММП. Выполнено с помощью FoxGIS, AutoCAD.

Морские отложения лайды (mQIV), развитые вдоль побережья Карского моря, представлены супесчано-суглинистыми и глинистыми породами с прослоями пылеватых песков. Суглинки, как правило, тяжелые, темно-серого цвета, слоистые. Часто в суглинке наблюдаются включения органики [14]. Слоистость четкая, горизонтальная. Пески зачастую заилены.

Отложения 1-ой морской террасы (mQIII) широко распространены по территории полуострова и представлены песками пылеватыми и супесями с суглинками. Пески и песчаная фракция глинистых пород являются кварцевыми, а среди глинистых минералов отмечается преобладание гидрослюд с редким включением монтмориллонита и каолинита [14].

Отложения 2-ой морской террасы (mQII) представлены представлены песками пылеватыми и супесями с суглинками. Для данного комплекса характерны следующие

закономерности: 1) наличие в большинстве районов песчано-супесчаной пачки мощностью 1 – 3 м, которая сформировалась в регрессивный период и 2) возрастание дисперсности разрезов с продвижением на север [14]. Пески в основном кварцевые, глинистые же породы имеют преимущественно гидрослюдистый состав, в меньших количествах встречаются монтмориллониты и каолиниты.

Криогенная текстура представляет собой неполносетчатую среднешлировую.

В пределах разреза II-II (рис. 7.) отметки кровли ММП составляют примерно -2 м в прибрежной части, при этом, по мере удаления от берега изменения в отметках кровли являются незначительными ~ -8,5 м.

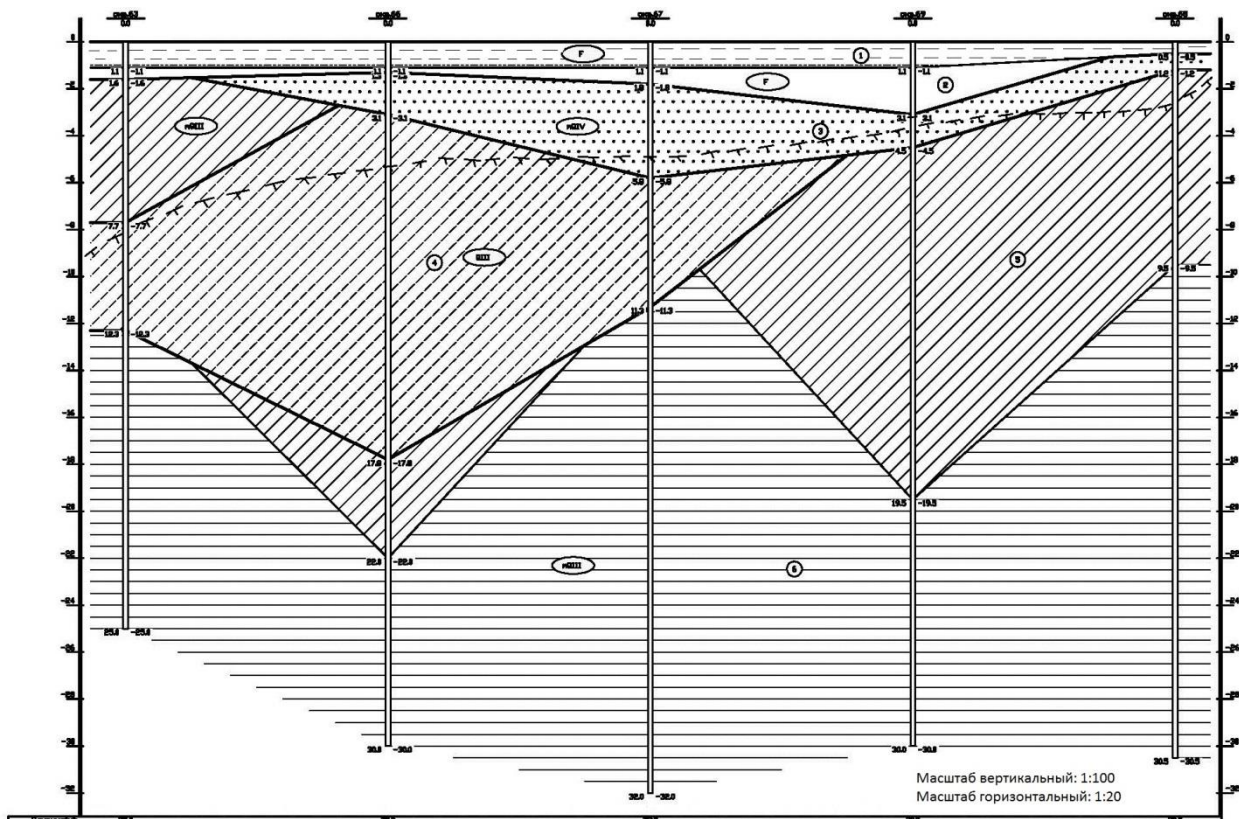


Рис. 7. Разрез II-II. Условные обозначения: F1 – лед, F2 – вода, mQIV – песок, mQIII – супесь, mQII – суглинок, mQI – глина, пунктиром отмечена граница ММП. Выполнено с помощью FoxGIS, AutoCAD.

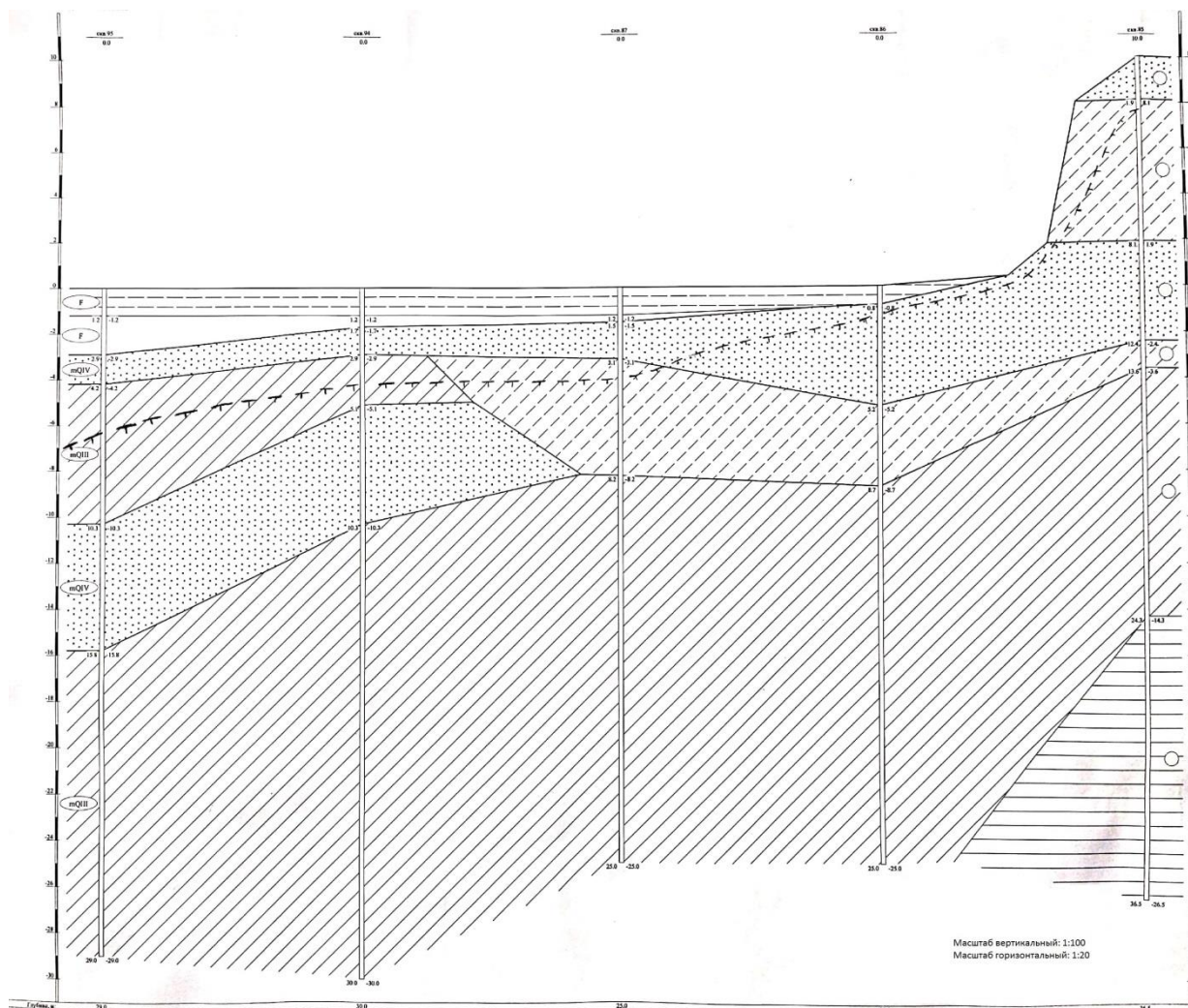


Рис. 8. Разрез III-III. Условные обозначения: F1 – лед, F2 – вода, mQIV – песок, mQIII – супесь, mQII – суглинок, mQI – глина, пунктиром отмечена граница ММП. Выполнено с помощью FoxGIS, AutoCAD.

Данный разрез (рис. 8.) построен с необходимостью для выполнения расчетов глубин оттаивания грунтов под сооружением по СП 25.13330.2012 [16], так как он имеет скважину, расположенную на берегу Байдарацкой губы.

Береговой выступ сложен отложениями 1-ой морской террасы (mQIII), которые широко распространены по территории полуострова и представлены песками пылеватыми и супесями с суглинками. Пески и песчаная фракция глинистых пород являются кварцевыми, а среди глинистых минералов отмечается преобладание гидрослюд с редким включением монтмориллонита и каолинита [14].

Криогенная текстура представляет собой неполносетчатую среднешлировую.

В пределах разреза III-III (рис. 8.) отметки кровли ММП составляют примерно 8 м в береговой части, по мере удаления от берега изменения в отметках кровли составляют ~ от -1 до -8,5 м.

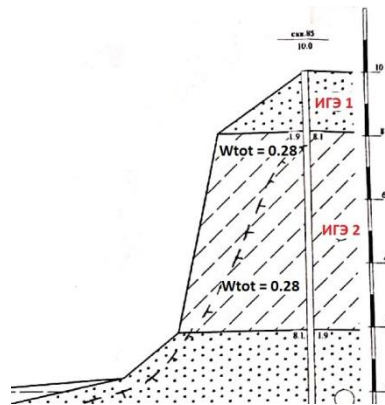


Рис. 11. Разрез III-III с разделением на инженерно-геологические элементы

Как было сказано выше, данный разрез (рис. 11.) построен с необходимостью для выполнения расчетов глубин оттаивания грунтов под сооружением по СП 25.13330.2012, так как он имеет скважину, расположенную на берегу Байдарацкой губы. Полного разделения разреза на ИГЭ выполнить не удалось из-за недостаточного количества информации, однако, для выполнения расчетов глубин оттаивания грунтов под сооружением был необходим ИГЭ 2, который представлен супесями, средний показатель суммарной влажности которых составляет $\sim 0,28$. Мощность отложений составляет ~ 6 м.

Глава 3. Прогноз взаимодействия газопровода и сопутствующих сооружений инфраструктуры с многолетнемерзлыми породами на побережье Байдарацкой губы

3.1. Расчет нормативной глубины сезонного оттаивания

Помимо описания физических свойств грунтов, которыми непосредственно представлен изучаемый участок, были выполнены расчеты нормативной глубины сезонного оттаивания.

Сезонное оттаивание представляет собой протаивание мёрзлых грунтов, имеющих среднюю годовую температуру ниже 0°C. Слой сезонного оттаивания подстилается многолетнемерзлыми грунтами и образуется за счет теплообмена при положительных температурах.

При проектировании различают нормативные и расчетные глубина сезонного оттаивания и промерзания. Нормативная глубина оттаивания определяется как наибольшая его глубина, наблюдаемая за срок не менее 10 лет на участках, где слой сезоннопромерзающего-оттаивающего грунта сливается с ММП. Нормативная глубина сезонного оттаивания и промерзания должна быть рассчитана в условиях отсутствия снежного, растительного покрова.

Таким образом, нормативная глубина сезонного оттаивания $d_{th,n}$ рассчитывается по формуле [16]:

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

где Q – теплоток в мерзлые породы (тепло, расходуемое на летний обогрев ММП), ккал/м²; q_1 – количество открытой теплоты, поглощаемой при плавлении льда, содержащегося в породе, ккал/м³;

$$Q = \left(0,25 - \frac{t_{th,c}}{t_1}\right) (T_0 - T_{bf}) k_m \sqrt{\lambda_f C_f t_{th,c}};$$
$$q_1 = L_v + \left(\frac{t_{th,c}}{t_2} - 0,1\right) [C_{th}(T_{th,c} - T_{bf}) - C_f(T_0 - T_{bf})];$$

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

$$t_{th,c} = 1,15 * t_{th,m} + 0,1 * t_1;$$

t_1 – время, принимаемое равным 3600 ч; t_2 - время, принимаемое равным 7500 ч; $T_{th,c}$ – расчетная температура поверхности грунта в летний период, °С, определяемая по формуле

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

$T_{th,m}$ и $t_{th,m}$ – средние по многолетним данным температура воздуха за период положительных температур, °С, и продолжительность этого периода, ч, принимаются по СП 131.13330.2012

[16]; T_0 – расчетная среднегодовая температура ММП, °С (следует принять равной температуре на глубине нулевой амплитуды);

C_f и C_{th} – объемная теплоемкость, соответственно, мерзлого и талого грунта, Дж/(м³*°С) [ккал/(м³*°С)];

λ_f и λ_{th} – теплопроводность, соответственно, мерзлого и талого грунта, Вт/(м*°С) [ккал/(м*ч*°С)];

km – коэффициент, принимаемый для песчаных пород равным 1,0, а для пылевато-глинистых – по табл. П4.2 в зависимости от значения теплоемкости C_f и средней температуры грунта \bar{T} , °С [16].

L_v – теплота таяния (замерзания) грунта, Дж/м³ [ккал/м³], определяемая при температуре грунта, равной 0,5 \bar{T} , °С.

Исходя из имеющихся данных, становится возможным сделать расчеты для исследуемых участков:

1) Разрез I-I, супесь

w_{tot}	ρ_f	ρ_d	λ_{th}	λ_f	C_{th}	C_f	T_{bf}	T_0	km
0.27	1890	1488	1.86	1.97	511.1	411.1	-0.15	-4.0	3,7

$$t_{th,c} = 1.15 * 4 * 720 + 0.1 * 3600 = 3672$$

$$T_{th,c} = 1.4 * 10.3 + 2.4 = 16.8$$

$$\bar{T} = (-4,0 + 0.15) * \left(\frac{13672}{3600} - 0.22 \right) = -3,1$$

$$L_v = 93 * (0.27 - 0.17) * 1488 = 13838.4 \text{ ккал/м}^3$$

$$Q = \left(0.25 - \frac{3672}{3600} \right) * (-4.0 + 0.15) * 3.7 * \sqrt{1.97 * 411.1 * 3672} = -0.77 * (-3.85) * 3.7 * 1724.48 =$$

$$18915.2 \text{ ккал/м}^2$$

$$q_1 = 13838.4 + \left(\frac{3672}{7500} - 0.1 \right) * (511.1 * (16.8 + 0.15) - 411.1 * (4.0 + 0.15)) = 16551.63 \text{ ккал/м}^3$$

$$d_{th,n} = \sqrt{\frac{2 * 1,86 * (16,8 - 0,15) * 3672}{16551.63} + \left(\frac{18915.2}{2 * 16551.63} \right)^2} - \frac{18915.2}{2 * 16551.63} = 3.2 \text{ м}$$

2) Разрез I-I, суглинок

w_{tot}	ρ_f	ρ_d	λ_{th}	λ_f	C_{th}	C_f	T_{bf}	T_0	km
0.27	1900	1496	1.68	1.86	511.1	411.1	-0.15	-4.0	3.7

$$t_{th,c} = 1.15 * 4 * 720 + 0.1 * 3600 = 3672$$

$$T_{th,c} = 1.4 * 10.3 + 2.4 = 16.8$$

$$\bar{T} = (-4.0+0.15)*\left(\frac{13672}{3600}-0.22\right) = -3.1$$

$$L_v = 93*(0.27-0.17)*1496 = 13912.8 \text{ ккал/м}^3$$

$$Q = \left(0.25-\frac{3672}{3600}\right)*(-4.0+0.15)*3.7*\sqrt{1.86 * 411.1 * 3672} = -0.77*(-3.85)*3.7*1675.6 =$$

$$18379.1 \text{ ккал/м}^2$$

$$q_1 = 13912.8 + \left(\frac{3672}{7500}-0.1\right)*(511.1(16.8+0.15) - 411.1(4.0+0.15)) = 16626 \text{ ккал/м}^3$$

$$d_{th,n} = \sqrt{\frac{2*1,68*(16,8+0,15)*3672}{16626} + \left(\frac{18379.1}{2*16626}\right)^2} - \frac{18379.1}{2*16626} = 3 \text{ м}$$

3) Разрез II-II, супесь

W_{tot}	ρ_f	ρ_d	λ_{th}	λ_f	C_{th}	C_f	T_{bf}	T_0	km
0.22	1830	1500	1.80	1.91	875	652.7	-0.15	-4.0	2.5

$$t_{th,c} = 1.15*4*720+0.1*3600 = 3672$$

$$T_{th,c} = 1.4*10.3+2.4 = 16.8$$

$$\bar{T} = (-4.0+0.15)*\left(\frac{13672}{3600}-0.22\right) = -3.1$$

$$L_v = 93*(0.22-0.17)*1500 = 6975 \text{ ккал/м}^3$$

$$Q = \left(0.25-\frac{3672}{3600}\right)*(-4.0+0.15)*2.5*\sqrt{1.91 * 652.7 * 3672} = -0.77*(-3.85)*2.5*2139.56 =$$

$$15856.8 \text{ ккал/м}^2$$

$$q_1 = 6975 + \left(\frac{3672}{7500}-0.1\right)*(875(16.8+0.15) - 652.7(4.0+0.15)) = 11710.4 \text{ ккал/м}^3$$

$$d_{th,n} = \sqrt{\frac{2*1,80*(16,8+0,15)*3672}{11710.4} + \left(\frac{15856.8}{2*11710.4}\right)^2} - \frac{15856.8}{2*11710.4} = 3.75 \text{ м}$$

4) Разрез II-II, суглинок

W_{tot}	ρ_f	ρ_d	λ_{th}	λ_f	C_{th}	C_f	T_{bf}	T_0	km
0.28	1860	1453	1.68	1.86	511.1	411.1	-0.15	-4.0	3.7

$$t_{th,c} = 1.15*4*720+0.1*3600 = 3672$$

$$T_{th,c} = 1.4*10.3+2.4 = 16.8$$

$$\bar{T} = (-4.0+0.15)*\left(\frac{13672}{3600}-0.22\right) = -3.1$$

$$L_v = 93*(0.28-0.17)*1453 = 14864.2 \text{ ккал/м}^3$$

$$Q = (0.25 - \frac{3672}{3600}) * (-4.0 + 0.15) * 3.7 * \sqrt{1.86 * 411.1 * 3672} = -0.77 * (-3.85) * 3.7 * 1675.6 =$$

18379.1 ккал/м²

$$q_1 = 14864.2 + (\frac{3672}{7500} - 0.1) * (511.1(16.8 + 0.15) - 411.1(4.0 + 0.15)) = 17577.43 \text{ ккал/м}^3$$

$$d_{th,n} = \sqrt{\frac{2 * 1.68 * (16.8 + 0.15) * 3672}{17577.43} + (\frac{18379.1}{2 * 17577.43})^2} - \frac{18379.1}{2 * 17577.43} = 3 \text{ м}$$

5) Разрез III-III, супесь

W _{tot}	p _f	p _d	λ _{th}	λ _f	C _{th}	C _f	T _{bf}	T ₀	km
0.28	1900	1484	1.86	1.97	511.1	411.1	-0.15	-4.0	3.7

$$t_{th,c} = 1.15 * 4 * 720 + 0.1 * 3600 = 3672$$

$$T_{th,c} = 1.4 * 10.3 + 2.4 = 16.8$$

$$\bar{T} = (-4.0 + 0.15) * (\frac{13672}{3600} - 0.22) = -3.1$$

$$L_v = 93 * (0.28 - 0.17) * 1484 = 15181.3 \text{ ккал/м}^3$$

$$Q = (0.25 - \frac{3672}{3600}) * (-4.0 + 0.15) * 3.7 * \sqrt{1.97 * 411.1 * 3672} = -0.77 * (-3.85) * 3.7 * 1724.5 =$$

18915.4 ккал/м²

$$q_1 = 15181.3 + (\frac{3672}{7500} - 0.1) * (511.1(16.8 + 0.15) - 411.1(4.0 + 0.15)) = 17894.53 \text{ ккал/м}^3$$

$$d_{th,n} = \sqrt{\frac{2 * 1.86 * (16.8 + 0.15) * 3672}{17894.53} + (\frac{18915.4}{2 * 17894.53})^2} - \frac{18915.4}{2 * 17894.53} = 3.1 \text{ м}$$

Таким образом, нормативная глубина сезонного оттаивания в естественных условиях для супесей составила 3.2 м, 3.75 м и 3.1 м, а для суглинков в первых двух случаях глубина составила 3 м.

3.2. Расчет ореола оттаивания вокруг подземного трубопровода

Прокладка газопровода на дне водоема является технологически сложной задачей. Исследуемая территория сочетает в себе повсеместное распространение многолетнемерзлых пород и неоднородность инженерно-геологических условий. По данным ПАО «Газпром» на долю морских газопроводов сегодня приходится 45% импорта природного газа в Европу [18]. До начала укладки газопровода проводится тщательное исследование дна моря на протяжении всей трассы. Специалистам необходимо обнаружить все потенциальные

препятствия — это и затонувшие корабли, и боеприпасы, и просто большие валуны. При необходимости препятствия либо устраняют, либо проектируют трассу в обход. На этом этапе специалисты также выявляют места, где будет необходимо производить заглубление трубопровода в грунт или его засыпку. Укладка труб на дно моря ведется со специальных трубоукладочных судов. Процесс укладки морского газопровода, как правило, начинается не с берега, как можно было бы подумать, а в море. Газопровод может состоять из нескольких участков, построенных в разное время с разных судов и потом соединенных между собой — ведь на разных участках газопровод должен выдерживать разное давление, а для этого используются трубы с разной толщиной стенок [18]. После завершения строительства морской части трубы протаскивают на берег при помощи специальной лебедки, установленной на суше, которая соединяется с трубой железными тросами и медленно вытягивает ее из моря [18]. Затем трубопровод соединяют с его сухопутной частью.

Подземные трубопроводы – мощные источники тепла, оказывающие большое влияние на температурное поле грунта. В результате температура вмещающей среды повышается, и она теряет прочность. На практике часто наблюдаются деформации зданий, основание которых оказывается в зоне такого влияния. Особенно опасно распространение ореола оттаивания вокруг трубопровода под подошву фундаментов. Кроме того, образование больших ореолов оттаивания опасно и для устойчивости самого трубопровода, поскольку может привести к его недопустимой осадке или всплытию. Таким образом, расчет ореола оттаивания вокруг подземного трубопровода есть неременное условие при его проектировании.

Конструктивные особенности и температурный режим трубопроводов зависят от характера перекачиваемого продукта. Так, нефтепроводы могут эксплуатироваться только при положительной температуре, причем минимальные температуры нефтепровода составляют плюс 5-10°C, так как при более низкой температуре нефть густеет, образуются парафиновые пробки, она становится непригодной для транспортировки. Газопроводы могут иметь как положительную, так и отрицательную температуру.

При подземном способе устройства труба укладывается в траншею, глубина которой назначается не менее $d_{тр} + 0,8$ м, где $d_{тр}$ - внешний диаметр трубопровода [16].

Различают низкотемпературные и высокотемпературные трубопроводы. Первые рассчитывают исходя из образования стационарного температурного поля вокруг трубы, вторые - из нестационарного. К первому или второму виду трубопровод относят исходя из значения безразмерной температуры β_t . Если $\beta_t \geq 0,2$, то трубопровод относят к низкотемпературному. [16]

Глубину оттаивания ММП под центром трубы (рис. 12) определяют по формуле

$$h_n = r_{mp} \sqrt{m^2 - 1} \cdot \frac{e^n + 1}{e^n - 1},$$

где h_n - глубина оттаивания под центром трубы, м; $r_{тр}$ - радиус трубы, м; m - отношение глубины заложения трубы h , считая от дневной поверхности до центра трубы, к ее радиусу $r_{тр}$; n - безразмерный параметр [16].

Мощность мерзлого грунта над центром трубы h_b вычисляют так [16]:

$$h_b = r_{mp} \sqrt{m^2 - 1} \cdot \frac{e^n - 1}{e^n + 1}.$$

Радиус ореола оттаивания вокруг трубы $r_{от}$ находят по формуле [16]

$$r_{от} = 0,5(h_n - h_b).$$

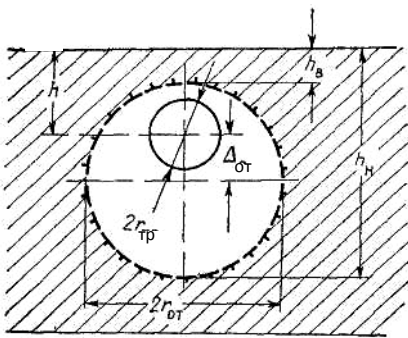


Рис. 12. Схема к расчету ореола оттаивания многолетнемерзлых пород [16]

Для расчета смещения вниз центра ореола оттаивания по отношению к центру трубы используют формулу [16]

$$\Delta_{от} = 0,5 (h_n + h_b) - h;$$

$$n = \frac{2\pi\lambda_{th}\beta_t R_t}{1 + \beta_t},$$

где λ_{th} - теплопроводность грунта в талом состоянии, Вт/(м·°С); β_t - безразмерная температура [16]:

$$\beta_t = -\frac{\lambda_f T_0}{\nu \lambda_{th} T_c};$$

λ_f - теплопроводность грунта в мерзлом состоянии, Вт/(м·°С); T_0 - среднегодовая температура грунта на подошве слоя сезонного оттаивания, °С (вне застроенной территории принимается равной температуре грунта на глубине 10 м); ν - коэффициент, учитывающий работу трубопровода неполным сечением (определяется по данным таблицы Приложения 7 [16], для напорных трубопроводов $\nu=1$); T_c - температура транспортируемой среды, °С; R_t - термическое сопротивление теплопередаче, (м²·°С)/Вт [16]:

$$R_t = \frac{1}{2\pi\lambda_{th}} \cdot \ln\left(m + \sqrt{m^2 - 1}\right)$$

Для укладки трубы были выбраны следующие условия – глубина заложения трубы 6 м, диаметр трубы 1,2 м, радиус 0,6 м. Температура транспортируемой среды составляет 10 °С.

1) Разрез I-I, супесь

d	r	h	Tс	m	λ_{th}	λ_f
1.2	0.6	6	10	10	1.97	1.86

$$R_t = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 1.86} * \ln(10 + \sqrt{100 - 1}) = 0.09 \cdot 3 = 0.27 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$$

$$\beta = -\frac{1.97 \cdot (-4.0)}{1 \cdot 1.86 \cdot 10} = 0.42$$

$$n = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 1.86 \cdot 0.42 \cdot 0.27}{1 + 0.42} = 0.93$$

$$h_H = 0.6 \cdot \sqrt{100 - 1} * \frac{e^{0.93} + 1}{e^{0.93} - 1} = 0.6 \cdot 9.95 \cdot 2.3 = 13.7 \text{ м}$$

$$h_B = 0.6 \cdot \sqrt{100 - 1} * \frac{e^{0.93} - 1}{e^{0.93} + 1} = 0.6 \cdot 9.95 \cdot 0.43 = 2.6 \text{ м}$$

$$r_{от} = 0.5 \cdot (13.7 - 2.6) = 5.55 \text{ м}$$

$$\Delta_{от} = 0.5 \cdot (13.7 + 2.6) - 6 = 2.2 \text{ м}$$

Таким образом, глубина оттаивания грунта под центром трубы составляет 13.7 м, радиус ореола оттаивания составляет 5.55 м, а смещение центра ореола оттаивания по отношению к центру трубы составляет 2.2 м.

2) Разрез I-I, суглинок

d	r	h	Tс	m	λ_{th}	λ_f
1.2	0.6	6	10	10	1.68	1.86

$$R_t = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 1.68} * \ln(10 + \sqrt{100 - 1}) = 0.09 \cdot 3 = 0.27 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$$

$$\beta = -\frac{1.86 \cdot (-4.0)}{1 \cdot 1.68 \cdot 10} = 0.44$$

$$n = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 1.68 \cdot 0.44 \cdot 0.27}{1 + 0.44} = 0.86$$

$$h_H = 0.6 \cdot \sqrt{100 - 1} \cdot \frac{e^{0.86} + 1}{e^{0.86} - 1} = 0.6 \cdot 9.95 \cdot 2.47 = 14.7 \text{ м}$$

$$h_B = 0.6 \cdot \sqrt{100 - 1} \cdot \frac{e^{0.86} - 1}{e^{0.86} + 1} = 0.6 \cdot 9.95 \cdot 0.4 = 2.4 \text{ м}$$

$$r_{OT} = 0.5 \cdot (14.7 - 2.4) = 6.15 \text{ м}$$

$$\Delta_{OT} = 0.5 \cdot (14.7 + 2.4) - 6 = 2.5 \text{ м}$$

Таким образом, глубина оттаивания грунта под центром трубы составляет 14.7 м, радиус ореола оттаивания составляет 6.15 м, а смещение центра ореола оттаивания по отношению к центру трубы составляет 2.5 м.

3) Разрез II-II, супесь

d	r	h	Tc	m	λth	λf
1.2	0.6	6	10	10	1.9	1.80

$$R_t = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 1.80} \cdot \ln(10 + \sqrt{100 - 1}) = 0.09 \cdot 3 = 0.27 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$$

$$\beta = -\frac{1.91 \cdot (-4.0)}{1 \cdot 1.80 \cdot 10} = 0.42$$

$$n = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 1.80 \cdot 0.42 \cdot 0.27}{1 + 0.42} = 0.9$$

$$h_H = 0.6 \cdot \sqrt{100 - 1} \cdot \frac{e^{0.9} + 1}{e^{0.9} - 1} = 0.6 \cdot 9.95 \cdot 2.37 = 14.2 \text{ м}$$

$$h_B = 0.6 \cdot \sqrt{100 - 1} \cdot \frac{e^{0.9} - 1}{e^{0.9} + 1} = 0.6 \cdot 9.95 \cdot 0.42 = 2.5 \text{ м}$$

$$r_{OT} = 0.5 \cdot (14.2 - 2.5) = 5.85 \text{ м}$$

$$\Delta_{OT} = 0.5 \cdot (14.2 + 2.5) - 6 = 2.4 \text{ м}$$

Таким образом, глубина оттаивания грунта под центром трубы составляет 14.2 м, радиус ореола оттаивания составляет 5.85 м, а смещение центра ореола оттаивания по отношению к центру трубы составляет 2.4 м.

4) Разрез II-II, суглинок

d	r	h	Tc	m	λth	λf
1.2	0.6	6	10	10	1.68	1.86

$$R_t = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 1.68} \cdot \ln(10 + \sqrt{100 - 1}) = 0.09 \cdot 3 = 0.27 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$$

$$\beta = -\frac{1.86 \cdot (-4.0)}{1 \cdot 1.68 \cdot 10} = 0.44$$

$$n = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 1.68 \cdot 0.44 \cdot 0.27}{1 + 0.44} = 0.86$$

$$h_n = 0.6 \cdot \sqrt{100 - 1} \cdot \frac{e^{0.86} + 1}{e^{0.86} - 1} = 0.6 \cdot 9.95 \cdot 2.47 = 14.7 \text{ м}$$

$$h_b = 0.6 \cdot \sqrt{100 - 1} \cdot \frac{e^{0.86} - 1}{e^{0.86} + 1} = 0.6 \cdot 9.95 \cdot 0.4 = 2.4 \text{ м}$$

$$r_{от} = 0.5 \cdot (14.7 - 2.4) = 6.15 \text{ м}$$

$$\Delta_{от} = 0.5 \cdot (14.7 + 2.4) - 6 = 2.5 \text{ м}$$

Таким образом, глубина оттаивания грунта под центром трубы составляет 14.7 м, радиус ореола оттаивания составляет 6.15 м, а смещение центра ореола оттаивания по отношению к центру трубы составляет 2.5 м.

3.3. Расчет глубины оттаивания грунтов под сооружением по СП 25.13330.2012

В ходе разведки и освоения месторождения необходимо создание сопутствующей инфраструктуры. К таковой можно отнести дома рабочего поселка, склады, необходимые коммуникации и так далее. Площадка для строительства была определена на суглинистых грунтах, так как глубина их залегания, мощность распространения и суммарная влажность позволяют выполнить изыскания для дальнейшего развития инфраструктуры.

Главнейшей особенностью проектирования на ММП является необходимость учета теплового воздействия сооружения на температурное поле и свойства грунтов основания вплоть до формирования чаши протаивания (рис. 13). Определение глубины оттаивания грунтов под сооружениями (или размеров чаши оттаивания) часто выполняют при выборе принципа использования грунтов основания и для расчета осадок фундаментов на оттаивающих грунтовых основаниях (принцип II) [16]. Положение границы чаши оттаивания под зданием или сооружением для выявления неравномерности осадки основания необходимо определять, как правило, на конец эксплуатационного периода.

Расчет глубины оттаивания грунтов H в основании сооружения (считая от поверхности грунта под сооружением), за время его эксплуатации τ , производится по формулам [16]:

под серединой сооружения

$$H_c = k_n (\xi_c - k_c) B;$$

под краем сооружения

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

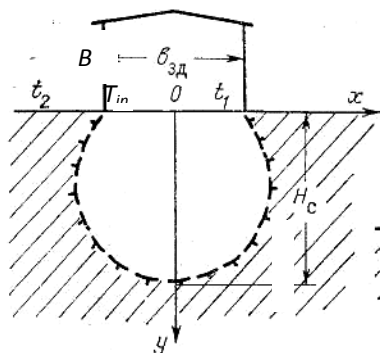


Рис. 13. Схема к расчету чаши оттаивания в многолетнемерзлых породах сливающегося типа [16]

где H_c и H_e — глубина оттаивания грунтов, соответственно, под серединой и краем сооружения, м; k_n — коэффициент, определяемый по табл. Пб.1 в зависимости от отношения L/B (соответственно длина и ширина сооружения, м) и значений параметров β и Ψ ; ξ_c , k_c и ξ_e , k_e — коэффициенты, определяемые по графикам (рис. Пб.1 и Пб.2) [16] в зависимости от значений параметров α_R , β и Ψ [16]:

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

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

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

здесь λ_{th} и λ_f — соответственно коэффициенты теплопроводности талого и мерзлого грунта, Вт/(м·°С); R_0 — сопротивление теплопередаче пола первого этажа или подвала сооружения, м²·°С/Вт (м²·°С·ч/ккал); T_0 — расчетная среднегодовая температура ММП на подошве слоя сезонного оттаивания вне контура здания, °С, (в заданиях принять равной температуре на глубине нулевой амплитуды); T_{bf} — температура начала замерзания грунта, °С; T_{in} — расчетная температура воздуха внутри сооружения, °С; τ — продолжительность расчетного периода, ч; L_v — теплота таяния мерзлого грунта, Вт·ч/м³.

1)

L	B	t	τ	λ_{th}	λ_f	R_0	k_n	ξ_c	k_c	ξ_e	k_e
24	12	17	15	1.86	1.97	1.4	0.73	1.15	0.22	0.88	0.22

$$\Psi = \frac{1.86 \cdot 17 \cdot 131400}{144 \cdot 15181.3} = 3$$

$$\beta = -\frac{1.97 \cdot (-4 + 0.15)}{1.86 \cdot (18 + 0.15)} = 0.2$$

$$\alpha_R = \frac{1.86 \cdot 1.4}{12} = 0.2$$

$$H_c = 0.73 \cdot (1.15 - 0.22) \cdot 12 = 8.2 \text{ м}$$

$$H_e = 0.73 \cdot (0.88 - 0.22 - 0.1 \cdot 0.2 \sqrt{3}) \cdot 12 = 0.73 \cdot 0.63 \cdot 12 = 5.5 \text{ м}$$

Таким образом, глубина оттаивания грунта под серединой сооружения составила 8.2 м, а под краем сооружения – 5.5 м.

2)

L	B	t	τ	λ_{th}	λ_f	R_0	k_n	ξ_c	k_c	ξ_e	k_e
24	24	21	20	1.86	1.97	1.4	0.83	0.82	0.12	0.5	0.12

$$\Psi = \frac{1.86 \cdot 21 \cdot 175200}{576 \cdot 15181.3} = 0.8$$

$$\beta = -\frac{1.97 \cdot (-4 + 0.15)}{1.86 \cdot (21 + 0.15)} = 0.2$$

$$\alpha_R = \frac{1.86 \cdot 1.4}{24} = 0.1$$

$$H_c = 0.83 \cdot (0.82 - 0.12) \cdot 24 = 14 \text{ м}$$

$$H_e = 0.83 \cdot (0.5 - 0.12 - 0.1 \cdot 0.2 \sqrt{0.8}) \cdot 24 = 0.83 \cdot 0.36 \cdot 24 = 7.2 \text{ м}$$

Таким образом, глубина оттаивания грунта под серединой сооружения составила 14 м, а под краем сооружения – 7.2 м.

3.4. Прогноз изменения мерзлотных условий при естественных колебаниях климата (эволюционный прогноз)

В условиях крайнего Севера при воздействии тепловых, механических и других явлений происходят некоторые изменения в толще многолетнемерзлых пород. При этом могут возникать или усугубляться такие криогенные процессы как термокарст, пучение и солифлюкция. Количественным выражением термокарста служит осадка при оттаивании.

Условиями развития термокарста являются [9]:

- 1) наличие сильнольдистых слоев горных пород;
- 2) увеличение мощности СТС, при которой его подошва достигает кровли сильнольдистого слоя.

В настоящем пункте предлагается оценить вероятность и последствия термокарста в условиях потепления за счет усиления солнечной радиации (подобные процессы отмечаются с периодичностью 11, 40 и более лет и являются естественным климатическим фоном Земли).

На первом этапе вычисляют среднегодовую температуру и амплитуду годовых колебаний температур воздуха. Ориентировочную осадку при оттаивании s определяют по формуле А.М. Пчелинцева [7]:

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

где w_m - влажность минеральных прослоев, принимаемая равной 0,18 для супесей, 0,20 для суглинков и глин; w_{tot} - суммарная влажность оттаивающего слоя (все виды влажности принимаются в долях единицы), ρ_s - плотность минеральных частиц грунта (берутся нормативные величины для глины, суглинка, супеси, песка на усмотрение исполнителя); h - мощность сильнольдистого слоя, м.

Если при этом возникает осадка, достаточная для образования мелкого водоема, определяется температурный режим в его донных отложениях и делается прогноз развития прогрессирующего или затухающего термокарста. В случае, если подошва слоя СТС достигает кровли слоя сплошного льда, его мощность прибавляется к общей осадке, так как именно крупные ледяные тела усугубляют опасность термокарста.

$$1) S = \frac{1.90 \cdot (0.28 - 0.18) \cdot 8.2}{1 + 1.90} = 0.6 \text{ см/м}$$

$$2) S = \frac{1.90 \cdot (0.28 - 0.18) \cdot 14}{1 + 1.90} = 0.9 \text{ см/м}$$

В районах распространения вечномерзлых грунтов все подлежащие застройке территории можно разделить по мерзлотным условиям на две группы [21]: территории, где слой сезонного промерзания-оттаивания сливается с вечномерзлыми грунтами, и территории, где этот слой не сливается с ними. Таким образом, ориентировочная осадка под зданием площадью 288 м² составляет 0.6 см/м, а под зданием с площадью 576 м² – 0.9 см/м.

К первому типу условий относят способ строительства жилых и общественных зданий с сохранением грунтов основания в мерзлом состоянии. Конструктивно он выражается в заложении фундаментов в вечномерзлом грунте и устройстве под зданием вентилируемых подполий или других охлаждающих систем [21]. Этот способ обеспечивает надежность и долговечность сооружений, если одновременно предусматриваются мероприятия по ликвидации теплового воздействия на грунты основания близрасположенных зданий и сооружений [21]. Он широко применяется в северных районах области распространения вечной мерзлоты. Основанием зданий и сооружений в этих районах являются вечномерзлые грунты, находящиеся в твердомерзлом состоянии и характеризующиеся высокой несущей способностью.

Второй тип условий однозначно не определяет выбор способа строительства. Здесь строительство осуществляется как с сохранением грунтов основания в мерзлом состоянии, так и с использованием их в оттаивающем и оттаявшем состоянии [21]. При неглубоком залегании верхней границы вечномерзлых грунтов в пределах достигаемости их обычными свайными или столбчатыми фундаментами наиболее целесообразным является сохранение грунтов основания в мерзлом состоянии [21]. В этом случае фундамент опирают на вечномерзлый грунт, а промораживание вышерасположенного талого слоя осуществляют в период эксплуатации за счет работы охлаждающей системы здания или сооружения [21].

Способ сохранения грунтов в мерзлом состоянии может применяться и при глубоком залегании верхней границы вечномерзлых грунтов, но в этом случае необходимо проведение предварительного промораживания. Предварительным промораживанием искусственно создаются условия первой группы, т.е. талые грунты основания превращает в твердомерзлые и далее сохраняют их в этом состоянии. До последнего времени предварительное промораживание осуществлялось машинным способом, требовало больших затрат и поэтому применялось в ограниченных масштабах. С появлением саморегулирующих охлаждающих устройств, позволяющих промораживать грунт на большую глубину естественным холодом, область применения этого способа подготовки значительно расширяется. [21]

Следовательно, с целью сохранения ММП необходимо использование технологии проветриваемого подполья для стабилизации начального положения вечномерзлых грунтов в

течение всего срока эксплуатации здания. При этом фундаменты здания располагаются в слое талого грунта, между верхней границей вечномерзлого грунта и подошвой слоя многолетнего промерзания. Режим работы вентилируемого подполья заключается в чередовании периодов продолжительностью 5-15 лет с отрицательной среднегодовой температурой воздуха в подполье (холодный период) с периодами продолжительностью 2-5 лет с положительной среднегодовой температурой воздуха в подполье (теплый период) [21].

В период с отрицательной температурой в подполье под зданием происходит многолетнее промерзание грунта и выше подошвы фундаментов создается фазовая граница, на которой поддерживается температура замерзания грунта [21]. Вторая фазовая граница находится ниже подошвы фундаментов, на кровле вечномерзлых грунтов. Между двумя фазовыми границами располагается слой талого грунта, в котором температурные градиенты отсутствуют, а следовательно, отсутствуют и теплотокки через него, что сохраняет первоначальное положение верхней границы вечномерзлых грунтов [21].

Величина слоя многолетнего промерзания в пучинистых грунтах ограничена условием устойчивости фундаментов на действие сил пучения. Для обеспечения этого условия многолетнее промерзание при достижении определенной глубины должно быть прекращено путем изменения температуры воздуха в подполье с отрицательной на положительную [21].

В период с положительной температурой воздуха в подполье происходит оттаивание образовавшегося слоя многолетнего промерзания и в основании здания восстанавливаются первоначальные условия, затем цикл снова повторяется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описываемый район относится к Северной геокриологической зоне или зоне практически сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Мощность многолетнемерзлых пород в ряде мест превышает 150 м. Для береговой зоны Байдарацкой губы характерно сплошное распространение многолетнемерзлых пород практически на всех геоморфологических элементах. Наличие этих пород обусловило широкое распространение современных мерзлотных процессов. Среди них наиболее распространены термоабразия, сезонное протаивание грунтов, термокарст, термоэрозия и морозобойное растрескивание. Климат Байдарацкой губы — морской, арктический с низкими температурами воздуха, высокой влажностью и большой облачностью, малым количеством осадков, частыми туманами летом, штормами и метелями зимой. Он обусловлен географическим положением губы, особенностями атмосферной циркуляции и характером подстилающей поверхности. Географическое положение Байдарацкой губы и малые глубины создают благоприятные условия для формирования ледяного покрова, который существует в течение восьми – и десяти месяцев в году.

Основными отложениями исследуемой территории являются морские отложения лайды (mQIV), развитые вдоль побережья Карского моря, представленные супесчано-суглинистыми и глинистыми породами с прослоями пылеватых песков, отложения 1-ой морской террасы (mQIII), которые широко распространены по территории полуострова и представлены песками пылеватыми и суглинками и отложения 2-ой морской террасы (mQIII), которые представлены песками пылеватыми и суглинками.

Для настоящего исследования было необходимо выполнение следующих расчетов:

1. Нормативная глубина сезонного оттаивания в естественных условиях, значения которой для супесей составили 3.2 м, 3.75 м и 3.1 м, а для суглинков – 3 м.
2. Расчет ореола оттаивания вокруг подземного трубопровода, где:
 - 2.1) для супесей глубина оттаивания грунта под центром трубы составляет 13.7 м, радиус ореола оттаивания составляет 5.55 м, а смещение центра ореола оттаивания по отношению к центру трубы составляет 2.2 м и глубина оттаивания грунта под центром трубы составляет 14.2 м, радиус ореола оттаивания составляет 5.85 м, а смещение центра ореола оттаивания по отношению к центру трубы составляет 2.4 м;
 - 2.2) для суглинков в обоих случаях глубина оттаивания грунта под центром трубы составляет 14.7 м, радиус ореола оттаивания составляет 6.15 м, а смещение центра ореола оттаивания по отношению к центру трубы составляет 2.5 м.

3. Значение глубины оттаивания грунтов под сооружением в первом случае под серединой сооружения составил 8.2 м, а под краем сооружения – 5.5 м, а во втором случае глубина оттаивания грунта под серединой сооружения составила 14 м, а под краем сооружения – 7.2 м.
4. Используя формулу Пчелинцева А.М., были выполнены расчеты ориентировочной осадки при оттаивании. Первое значение осадки здания составило 0.6 см/м, второе – 0.9 см/м. Следовательно, были приведены рекомендации о способах строительства жилых и общественных зданий с сохранением грунтов основания в мерзлом состоянии, который выражается в заложении фундаментов в вечномерзлом грунте и устройство под зданием вентилируемых подполий или других охлаждающих систем. Этот способ обеспечивает надежность и долговечность сооружений, если одновременно предусматриваются мероприятия по ликвидации теплового воздействия на грунты основания близко расположенных зданий и сооружений. Также, данный способ имеет широко применение в северных районах области распространения вечной мерзлоты.

Список использованной литературы

1. Бадю Ю. Б. Основы концепции субаквального криолитогенеза морских отложений газоносных структур полуострова Ямал // Криосфера Земли. – 2017. – Т. 21, № 6. – С. 76-84.
2. Бадю Ю. Б. Геологическое строение криогенной толщи севера Западной Сибири // Инженерная геология. – М. : ПНИИС, 2011. – № 1. – С. 40-56.
3. Бирюков В. Ю., Ермолов А. А., Огородов С. А. Рельеф дна Байдарацкой губы Карского моря // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2008. – № 3. – С. 80-84.
4. Бирюков В.Ю., Совершаев В.А. Геоморфология дна Карского моря // Динамика арктических побережий России / Под ред. В.И. Соломатина и др. – М., 1998. – С. 102-115.
5. Герман Е.В., Кисляков В.Н., Рейнин И.В. Геология и геоморфология п-ва Ямал – нового района перспективного для поисков нефти и газа. // Геология и нефтегазоносность севера Западной Сибири. Труды ВНИГРИ, 1963. – С. 311-329.
6. Инженерная геология СССР. В 8-ми томах. Т.2. Западная Сибирь. Под ред. Е.М.Сергеева. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1976. – 476 с.
7. Инженерное мерзлотоведение: Методические указания к лабораторным работам // Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». Сост.: В.А. Усов, Т.Н. Николаева. – СПб, 2013. – 51 с.
8. Камалов А. М., Огородов С. А., Бирюков В. Ю. и др. Морфолитодинамика берегов и дна Байдарацкой губы на трассе перехода магистральными газопроводами // Криосфера Земли. – 2006. – Т. 10, № 3. – С. 3-14.
9. Миронюк С.Г. Оценка экологических последствий строительства и эксплуатации подводного перехода магистрального газопровода через Байдарацкую губу (Карское море) // Арктика: экология и экономика. – 2014. – №3 – С. 72-78.
10. Немцев Е.С. Геокриологические условия побережья на участках перехода газопровода «ЯМАЛ-ЦЕНТР» через Байдарацкую губу. // Вестник института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, 2006. – С. 12-13.
11. Петров С. Ю., Коннов А. Г., Червяков Р. В., Петрова М. Н. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000 (издание второе). Серия Полярно-Уральская. Листы 42-XXV, XXVI (Яры). Объяснительная записка. – СПб. : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2018. – 149 с.
12. Попов А.И. О субмаринном типе криодиагенеза // Инж. геология, 1991. – № 6. – С. 49-55.

13. Природные условия Байдарацкой губы: Основные результаты исследований для строительства подводного перехода системы магистральных газопроводов Ямал-Центр. – М. : ГЕОС, 1997. – 432 с.
14. Трофимов В. Т., Бадю Ю. Б., Кудряшов В. Г., Фирсов Н. Г. Полуостров Ямал (Инженерно – геологический очерк). – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1975. – 278 с.
15. Учебник: География ЯНАО. Природа, население, хозяйство, экология. 8-9 класс. Учебное пособие для общеобразовательных учреждений // В.М. Калинин, В.В. Козин, С.И. Ларин, под редакцией к. г. н. С.И. Ларина. – Тюмень: ТГУ, 2001. – 327 с.
16. Физико-механические свойства мерзлых пород: Методические указания к лабораторным работам // Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». Сост.: Т.Н. Николаева, В.А. Усов. – СПб, 2013. – 52 с.
17. ГОСТ 20522-96 Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний [Электронный ресурс]: Электронный фонд правовой и нормативно – технической документации. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200000431>. (дата обращения 18.03.2020)
18. Как строят подводные газопроводы [Электронный ресурс]: Информаторий Газпром. URL: <http://www.gazprominfo.ru/articles/undersea-tubes/> (дата обращения 10.04.2020)
19. Карта Ямало-Ненецкого автономного округа с городами и поселками [Электронный ресурс]: Карта России с городами. URL: <https://maps-rg.ru/jamalo-neneckij-ao/> (дата обращения 03.12.2019)
20. Распространение многолетнемерзлых пород на территории России [Электронный ресурс]: Ледники и снежники России. URL: <http://protown.ru/information/hide/2834.html> (дата обращения 16.01.2020)
21. Рекомендации по применению способа стабилизации вечномёрзлых грунтов в основании зданий [Электронный ресурс]: Электронный фонд правовой и нормативно – технической документации. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200085645> (дата обращения 21.04.2020)