

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ТРАССЫ ГАЗОПРОВОДА БОВАНЕНКОВО — УХТА НА ТЕРРИТОРИИ ПОЛУОСТРОВА ЯМАЛ И СХЕМА РАЙОНИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ

ENGINEERING-GEOCRYOLOGICAL CONDITIONS OF THE BOVANENKOVO — UKHTA MAIN GAS PIPELINE ROUTE IN THE TERRITORY OF THE YAMAL PENINSULA AND THE AREA ZONING SCHEME

КРЮКОВ А.В.

Начальник Воркутинского линейного производственного управления магистральных газопроводов (ЛПУМГ) ООО «Газпром Трансгаз Ухта», г. Воркута, akriukov@sgp.gazprom.ru

ГРИВА Г.И.

Главный научный сотрудник Тюменского научного центра СО РАН, д.г.-м.н., г. Тюмень, grivag@mail.ru

БРУШКОВ А.В.

Заведующий кафедрой геокриологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, д.г.-м.н., г. Москва, brouchkov@hotmail.com

KRYUKOV A.V.

Head of the Vorkuta Linear Production Agency of Main Gas Pipelines of the OOO «Gazprom Transgaz Ukhta» LLC, Vorkuta, akriukov@sgp.gazprom.ru

GRIVA G.I.

Principal staff scientist of the Tyumen Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, PhD (doctor of science in Geology and Mineralogy), Tyumen, grivag@mail.ru

BRUSHKOV A.V.

Head of the geocryology department of the geology faculty of the Lomonosov Moscow State University, PhD (doctor of science in Geology and Mineralogy), Moscow, brouchkov@hotmail.com

Ключевые слова:

полуостров Ямал; система магистральных газопроводов Бованенково — Ухта; инженерно-геокриологические условия; инженерно-геокриологическое районирование.

Key words:

Yamal Peninsula; Bovanenkovo — Ukhta main gas pipelines system; permafrost conditions; engineering-geocryological zoning.

Аннотация

В статье рассматриваются геокриологические условия трассы системы магистральных газопроводов Бованенково — Ухта в пределах полуострова Ямал и результаты инженерно-геокриологического районирования изучаемой территории. Эти результаты могут быть использованы для обеспечения эксплуатационной надежности и безаварийной эксплуатации газопровода в уникальных по сложности геокриологических условиях.

Введение

Ямал является одним из главных резервов нефтегазовой отрасли России в первой половине XXI столетия. На полуострове подготовлена сырьевая база для добычи газа в объеме до 300–330 млрд м³/год и жидких углеводородов до 10–15 млн т/год [23]. К настоящему времени сданы в эксплуатацию первоочередные газодобывающие объекты Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ) и первая нитка системы магистральных газопроводов Бованенково — Ухта.

По схеме геокриологического районирования [7] Ямал относится к Лескинско-Антипаюгинской подзоне северной зоны континентального региона, граничащей на севере и западе с Карской шельфовой зоной субмаринного региона. Полуостров является областью ступенчатых морских аккумулятивных равнин и сложен отложениями преимущественно морского и прибрежно-морского генезиса. Отличительной чертой его территории является сплошное с поверхности распространение многолетнемерзлых пород с большой льдистостью и засоленностью.

Необходимость изучения геокриологических условий для освоения крупных месторождений углеводородного сырья явилась основанием для инженерно-геологического картирования территории полуострова Ямал [7, 15, 18]. Детальные геокриологические исследова-

Abstract

The article considers the permafrost conditions of the Bovanenkovo — Ukhta main gas pipeline route in the territory of the Yamal Peninsula and results of engineering-geocryological zoning of this territory. These results can be used to ensure the operational reliability and trouble-free operation of the pipeline in the uniquely difficult permafrost conditions.



дования выполнялись при инженерно-геологических изысканиях под строительство объектов Бованенковского, Харасавейского, Новопортовского месторождений, коридоров коммуникаций между ними и в пределах трасс магистральных газопроводов.

В настоящей работе рассматриваются геокриологические условия трассы системы магистральных газопроводов Бованенково — Ухта и результаты районирования изучаемой территории по этим условиям, которые могут быть использованы для решения важной народно-хозяйственной задачи — обеспечения эксплуатационной надежности и безаварийной эксплуатации объекта, построенного в уникальных по сложности геокриологических условиях.

Природные условия и геологическое строение территории

Особенности природных условий Ямала определяются его географическим положением в пределах западной части Азии. Климат данного региона умеренно континентальный, переходный к континентальному, с длительной суровой зимой и коротким нежарким летом. Характерная особенность климата — большая ежегодная изменчивость, которая создается взаимодействием западного переноса, преобладающего в умеренных широтах Северного полушария, с континентальными воздушными массами Азии. Средняя годовая температура повсеместно имеет отрицательные значения — от минус 7 до минус 10 °С (табл. 1). Средняя продолжительность безморозного периода составляет 57 дней. Годовые суммы суммарной радиации при средних условиях облачности уменьшаются с юга на север, составляя 83–85 ккал/см² в южных частях региона и 67–70 ккал/см² в северных. В холодное время характерны юго-западные ветры со средней скоростью 6–8 м/с, сменяемые ветрами холодных вторжений от сибирского антициклона. Годовая сумма осадков в регионе составляет в среднем 380–410 мм.

Максимальной величины снеготпасы достигают в конце апреля (табл. 2).

Территория Ямала представляет собой типичную плоскую в разной степени расчлененную аккумулятивную равнину, абсолютные отметки которой изменяются от 0–2 м на побережье Карского моря и Обской губы до 100–120 м в приуральских районах. Наиболее древние уровни среднеплейстоценового возраста слагают в осевой части Ямала водораздельные равнины с абсолютными отметками от 45–60 до 80–95 м. По периферии полуострова развиты молодые верхнеплейстоценовые и голоценовые террасы с отметками уровней 22–35 и 7–12 м и лайды с отметками 2–5 м. Вся территория Ямала холмистая, в разной степени изрезанная речной и овражной сетью, заболоченная и заозеренная (более чем на 10%). Реки здесь мелководны, имеют меандрирующие русла и широкие дельтообразные устья с несколькими рукавами. На выходе в море они образуют отмели и системы островов. В низовьях большинства рек ощущаются периодические приливно-отливные явления и непериодические сгоны и нагоны. Большинство озер имеет термокарстовое происхождение, они мелководны (глубиной 2–4 м) и располагаются группами. Среди болот распространены преимущественно арктические минеральные и торфяно-минеральные эвтрофные (низинные) болота.

В геоботаническом отношении территория Западного Ямала охватывает подзоны арктических, типичных и кустарничковых тундр [6, 19].

Подзона арктических тундр включает в себя несколько типов тундр. Мохово-лишайниковые пятнистые тундры занимают вершины и наветренные склоны холмов.

Подзона типичных тундр включает в себя кустарничково-мохово-лишайниковые, кустарничково-моховые, ивняковые моховые и заболоченные ерничково-ивняковые тундры.

Подзона кустарничковых тундр характеризуется преобладанием карликовой березы и ив (*Salix glauca*,

Таблица 1

Средняя месячная и годовая температура воздуха на метеостанциях полуострова Ямал														
Метеостанция	Период наблюдений (гг.)	Месяц												Год
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Сеяха	1936–2000	-24,6	-25,7	-22,1	-15,5	-6,4	1,6	7,7	8,0	3,5	-5,6	-16,1	-21,0	-9,9
Мыс Каменный	1950–1994	-25,0	-25,8	-21,1	-14,6	-5,9	1,8	9,0	9,9	4,6	-5,5	-16,2	-21,2	-9,2
Новый Порт	1936–2000	-24,5	-25,0	-20,4	-12,8	-4,8	3,7	11,6	10,2	4,6	-5,1	-16,2	-21,3	-8,3
Мыс Маре-Сале	1914–2000	-20,7	-21,7	-19,5	-12,9	-5,2	1,9	7,4	6,9	3,4	-3,9	-12,5	-18,1	-7,9
Яр-Сале	1936–1994	-23,8	-23,8	-18,9	-10,9	-2,9	6,9	13,7	10,9	5,2	-4,7	-15,4	-20,7	-7,0

Таблица 2

Высота снежного покрова на последний день месяца, см											
Метеостанция	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	Сред.	Макс.	Мин.
Харасавей	9	15	19	22	25	28	30	24	35	48	22
Маре-Сале	10	16	18	21	23	24	22	9	28	41	19

Salex lanata). Ерниково-лишайниково-моховые тундры занимают дренированные участки междуречий и террас. На пологих склонах и плоских вершинах холмов междуречий и террас развиты ивняково-моховые тундры. На вершинах холмов встречаются травяно-кустарничковые тундры. Заболоченные пушицево-лишайниково-сфагновые тундры распространены на плоских междуречьях и террасах. Они занимают переходные участки между незаболоченными кустарничковыми тундрами и болотами.

Тундровые почвы отличаются незначительной мощностью деятельного горизонта. Ландшафты имеют низкую теплообеспеченность, избыток влаги, низкую емкость биологического круговорота и слабую активность биологических процессов.

Мерзлые грунты представлены четвертичными отложениями различного генезиса, преимущественно морскими и прибрежно-морскими, значительно реже ледниково-морскими песками, алевритами, суглинками, супесями и глинами с включениями растительных остатков, обломков морской макрофауны, гравия, гальки, валунов. Большая часть разреза четвертичных отложений выделена в ямальскую серию и казанцевскую свиту [13, 14]. Более молодые морские отложения слагают серию верхнеплейстоценовых — голоценовых морских террас. Общая мощность четвертичных отложений не превышает 350–370 м.

Нижнеплейстоценовые морские отложения (mQ_I) залегают на палеогеновых глинах с резко выраженным эрозионным несогласием, вскрыты в интервале глубин 80–170 м, представлены толщей тяжелых и средних плотных суглинков с прослоями песков.

Среднеплейстоценовые морские и ледниково-морские отложения (m, gmQ_{II}^{2-4}) характерны для всей изучаемой территории и на суше залегают ниже уровня моря. Подошва среднеплейстоценовых отложений залегает на абсолютных отметках от минус 50 до минус 120 м, их максимальная мощность не превышает 100 м. Разделение ниже- и среднеплейстоценовых отложений затруднительно, поэтому чаще всего их рассматривают как единую ямальскую серию.

Верхнеплейстоценовые морские и прибрежно-морские отложения казанцевской свиты (m, pmQ_{III}^1) вскрываются на глубине 20–30 м от поверхности и представлены переслаивающимися глинами, суглинками, супеями и песками с преобладанием тонкодисперсных разностей. Мощность казанцевских отложений составляет 30–80 м.

Верхнеплейстоценовые морские отложения III террасы (mQ_{III}^{2-3}) залегают с поверхности в пределах наиболее возвышенных участков водоразделов с абсолютными отметками 25–30 м. Формирование нижних горизонтов относится к каргинскому времени, окончание седиментации приурочено к началу сартанского похолодания. В разрезе прослеживаются две пачки отложений — преимущественно песчаная нижняя и глинистая верхняя. Первая представлена мелкими и пылеватыми песками с линзами и прослоями растительных остатков. Общая мощность отложений, слагающих III морскую террасу, не превышает 20–40 м.

Верхнеплейстоценовые морские отложения II террасы (mQ_{II}^{3-4}) сартанского возраста слагают водораздельные поверхности с абсолютными отметками 15–

20 м. Они имеют наибольшее распространение на трассе газопровода и характеризуются разнообразным составом — переслаивающимися песками, суглинками и глинами с преобладанием тонкодисперсных разностей. Вместе с тем вверх по разрезу нередко возрастает роль песков. Мощность отложений второй террасы — до 12–15 м.

Голоцен-верхнеплейстоценовые морские отложения I террасы (mQ_{IV}) слагают поверхности высотой 7–12 м и имеют песчано-глинистый состав, нередко с преобладанием песков в верхней части разреза (до глубины 5–7 м). Их мощность не превышает 10–15 м.

Голоценовые отложения (m, am, a, sd, IbQ_{IV}) представлены морскими и континентальными образованиями. Морские отложения (mQ_{IV}) в прибрежной части акватории Карского моря — мелкие и пылеватые пески, супеси, глинистые и суглинистые илы. Разнообразные по генезису континентальные отложения голоцена распространены на Ямале повсеместно. Аллювий пойм рек (aQ_{IV}) представлен пылеватыми и мелкими песками, супесями, а в самой верхней части разреза (до глубины 2–4 м) — оторфованными суглинками. Солифлюкционно-делювиальные отложения (sdQ_{IV}) практически сплошным чехлом покрывают длинные пологие склоны морских террас. По составу это суглинки и супеси, участками ожелезненные, часто с большим количеством детрита. Их мощность варьирует от 0,5–1,0 м на верхних частях склонов, сложенных песками, до 4–8 м у подножия склонов, сложенных мелкодисперсными грунтами. Озерные отложения (IQ_{IV}) распространены локально и слагают днища обширных древних и современных озер, дренированных озерных котловин (хасыреев) и аккумулятивные части озерных террас. Они представлены тяжелыми заиленными суглинками с тонкой ленточной слоистостью, с редкими прослойками супесей и пятнами ожелезнения. Их мощность редко превышает 3–5 м. Биогенные отложения (bQ_{IV}) представлены торфом различной степени разложения и имеют локальное распространение на всех геоморфологических уровнях.

Выделение ландшафтов выполнено на основе состава отложений, форм рельефа, почвенно-растительных комплексов и характера увлажнения. В пределах полуострова выделяются следующие виды ландшафтов [3]: ландшафты морских равнин и террас (III, II, I), низких речных террас, поймы, лайды, долин малых водотоков и озерных котловин (хасыреев).

На ландшафтах морских равнин и террас, сложенных песчано-суглинистыми отложениями, преобладают плоские поверхности различной степени дренированности, занятые кустарничковыми и кустарничково-мохово-лишайниковыми тундрами. Значительные площади занимают травяно-моховые болота с фрагментами торфяников. Распространенными криогенными формами являются термокарстовые образования (озера, хасыреи, западины) и полигональный рельеф. Склоны террас, где проявляются термоденудационные процессы (рис. 1), расчленены оврагами и полосами стока, осложнены солифлюкционными террасами, криогенными оползнями скольжения и течения. На пологих склонах широко распространен мелкобугристый или пятнистый микрорельеф, развиты

Схема инженерно-геокриологического районирования территории размещения системы магистрального газопровода Бованенково — Ухта в пределах полуострова Ямал

Инженерно-геокриологические районы	Инженерно-геокриологические подрайоны	Инженерно-геокриологические участки	Краткая характеристика участков (природные микрорайоны)
I. Верхнечетвертичные прибрежно-морские и морские террасы (осадки до глубины 2–4 м промерзали сингенетически, ниже — эпигенетически)	I-A. Плоские незэродированные или слабо-эродированные поверхности террас (уклон поверхности — менее 1°)	I-A-1. Участки в верхней части разреза сложены преимущественно пылеватými песками, в нижней части — суглинками и глинами. Отложения до глубины 3–4 м льдистые, с ГПЛ*	Мелкокочковатый микрорельеф, поверхность относительно дренированная, $t_{cp.} = -5 \div -8,5$ °C, $\xi = 0,8 \div 1,5$ м****
		I-A-2. Участки в верхней части разреза сложены торфом мощностью 0,1–1,5 м, ниже — песками, супесями, суглинками, глинами. Минеральные отложения до глубины 3–4 м льдистые. Характерны ГПЛ и ПЖЛ**	Трещинно-полигональный и остаточно-полигональный рельеф, поверхность слабодренированная, $t_{cp.} = -5,5 \div -7,5$ °C, $\xi = 0,3 \div 0,6$ м, мощность ПЖЛ — до 3 м
		I-A-3. Участки сложены суглинками, глинами с линзами и прослоями супесей и пылеватых песков. Отложения льдистые до глубины 3–4 м, ниже слабольдистые, с ГПЛ	Мелкокочковатый микрорельеф, поверхность неравномерно дренированная, реже относительно дренированная, $t_{cp.} = -4,5 \div -7$ °C, $\xi = 0,3 \div 0,8$ м
		I-A-4. Участки сложены песками, суглинками и глинами. Отложения сильнольдистые, характерны БПЛ***	Мелкокочковатый микрорельеф, поверхность относительно дренированная, $t_{cp.} = -3 \div -6$ °C, $\xi = 0,4 \div 0,8$ м
	I-B. Подрайон пологих склонов прибрежно-морских и морских террас (уклон поверхности — от 1,5 до 3°)	I-B. Участки сложены глинами, суглинками с прослоями и линзами песков. Грунты сильнольдистые, с БПЛ и ГПЛ	Бугристый и мелкокочковатый микрорельеф, поверхность относительно дренирована, реже хорошо дренирована. $t_{cp.} = -4 \div -7$ °C, $\xi = 0,3 \div 0,7$ м
	I-B. Подрайон крутых склонов прибрежно-морских и морских террас. Уклон поверхности более 30.	I-B. Участки сложены суглинками и глинами с прослоями и линзами песков. Отложения льдистые, характерны БПЛ и ГПЛ	Бугристый микрорельеф, поверхность дренированная; $t_{cp.} = -2 \div -6$ °C, $\xi = 0,5 \div 1,0$ м
II. Поймы рек и ручьев, сложенные современными аллювиальными отложениями, промерзшими сингенетически	II-A. Подрайон плоских поверхностей современной поймы	II-A-1. Участки сложены пылеватými песками и супесями, ниже — суглинками. До глубины 3–4 м грунты сильнольдистые, глубже слабольдистые	Поверхность хорошо дренированная на косах и пляжах, реже неравномерно дренированная, $t_{cp.} = -1,5 \div -4$ °C, $\xi = 0,6 \div 1,2$ м
		II-A-2. Участки сложены слабозаторфованными в верхней части супесями и суглинками, реже песками. Грунты сильнольдистые до глубины 3–4 м, ниже слабольдистые	Бугристый и мелкокочковатый микрорельеф, поверхность слабодренированная, реже заболоченная, $t_{cp.} = -3 \div -6$ °C, $\xi = 0,4 \div 0,8$ м
		II-A-3. Участки сложены суглинками и супесями с прослойками песков, перекрыты торфом мощностью до 1–2 м. Грунты в верхней части сильнольдистые, ниже 3 м льдистые и слабольдистые	Трещинно-полигональный и остаточно-полигональный микрорельеф, поверхность заболоченная, $t_{cp.} = -2,5 \div -5$ °C, $\xi = 0,3 \div 0,6$ м
III. Озерные котловины, сложенные верхнеплейстоценовыми озерными отложениями промерзшими эпи- и диагенетически	III-A. Подрайон хасыреев в пределах морских террас	III-A-1. Участки сложены слабозаторфованными суглинками, супесями, глинами мощностью от 2 до 10 м, перекрыты маломощным торфом. Отложения сильнольдистые и льдистые, в бортах хасыреев — ГПЛ	Остаточно-полигональный и трещинно-полигональный микрорельеф, поверхность заболоченная, $t_{cp.} = -2,0 \div -5,5$ °C, $\xi = 0,4 \div 0,8$ м
	III-B. Подрайон хасыреев в пределах поймы	III-B-1. Участки сложены слабозаторфованными суглинками, супесями, пылеватými песками мощностью от 2 до 10 м. Отложения сильнольдистые и льдистые	Кочковатый и трещинно-полигональный микрорельеф, поверхность заболоченная, $t_{cp.} = -2 \div -4$ °C, $\xi = 0,4 \div 0,6$ м
		III-B-2. Участки сложены суглинками, супесями, глинами, песками мощностью от 2 до 10 м, перекрыты торфом мощностью до 2,0 м. Грунты сильнольдистые и льдистые, с ПЖЛ	Трещинно-полигональный микрорельеф, поверхность заболоченная, $t_{cp.} = -1,5 \div 3,5$ °C, $\xi = 0,3 \div 0,8$ м

* ГПЛ — глубоко залегающие пластовые льды.

** ПЖЛ — повторно-жильные льды.

*** БПЛ — близко залегающие пластовые льды (БПЛ).

**** $t_{cp.}$ — среднегодовая температура грунтов; ξ — глубина сезонного оттаивания.



Рис. 1. Кустарничково-мохово-лишайниковая тундра на аллювиально-морской террасе. На заднем плане — процессы термоденудации склона морской террасы

кустарничково-мохово-лишайниковые тундры. В их нижних частях произрастают мохово-травяные ивняки высотой до 1,0–1,5 м.

Ландшафты низких речных террас распространены локально. Дренажированные участки, сложенные песчано-супесчаными грунтами, характеризуются мелкобугристым или пятнистым микрорельефом. На них развиты кустарничково-мохово-лишайниковые тундры (см. рис. 1). Значительную площадь на надпойменных террасах занимают полигональные торфяники. На склонах фрагментарно развиты солифлюкционно-оползневые образования.

Пойменные ландшафты также имеют подчиненное распространение. Пониженные участки пойм крупных рек сильно заболочены. Широкое распространение здесь имеют полигональные формы рельефа, преимущественно полигонально-валиковой. Большую часть площади пойм занимают осоково-моховые болота, на валиках преобладают травяно-моховые растительные ассоциации. Характерна высокая заозеренность (рис. 2). Распространенными криогенными образованиями являются полигональные формы рельефа и повторно-жильные льды.

Лайдовые ландшафты характеризуются значительной заболоченностью и заозеренностью (более чем на 30–35%). Залегающие с поверхности иловатые пески и супеси содержат линзы криопэгов. Низкие лайды незадернованы, имеют следы волноприбойной деятельности



Рис. 2. Пойменные ландшафты Западного Ямала

ности, изрезаны ручьями и протоками. Высокие лайды являются более дренированными, заросшими кустарничково-моховой и осоково-моховой растительностью. Наиболее характерными для ландшафтов криогенными процессами, играющими ландшафтообразующую роль, являются термокарст, пучение грунтов, термоэрозия и криогенное растрескивание.

Ландшафты озерных котловин на морских и надпойменных террасах и на пойме отличаются развитием с поверхности суглинков и супесей, перекрытых слоем торфа мощностью до 1,5 м. Наиболее широко распространены неравномерно дренированные, местами заболоченные поверхности, на которых доминируют травяно-моховые, реже кочковатые кустарничково-моховые болота. На приподнятых дренированных участках развита кустарничково-мохово-лишайниковая тундра. Характерными элементами данных ландшафтов являются бугры пучения, термокарстовые и полигональные образования.

Долины малых водотоков на морских и надпойменных террасах имеют, как правило, плоские часто заболоченные днища и склоны различной крутизны, зависящей от глубины вреза. На склонах активно развиваются термоденудационные процессы. Они осложнены солифлюкционно-оползевыми образованиями.

Инженерно-геокриологические условия

Главной особенностью территории трассы системы магистральных газопроводов Бованенково — Ухта является практически сплошное распространение многолетнемерзлых пород (ММП). В мерзлом состоянии находятся даже отложения морских пляжей и кос, бечевников рек, мелководий озер и островов рек [18]. Сплошность ММП с поверхности нарушается несвязными подрусловыми и подозерными таликами, а по разрезу — линзами криопэгов и охлажденными грунтами. Наибольшее распространение имеют водно-тепловые талики, значительно реже встречаются радиационно-тепловые. Первые формируются и существуют под руслами рек с постоянным и сезонным стоком и под озерами, вторые приурочены к локальным участкам речных пойм, днищам логов и ложбин стока.

Среднегодовые температуры ММП изменяются от 0 — минус 1 °С до минус 6 — минус 8 °С. Распределение температур носит сложный характер, что объясняется неоднородностью ландшафтных условий. Наиболее низкими температурами (–6÷–8 °С) отличаются мерзлые породы на возвышенных и лишенных растительности водораздельных участках морских равнин, а наиболее высокими — пойменные участки, где среднегодовая температура может подниматься до минус 3 — минус 4 °С и выше. Для грунтов, слагающих обширные поймы крупных рек и их притоков, характерен широкий диапазон температур, но их фоновое значение на 1,0–1,5 °С выше, чем на террасовых поверхностях. Минимальная температура грунтов (–5÷–6, редко –7 °С) свойственна участкам травяно-сфагновых полигонально-валиковых болот, гривистых пойм, полигональных торфяников. Более высокая температура (–2,5÷–4,5 °С) — на более дренированных пойменных участках, часто занятых ивняками. На



склонах речных и морских террас диапазон среднегодовых температур грунтов составляет минус 1 — минус 8 °С. В нижних частях пологих подветренных склонов, а также в днищах логов, ложбин стока, оврагов, поросших густым ивняком, температура пород повышается до 0 — минус 4 °С.

Наибольшее влияние на глубину оттаивания имеют степень дренированности поверхности и рельеф, определяющие характер увлажнения грунтов, распределение напочвенных покровов и величину инсоляции поверхности.

Наиболее типичная мощность сезонноталого слоя — от 0,3–0,8 м на торфяниках и слабодренированных оторфованных поверхностях водоразделов и пойм с осоково-моховой растительностью до 0,8–1,5 м на дренированных участках водоразделов и пологих склонах террас с кустарничково-мохово-лишайниковой растительностью.

Эпигенетическими мерзлыми породами сложены многие геоморфологические уровни средне- и верхнеплейстоценового возраста, но в центральной части полуострова они наблюдаются лишь в пределах салехардской и казанцевской морских равнин и местами слагают нижнюю часть разрезов морских и лагунно-морских террас [18]. На территории Бованенковского месторождения эпигенетические мерзлые толщи с поверхности развиты локально на останцах III морской террасы. На остальной части территории они подстилают сингенетические мерзлые отложения. Криогенное строение и льдонасыщенность эпигенетических мерзлых толщ характеризуются большим разнообразием и изменчивостью. Наиболее льдистыми являются грунты в приповерхностном слое годовых колебаний температур.

Главные отличительные признаки разрезов эпигенетических толщ Бованенковского НГКМ — большая льдонасыщенность глинистых пород ($I_l=0,3\div 0,8$) и ее увеличение при приближении к пласту льда. Мощность льдистого горизонта глинистых грунтов в кровле ледяных пластов в районе Бованенковского НГКМ изменяется от 1 до 14 м, наиболее часто (в 25% случаев определений) ее значение составляет 2–4 м. Изменчивость влажности песчаных пород, подстилающих пластовые льды, значительна: величина среднеарифметической влажности W по 93 пробам изменяется в диапазоне 23–70%, причем выделяются два пика наибольшей повторяемости ее значений. Первый пик ($W=23\div 30\%$) охватывает около 35% всех определений и соответствует мелким пескам базально-массивной криогенной текстуры, а второй ($W=40\div 60\%$) охватывает основную часть определений (около 60%) и соответствует пылеватым пескам со шлировыми текстурами.

Сингенетические мерзлые породы распространены преимущественно к северу от долины реки Юрибей. Для современных сингенетических ММП наиболее характерно широкое распространение сегрегационного и полигонально-жильного льдов. Объемная льдистость таких пород изменяется от 30 до 50%, а степень заполнения пор льдом и незамерзшей водой — от 0,7 до 1,0. При оттаивании такие грунты разжижаются. Верхнеплейстоцен-голоценовые аллювиальные отложения, слагающие надпойменные террасы в

долинах рек, характеризуются однородностью состава и криогенного строения. Весь разрез отложений надпойменных террас представляет чередование более и менее льдонасыщенных горизонтов, мощность которых достигает 1,5 м. Объемная льдистость чистых песков составляет 40–55%, в пылеватых песках и супесях она возрастает до 45–55%, а местами и более. Шире всего распространены сингенетические мерзлые аллювиальные отложения, слагающие поймы рек. Наиболее льдонасыщенными являются суглинки и глины, слагающие внутреннюю плохо дренируемую пойму. Особенно большой льдистостью до глубины 2–4 м характеризуются разрезы, сложенные оторфованными озерными суглинками. Льдистость таких грунтов превышает 0,4, их криотекстура является атакситовой слоистой сетчатой. Делювиально-солифлюкционные отложения верхнеплейстоцен-голоценового возраста характеризуются высокой льдистостью по всему разрезу. В широком диапазоне изменяется льдистость отложений за счет ледяных включений ($I_l=0,3\div 0,6$).

Крупные скопления подземного льда в верхней части разреза мерзлых пород полуострова оказывают определяющее влияние на инженерно-геологические условия территории месторождений углеводородного сырья и газотранспортных систем. Льды развиты в отложениях всех стратиграфо-генетических горизонтов плейстоцен-голоценового возраста. По данным бурения, электроразведки и наблюдений в обнажениях ледяные тела прослеживаются как в разрезах морских и надпойменных речных террас, так и под аллювием современных пойм рек. Основная часть выявленных пластовых залежей льда сосредоточена в верхнем 50-метровом горизонте мерзлой толщи. Кровля ледяных тел располагается на разных глубинах — от первых метров до 20–40 м. В местах неглубокого залегания пластовые льды уязвимы для термоденудации и представляют угрозу трубопроводу и сооружениям инфраструктуры. Площадь отдельных залежей льда может достигать 5–7 км², их мощность доходит до 30–45 м, а объем может превышать 200–250 млн м³. Характер залегания пластовых льдов в отложениях III морской террасы (по данным бурения) представлен на рис. 3.

Инженерно-геологическое значение пластовых льдов определяется их значительными размерами и приповерхностным залеганием, что определяет их особую чувствительность к техногенным воздействиям и колебаниям климата. По данным ОАО «ПНИИИС», статистика распределения мощности пластовых льдов на территории Бованенковского месторождения выглядит следующим образом: в 15% случаев она превышает 15 м; в 38% — варьирует от 15 до 5 м; в 47% — составляет менее 5 м. Таким образом, в 53% случаев зафиксированная толщина льда превышает 5 м. В пределах газотранспортной системы средняя глубина залегания их кровли колеблется от 1,48 м на хасыряях до 5,25 м на речных террасах, т.е. они уязвимы для термоденудации и могут представлять серьезную угрозу инженерным сооружениям.

Повторно-жильные льды также занимают большие площади на всех геоморфологических уровнях. Жилы льда залегают, как правило, непосредственно под

слоем сезонного протаивания. В современных пойменных, лайдовых и болотных осадках мощность повторно-жильных льдов составляет 2–4 м, реже до 8–10 м, их ширина поверху — 1–2 м. Неразвивающиеся сингенетические повторно-жильные льды приурочены в основном к морским верхнеплейстоценовым отложениям. Глубина залегания этих жил колеблется в пределах 2–5 м, местами толща перекрывающих их отложений достигает 8–10 м. Наиболее крупные сингенетические жилы льда развиты в торфяно-минеральных массивах. Высота этих жил достигает 8–15 м, ширина поверху — 2–4 м (редко более), объемная макрольдистость — 20–35%. В супесях и песках высота жил составляет 2–7 м (реже до 10 м), ширина поверху — 0,5–2,5 м, объемная макрольдистость — 3–10%. Широкое распространение повторно-жильных льдов определяет сложность инженерно-геологических условий трассы трубопровода.

Засоление грунтов криогенной толщи относится к морскому типу и связано с развитием плейстоценовых и голоценовых морских трансгрессий, которые сопровождалось накоплением осадков с солеными иловыми водами и инфильтрацией морских вод в слабо литифицированные дисперсные породы.

Засоленность грунтов существенно влияет на температуру их замерзания, фазовый состав влаги, деформационные и прочностные свойства. Кроме того, засоленные грунты оказывают активное коррозионное воздействие на металлические и железобетонные конструкции. В пределах трассы трубопровода морские породы засолены по всему разрезу. Их засоленность составляет 0,5–1,5%, реже до 2,5%. Особо следует сказать о засоленности мерзлых пород в районе Байдарацкой губы. Наибольшим засолением характеризуются грунты низкой лайды и устьевых частей рек, заливаемых в нагоны и приливы морской водой. Здесь практически от поверхности под сезонноталым слоем или захватывая его залегают сильнозасоленные мерзлые и охлажденные грунты с содержанием солей до 4%. Средние значения засоленности глинистых грунтов составляют 2,1%, мерзлых песков — 0,3%, охлажденных — 1,0–1,6%.

Криопэги в толще засоленных мерзлых пород содержатся в виде изолированных линз различной мощности. Большинство криопэгов сосредоточено в разрезах пойм рек, реже они встречаются в отложениях морских террас. Химический состав солей в рассолах — хлоридно-натриевый.

Районирование территории по инженерно-геокриологическим условиям

Характерной чертой территории размещения объектов транспорта газа на Ямале является крайняя пространственная неоднородность геоэкологических и инженерно-геокриологических условий, связанная с такими факторами, как: значительная протяженность трасс магистральных газопроводов в субмеридиональном направлении; пересечение тектонических структур разных (I–IV) порядков с различными геодинамическими условиями и направленностью неотектонических движений; пересечение разных геоморфо-логических уровней с различными стратиграфо-генетическими комплексами отложений.

Схема инженерно-геокриологического районирования, представленная в виде табл. 3, составлена на основе схемы районирования, выполненного ОАО «ПНИИИС» [3]. Она представляет собой комплексный анализ ландшафтно-индикационных, геолого-геоморфологических и криолитологических компонентов природной среды. Геокриологическая информация соотнесена с определенными ландшафтными комплексами, выделенными с учетом геоморфологического уровня, уклона поверхности, микрорельефа, растительности, дренированности территории.

Заключение

Рассмотренная в настоящей работе проблема инженерно-геокриологического районирования является необходимой частью решения важной народно-хозяйственной и актуальной научной задачи — научно-методического обеспечения безаварийной эксплуатации газотранспортных систем в уникальных по сложности геокриологических условиях полуострова Ямал. Решение этой задачи возможно на основе комплексного анализа состояния многолетнемерзлых пород данной территории, оценки их изменений и прогноза геокриологических условий при промышленном освоении и разработке мероприятий по контролю состояния мерзлых оснований в процессе строительства и эксплуатации объектов магистрального транспорта газа.

Территория трассы системы магистральных газопроводов Бованенково — Ухта уникальна по сложности геокриологической обстановки, аналогам которой на разведанных площадях других нефтегазоносных

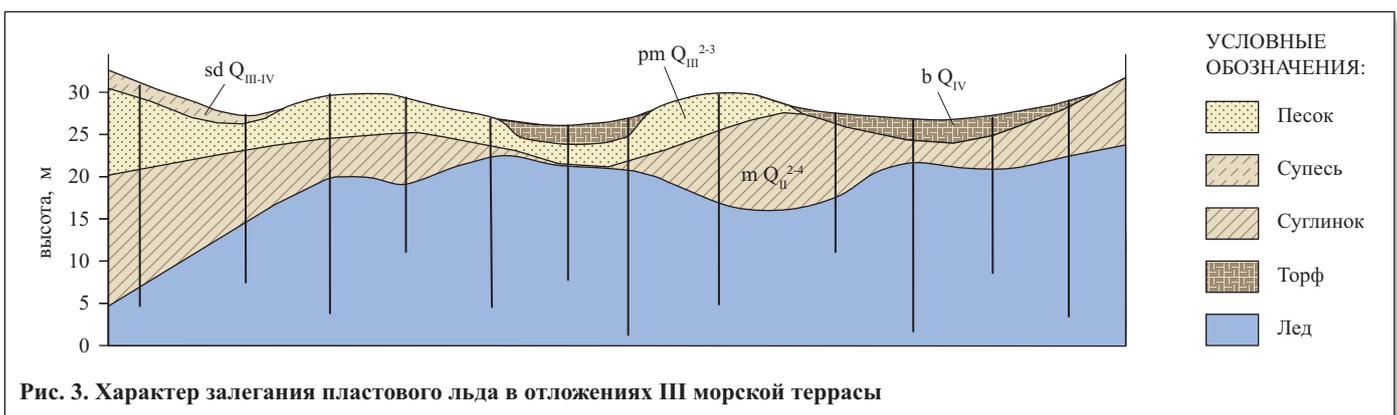


Рис. 3. Характер залегания пластового льда в отложениях III морской террасы



областей севера Западной Сибири не существует. Современные условия, свойства и состояние ММП данной территории определяются мерзлотно-фациальными условиями осадконакопления и историей ее развития в плейстоцен-голоценовое время. Отличительными особенностями инженерно-геокриологических условий, определяющими несущую способность оснований, являются: сплошное распространение ММП с сильнольдистыми грунтами в верхней части разреза; неоднородность и динамичность теплового состояния верхних горизонтов ММП; широкое развитие полигенетических подземных льдов; засоленность мерзлых пород и наличие криопэгов с высокой коррозионной агрессивностью; низкие деформационно-прочност-

ные свойства и пространственная неоднородность физико-механических свойств грунтов оснований, связанная с разнообразием состава, льдистости, засоленности и температурного режима пород.

Выполненное районирование инженерно-геокриологических условий рассматриваемой территории было использовано для оптимизации трассы первой нитки газопровода Бованенково — Ухта в процессе проектирования данного объекта, организации системы геотехнического мониторинга при его строительстве и будет использовано в дальнейшем для обоснования мероприятий, обеспечивающих безаварийную работу газотранспортной системы в процессе ее эксплуатации. 

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Архипов С.А., Волкова В.С.* Геологическая история, ландшафты и климаты плейстоцена Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во НИЦ ОИГТМ СО РАН, 1994. 105 с.
2. *Баулин В.В., Аксенов В.И., Дубиков Г.И. и др.* Инженерно-геологический мониторинг промыслов Ямала. Т. 2: Геокриологические условия освоения Бованенковского месторождения. Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 1996. 240 с.
3. *Баулин В.В., Дубиков Г.И., Аксенов В.И. и др.* Геокриологические условия Харасавэйского и Крузенштерновского газоконденсатных месторождений (полуостров Ямал). М.: ГЕОС, 2003. 180 с.
4. *Брушков А.В.* Засоленные мерзлые породы Арктического побережья, их происхождение и свойства. М.: Изд-во МГУ, 1998. 332 с.
5. *Воскресенский К.С.* Современные темпы денудации равнин криолитозоны // *Геоэкология Севера*. М.: Изд-во МГУ, 1992. С. 83–94.
6. *Гвоздецкий Н.А., Кривошукский А.Е., Макунина А.А. и др.* Физико-географическое районирование Тюменской области. М.: Изд-во МГУ, 1973. 246 с.
7. *Геокриология СССР*. Т. 2: Западная Сибирь. М.: Недра, 1989. 454 с.
8. *Грива Г.И.* Геоэкологические условия разработки газовых месторождений Ямала. Томск: Изд-во ТГУ, 2005. 330 с.
9. *Григорьев Н.Ф.* Криолитозона прибрежной части Западного Ямала. Якутск: Изд-во ИМЗ СО АН СССР, 1987. 112 с.
10. *Данилов И.Д.* Плейстоцен морских субарктических равнин. М.: Изд-во МГУ, 1978. 198 с.
11. *Дубиков Г.И., Баду Ю.Б., Иванова Н.В.* Состав и строение криогенной толщи на Западном Ямале // *Лабораторные и полевые исследования мерзлых грунтов и льдов: сборник научных трудов ПНИИИС / под ред. В.В. Баулина и др.* М.: Стройиздат, 1986. 119 с.
12. *Ершов Э.Д.* Общая геокриология. М.: Недра, 1990. 559 с.
13. *Лазуков Г.И.* Антропоген северной половины Западной Сибири (стратиграфия). М.: Изд-во МГУ, 1970. 321 с.
14. *Лазуков Г.И.* Этапы плейстоценового осадконакопления в пределах Западно-Сибирской равнины // *Природные условия Западной Сибири*. М.: Недра, 1971.
15. *Мельников Е.С., Вейсман Л.И., Москаленко Н.Г. и др.* Ландшафты криолитозоны Западно-Сибирской газоносной провинции. М.: Наука, 1983. 165 с.
16. *Павлов А.В., Ананьева Г.В.* Современные изменения климата и криолитозоны в нефтегазоносных районах севера России // *Криосфера Земли*. 2005. Т. 9. № 1. С. 89–95.
17. *Пармузин С.Ю., Суходольский С.Е.* Пластовые льды Среднего Ямала и их роль в формировании рельефа // *Пластовые льды криолитозоны*. Якутск: Изд-во ИМЗ СО АН СССР, 1982. С. 51–61.
18. *Полуостров Ямал (инженерно-геологический очерк) / под ред. В.Т. Трофимова*. М.: Изд-во МГУ, 1975. 278 с.
19. *Природная среда Ямала*. Т.2. Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 1995. 102 с.
20. *Природные условия Байдарацкой губы. Основные результаты исследований для строительства подводного перехода системы магистральных газопроводов Ямал — Центр*. М.: ГЕОС, 1997. 432 с.
21. *Романовский Н.Н.* Основы криогенеза литосферы. М.: Изд-во МГУ, 1993. 336 с.
22. *Сакс В.Н.* Четвертичный период в Советской Арктике // *Труды НИИГА*. Л. — М.: Изд-во Министерства морского и речного флота, 1953. Т. 77. 627 с.
23. *Скоробогатов В.А., Строганов Л.В., Конев В.Д.* Геологическое строение и газонефтеносность Ямала. М.: Недра, 2003. 352 с.
24. *Фотиев С.М.* Типизация таликов Ямала // *Геоэкология*. 1996. № 6. С. 65–73.
25. *Шаманова И.И., Уваркин Ю.Т.* Зональные особенности подоцерных таликов на севере Западной Сибири // *Труды ПНИИИС*. Вып. 29: Геокриологические исследования при инженерных изысканиях. М.: Стройиздат, 1974. С. 70–83.
26. *Экзогеодинамика Западно-Сибирской плиты / под ред. В.Т. Трофимова*. М.: Изд-во МГУ, 1986. 246 с.
27. *Эрозионные процессы Центрального Ямала / под ред. А.Ю. Сидорчука, А.В. Баранова*. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1999. 350 с.
28. *Brouchkov A., Griva G.* Pipelines on Russian North: review of problem of interaction with permafrost // *Research Journal of Hokkaido University*. 2004. V. 66. № 2. P. 241–249.
29. *Nelson F.E., Anisimov O.A.* Permafrost distribution in the Northern Hemisphere under scenarios of climatic change // *Global and Planetary Change*. 1996. V. 14. № 1–2. P. 59–72.
30. *Pavlov A.V.* Active layer monitoring in northern West Siberia // *Proceedings of the 7th International Conference on Permafrost* (ed. by A.G. Lewkowicz, M. Allard). Nordicana, Yellowknife, Canada: Laval University Press, 1998. P. 875–881.