

УДК 624.139
DOI 10.17513/use.38310

ПРОБЛЕМЫ ПРОКЛАДКИ ТРУБОПРОВОДОВ В ОБЛАСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЕСПЛОШНОЙ МЕРЗЛОТЫ

Розенберг В.В., Гунар А.Ю.

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Москва,
e-mail: Liisarozen@gmail.com, gunar_91@mail.ru

Целью данного исследования является всесторонний анализ наиболее опасных процессов и явлений, возникающих при прокладке трубопроводов в районах с прерывистым распространением многолетне-мерзлых пород. В ходе работы использовались методы ретроспективного анализа и обработки результатов инженерных изысканий, а также оценочные методики для проведения районирования участков трассы трубопровода. По итогам исследования были подробно описаны наиболее опасные и сложные для теплового моделирования и проектирования процессы и явления. Результаты работы включают как описательную часть вскрытого геологического строения исследуемой территории, так и систематизированную ландшафтную характеристику участка в соответствии с трудностью проектирования и эксплуатации трубопровода. По ландшафтному районированию выделено 5 крупных районов и 15 участков вдоль трассы исследуемого трубопровода. Были определены критерии для оценки опасных геологических процессов с использованием балльного метода и проведена оценка по выделенным ключевым участкам. Кроме того, проведено ранжирование участков до уровня подрайонов, что позволяет более точно оценить риски и разработать стратегии для минимизации потенциальных угроз при строительстве и эксплуатации трубопроводов в этих сложных условиях.

Ключевые слова: многолетнемерзлые грунты, принципы строительства на многолетнемерзлых грунтах, геокриологические процессы и явления, районирование, техногенное воздействие, талики, тепловое взаимодействие

PROBLEMS OF PIPELINE CONSTRUCTION IN SPORADIC PERMAFROST

Rozenberg V.V., Gunar A.Yu.

Lomonosov Moscow State University, Moscow,
e-mail: Liisarozen@gmail.com, gunar_91@mail.ru

The objective of this study is a comprehensive analysis of the most hazardous processes and phenomena occurring during pipeline construction in areas with discontinuous permafrost. The work involved retrospective analysis and processing of engineering survey results, as well as assessment techniques for zoning pipeline route sections. Based on the study results, the most hazardous and complex processes and phenomena for thermal modeling and design were described in detail. The results of the work include both a descriptive part of the exposed geological structure of the study area and a systematized landscape characteristic of the site in accordance with the complexity of pipeline design and operation. According to the landscape zoning, 5 large areas and 15 sections along the route of the studied pipeline were identified. Criteria for assessing hazardous geological processes using the point method were defined, and an assessment was made for the identified key sections. In addition, the sections were ranked to the sub-area level, which allows for a more accurate assessment of the risks and the development of strategies to minimize potential threats during pipeline construction and operation in these difficult conditions.

Keywords: permafrost soils, principles of construction on permafrost soils, geocryological processes and phenomena, zoning, anthropogenic impact, taliks, thermal interaction

Введение

Область распространения вечной мерзлоты наблюдается в основном на Дальнем Востоке, в Восточной Сибири, а также на северных окраинах Западной Сибири и европейской части России [1, с. 3–9]. Зона островной мерзлоты находится за пределами таликовой зоны и простирается от горных районов Дальнего Востока и Восточной Сибири до северных участков Западно-Сибирской низменности, а также до Беломорской горловины и северных побережий Кольского полуострова. Между тем псевдоталиковые участки находятся за пределами островной зоны и представляют собой участки с вечной

мерзлотой, проникающей глубже, чем сезонное промерзание почвы. Отдельные районы, такие как северная половина Кольского полуострова и некоторые участки бассейна р. Печоры, характеризуются вечной мерзлотой только в торфяниках. Острова и группы островов с вечномерзлым грунтом представляют отдельные пространственные единицы, удаленные от основных массивов.

В связи с отсутствием актуализированной мерзлотной съемки в пределах России предлагается условно объединить зоны распространения островной мерзлоты и таликовых зон, так как при устройстве линейных объектов так или иначе ведется работа с границей мерзлого и талого массива грунта.

На сегодняшний день, как показывает большинство исследований, территория распространения несплошной мерзлоты значительно больше, чем считалось ранее, что наблюдается вблизи р. Енисей, Таз, Надым, Лена и др., в связи с чем крупные компании применяют [2, 3] III принцип строительства трубопроводов – «принцип минимального вторжения в грунт», который заключается в наименьшем изменении параметров окружающей среды и создании природного талика вокруг трубопровода с течением времени.

Следует отметить, что за последние 80 лет, когда произошло активное освоение северных регионов, таликовые зоны приурочены не только к природным условиям, а еще и к участкам антропогенного воздействия [4, 5]. Тепловое загрязнение является не одноразовым выбросом, а продолжительным воздействием сооружения на грунтовый массив, которое с каждым годом увеличивает зону активного взаимодействия, что, как правило, приводит к деградации мерзлых толщ [6].

Цель исследования – обзор наиболее опасных процессов и явлений при прокладке трубопроводов в зоне несплошного развития многолетнемерзлых пород.

Материалы и методы исследования

Исследуемый участок расположен на северо-восточной окраине Западно-Сибирской низменности, в пределах Приенисейской равнины, в нижнем течении р. Енисей. Долина реки имеет ассиметричное строение, на правом берегу узкая полоса низкой поймы переходит в крутой склон долины, тогда как на левом берегу низкая пойма переходит в высокую пойму и занимает около 1,5 км. Абсолютные отметки на изучаемой территории изменяются от -38,60 до +28,73 м.

Средняя годовая температура воздуха составляет -9,5 °С; среднемесячная температура воздуха самого холодного зимнего месяца (января) -28,1 °С; средняя месячная температура самого теплого месяца (июля) составляет +14,2 °С. Средняя декадная высота снежного покрова по постоянной рейке равна 42 см. Средняя глубина оттаивания почвы 117 см.

В рамках проведения исследования были выполнены следующие виды работ:

- анализ архивных материалов;
- анализ маршрутных наблюдений;
- анализ материалов бурения;
- анализ термометрических измерений;

– анализ лабораторных исследований.

Обработка графических материалов проводилась с помощью программного комплекса «SASPlanet», обработка термометрических измерений и статистическая обработка лабораторных данных были произведены в программе «Microsoft Excel».

Результаты исследования и их обсуждение

Согласно нормативной документации применяют два типа прокладки трубопроводов: открытый и закрытый, в данном случае рассматривается открытый способ прокладки трубопровода.

При открытом способе прокладки трубопровода, а именно при разработке траншеи, необходимо учитывать сложное геокриологическое строение верхней толщи массива грунтов. При проектировании важно обращать внимание не только на физико-механические свойства пород, но и на геометрию распространения талых и мерзлых зон.

Наибольшей проблемой при проведении инженерно-геологических изысканий является определение геометрических параметров таликов и скрытых повторно-жильных льдов [7].

Талики представляют наибольшую опасность, так как это не просто талый массив грунта, а целая геосистема, которая существует в определенном напряженно-деформированном состоянии, отличном от напряженного состояния исследуемого массива в целом, в связи с чем возникает вопрос о возможности прогнозирования его поведения при «вскрытии».

Глобально считается, что талики будут устойчивы на период оборудования траншеи, что не подтверждается практикой, именно для этого необходимо прогнозировать свод обрушения таликовой зоны. При прогнозировании обрушения таликовой зоны необходимо учитывать следующие факторы: время после проходки траншеи, уровень грунтовых вод, физико-механические характеристики грунтов.

Проблемой выявления таликовых зон является недостаточная дискретность и точность измерения температуры грунтов при термометрии и недостаточное изменение напряженно-деформированного состояния массива при проходке скважин, так, например, далеко не в каждом талике будет обнаружена вода при бурении скважин, в то время как при фактическом его вскрытии будет происходить активное отжатие воды (рис. 1).

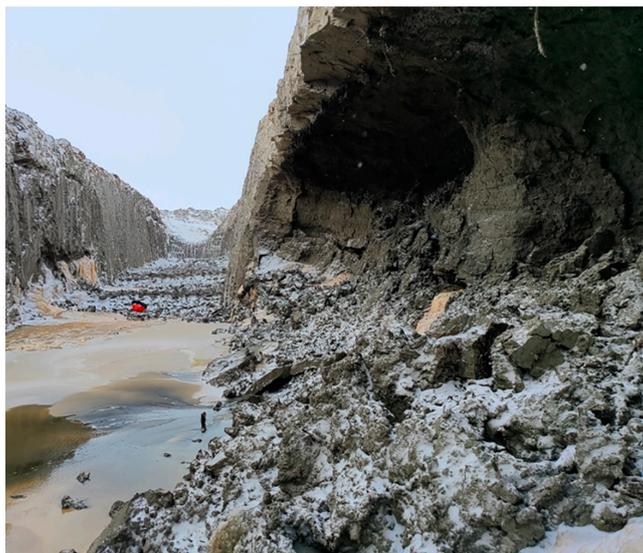


Рис. 1. Вскрытый талик

Механизм формирования таликов в пределах речных долин, как правило, однотипный и имеет следующий вид: в пойменной части после схода воды образуются озера и озера в пониженных частях рельефа, далее скопившаяся вода оказывает отепляющее влияние на нижележащие мерзлые грунты, формируя талую зону, которая расширяется с каждым годом существования водоема [8]. Бывают случаи, когда такие озера заболачиваются, происходят процессы осадконакопления и через некоторое время озеро пропадает, но талик остается, и тогда прогнозирование таликовых зон является весьма трудной задачей.

Присутствие таликовых зон также осложняет расчеты проектируемого трубопровода на устойчивость к морозному пучению грунтов. Так, для периферийной зоны талика будут характерны большие деформации пучения, чем для центральной части талика. Это связано с тем, что вода мигрирует к фронту промерзания, обводняя периферийные части талых зон. Также в таликовой зоне касательные силы морозного пучения имеют векторно не менее 2 направлений: система поверхность – грунт, система грунт – талик. Соответственно, следует учитывать данные силы при расчетах растяжения трубопровода.

Кроме того, при расчетах глубины оттаивания и промерзания в местах распространения таликовых зон следует применять метод послойного суммирования.

Также стоит обратить внимание на химический состав: в пробах из скважин вода имеет менее пестрый химический состав,

нежели вода «отжатая», это можно объяснить тем, что при вскрытии таликовой зоны кроме изменения напряженно-деформируемого состояния происходит еще и значительное окисление полученного «обнажения», в связи с чем начинают происходить активные химические реакции. Подтверждением данной гипотезы служат примазки ожелезнения и фторизации пород на стенках обустроенной траншеи, не обнаруженных ранее в керне при бурении скважин (рис. 2).

Интересно, что данные проявления характерны для восстановительной обстановки, которую должно сопровождать торфяные или сильноорганические отложения, которые также фактически не были зафиксированы по данным бурения.

Еще одним фактом, осложняющим строительство и эксплуатацию трубопровода, служат повторно-жильные льды, которые не были заактивированы при рекогносцировочном обследовании ввиду их подземного залегания и относительно малой мощности (рис. 3). Поэтому для работ в зонах с прерывистой мерзлотой предлагается использовать межскважинный каротаж.

Не стоит забывать и о наличии эрозионных процессов, связанных с особенностями течения рек. Для обеспечения сохранности трубопровода необходимо осуществлять прокладку ниже расчетного базиса боковой и донной эрозии. Для северных рек это особенно актуально ввиду их активного меандрирования. Таким образом, геоморфологические факторы также необходимо учитывать при проведении расчетов.

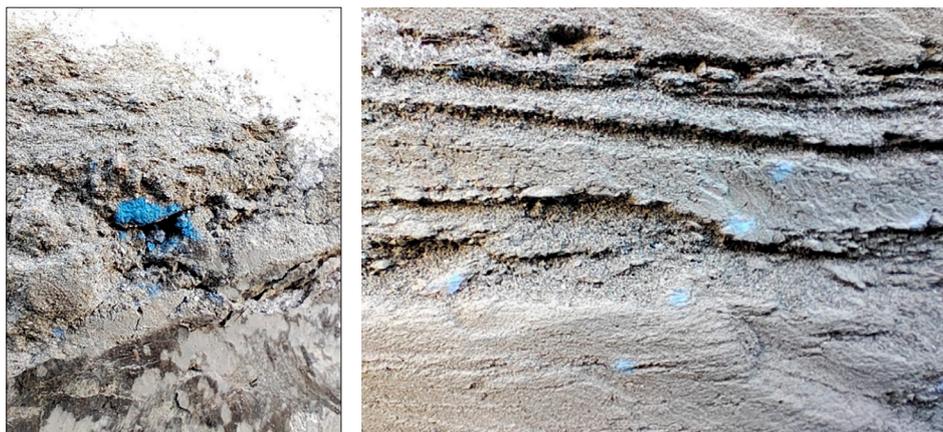


Рис. 2. Примазки вивианита в массиве горных пород

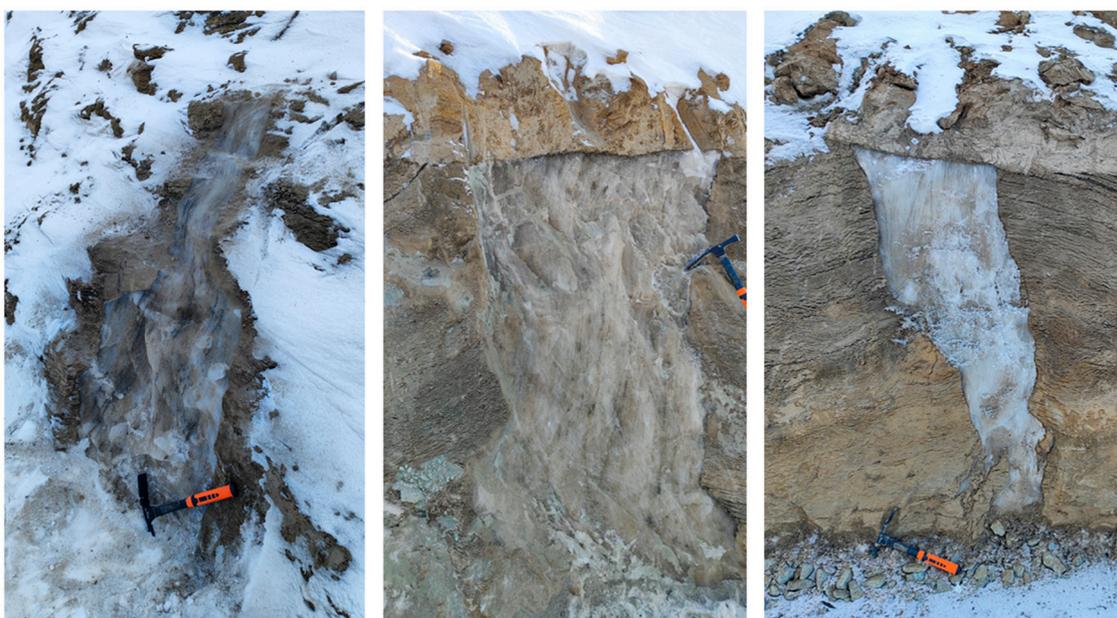


Рис. 3. Повторно-жильные льды в разрезе

Таблица 1

Средняя температура грунтов на глубине нулевых годовых амплитуд
на разных элементах рельефа

Геоморфологический элемент	Положение относительно р. Енисей	Средняя температура грунта на глубине 10 м
Надпойменная терраса	Правый берег	-3,51
	Левый берег	-4,5
Склон террасы	Правый берег	-2,63
	Левый берег	-2,5
Высокая пойма	Правый берег	-2,65
	Левый берег	-0,5
Низкая пойма	Правый берег	-0,5
	Левый берег	-0,2
Русло реки	Акватория	+6,4

Таблица 2
Сводный анализ сложности инженерно-геокриологических условий

Индекс	I-A-1	I-A-2	I-B-1	I-B-2	II-B-1	II-B-2	III-Г-1	III-Г-2	III-Г-3	III-Д-1	III-Д-2	III-Д-3	IV-E-1	V-Ж-1	V-Ж-2
	русло реки			низкая пойма реки		высокая пойма реки						склон террасы реки			
Геоморфологический элемент	отсутствуют сквозной талик		спешное		сплошное		сплошное			область несплошных таликов на глубине 0–17 м			сплошное		
	ММП до глубины 11–38, м	несквозной талик на глубине 0–4,7	пески, супеси (ан)	пески, супеси (ан)	пески, суглинки (ан)	пески, суглинки (ан)	суглинок (ан)	суглинок (ан)	суглинок (ан)	песок, суглесь, глина (ан)	песок, суглесь, глина (ан)	песок, суглесь, глина (ан)	суглинок, суглесь, глина (ан)	суглинка, суглесь (ан)	суглинка, суглесь (ан)
Распространение ММП	пески, суглинки (ан)		пески, суглесь (ан)		пески, суглинки (ан)		суглинок (ан)			песок, суглесь, глина (ан)			суглинка, суглесь (ан)		
	пески, суглинки (ан)		пески, суглесь (ан)		пески, суглинки (ан)		суглинок (ан)			песок, суглесь, глина (ан)			суглинка, суглесь (ан)		
Тип и возраст грунта на глубине заложения трубопровода	пески, дресвяно-песчаный грунт (ан); суглинки (ан); суглесь (ан); супеси (ан)		пески, суглесь (ан)		пески, суглинки (ан)		суглинок (ан)			песок, суглесь, глина (ан)			суглинка, суглесь (ан)		
	пески, дресвяно-песчаный грунт (ан); суглинки (ан); суглесь (ан); супеси (ан)		пески, суглесь (ан)		пески, суглинки (ан)		суглинок (ан)			песок, суглесь, глина (ан)			суглинка, суглесь (ан)		
Грунтовые воды	0,0		-		0,1–0,2		-			9,5–17,0			-		
	0,0		-		0,1–0,2		-			9,5–17,0			-		
Льдистость грунтов (0 – талые, 1 – нельдистые, 2 – слабльдистые, 3 – льдистые, 4 – сильнльдистые)	0		2 3		3 4		2 3 4			2 3 0			2 3		
	0		2 3		3 4		2 3 4			2 3 0			2 3		
Инженерно-геологические процессы	донная и боковая эрозия		Процессы термокарста, пучение площадное, подтопление, заболачивание										Процессы термокарста, пучение площадное, солифлюкция		
	донная и боковая эрозия		Процессы термокарста, пучение площадное, подтопление, заболачивание										Процессы термокарста, пучение площадное, солифлюкция		
Балльность сложности территории	2		5		5		5			6			4		
	2		5		5		5			6			4		

Геоморфологический фактор следует учитывать и при расчетах промерзания и оттаивания грунта, осадки трубопровода. Как видно из табл. 1, температура грунта напрямую зависит от геоморфологического элемента, в пределах которого он распространен, а именно температура грунта увеличивается от водораздела к руслу реки.

Глубина слоя сезонного протаивания на заболоченных участках достигает 0,4 м, на высоких водораздельных участках – от 0,5 до 1,5 м. На открытых пространствах, лишенных растительности, сложенных песчаными и супесчаными отложениями, глубины сезонно-талого слоя достигают максимальных значений от 2,0 до 2,5 м.

На территории исследований выделяют 5 районов по геоморфологическому признаку и 15 участков (табл. 2).

При оценке сложности участка были использованы следующие критерии (в баллах):

- наличие грунтовых вод (1 балл);
- особенности распространения многолетнемерзлых пород (2 балла);
- льдистость (от 0 для талых грунтов до 4 для сильнольдистых);
- развитие опасных геокриологических процессов (в зависимости от степени пораженности территории от 1 до 4 баллов).

При составлении балльного анализа в табличной форме четко видно, что наиболее сложными условиями обладает участок высокой поймы.

Заключение

В исследовании рассматривается открытый способ прокладки трубопровода, который требует особого внимания к геокриологическому строению верхней части грунтового массива. При проектировании необходимо учитывать не только физико-механические свойства пород, но и геометрию распределения талых и мерзлых зон. Это важно для предотвращения непредвиденных изменений в состоянии и структуре грунта. Вскрытые или вновь образующиеся таликовые зоны представляют значительную опасность ввиду их неоднородного состава и строения. Прогнозирование их поведения при вскрытии траншеи является

сложной задачей и требует учета времени их существования после проходки траншеи, уровня грунтовых вод и физико-механических характеристик грунтов. Присутствие таликовых зон усложняет расчеты устойчивости трубопровода к морозному пучению. Периферийные зоны таликов подвержены большим деформациям, что необходимо учитывать при проектировании. Таким образом очевидно, что необходимо пересмотреть комплекс обязательных инженерно-геологических исследований в зоне распространения несплошной мерзлоты, ввести выполнение трехмерного моделирования теплового взаимодействия трубопровода и грунтового массива, а также производить геокриологический мониторинг среды до начала процесса строительства. Также немаловажным является прогнозирование активизации геокриологических процессов при антропогенном освоении криолитозоны.

Список литературы

1. Геокриология СССР. Средняя Сибирь / Под ред. Ершова Э.Д. М., 1989. 413 с.
2. Вабищевич П.Н., Варламов С.П., Васильев В.И., Васильева М.В., Степанов С.П. Численное моделирование температурного поля многолетнемерзлого грунтового основания железной дороги // Математическое моделирование. 2016. Т. 28, № 10. С. 110–124.
3. Баборыкин М.Ю. Сходимость результатов дистанционного метода дешифрирования с полевыми методами на линейном объекте. На примере оползневого участка // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 33, № 7. С. 161–175.
4. Казанцева Л.А., Воробьева С.В. Мониторинг геокриологических условий природных ландшафтов на трассе газопровода Надым – Пунга // Транспорт и машиностроение Западной Сибири. 2020. № 1. С. 29–35.
5. Середин В.В., Красильников П.А. Инженерно-геологическое районирование, основанное на многомерной оценке классификационного показателя // Вестник Пермского университета. Геология. 2016. № 2. С. 48–54.
6. Реутских Н.В., Бережной М.А., Дуденко И.А. Геотехнический мониторинг для магистральных трубопроводов в различных типах многолетнемерзлых пород // Научный журнал Российского газового общества. 2016. № 2. С. 22–26.
7. Егорова Т.Р., Кычкина В.Г., Колесов А.Е. Прогнозирование температурного взаимодействия подземного нефтепровода и многолетнемерзлых грунтов // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 6. С. 124–130.
8. Гарагуля Л.С., Гордеева Г.И., Полтев Н.Ф., Смирнов В.В. Развитие инженерно-геологических процессов при строительстве газопроводов в области распространения многолетнемерзлых пород // Мерзлотные исследования. 1997. № XVI. С. 19–26.