

УДК 624.131

ОЦЕНКА ИНЖЕНЕРНО-ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ТЕРРИТОРИИ ТРАССЫ ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО ТРУБОПРОВОДА НА МЕЖДУРЕЧЬЕ МАЛХОЙЯХА–ПУР

Филимонов Андрей Алексеевич^{1,2},
andrey_filimonoff@list.ru

Строкова Людмила Александровна¹,
sla@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² АО «ТомскНИПИнефть»,
Россия, 634027, г. Томск, пр. Мира, 72.

Актуальность работы определена важностью безаварийной эксплуатации объектов трубопроводного транспорта, расположенного в криолитозоне. Проявления опасных инженерно-геологических процессов во время эксплуатации подземного трубопровода могут привести к изменениям системы «многолетнемерзлый грунт – трубопровод», что повлечет за собой возникновение нештатных нагрузок на тело трубопровода, отказы трубопровода и аварии. Требуется проводить анализ активизации и развития на трассе трубопровода опасных геологических процессов для корректной оценки изменений инженерно-геокриологических условий во время эксплуатации трубопровода.

Целью является ранжирование участков трассы с развивающимися опасными геологическими процессами и выявление их влияния на условия дальнейшей эксплуатации объекта.

Методы: анализ результатов инженерных изысканий по объекту исследования и данных геотехнического мониторинга нефтеконденсатопровода; оценочные методики для проведения районирования участков трассы.

Результаты. На первом этапе исследования были собраны и проанализированы данные по трассе. Трасса разбита на восемь ключевых участков, характеризующихся определенными технологическими параметрами трубопровода: узлы запорной арматуры, переходы с байпасными линиями и др. Определены критерии для оценки опасных геологических процессов балльным методом, и проведена оценка по ключевым участкам. На втором этапе была определена модель районирования, обозначены граничные критерии удельного веса выявленных опасных геологических процессов для каждого участка трассы, обозначены таксоны, проранжированы участки трассы в соответствии с моделью районирования. Идентифицированы наиболее уязвимые участки трассы нефтеконденсатопровода с точки зрения проявления геологических процессов.

Ключевые слова:

районирование, инженерно-геологические условия, опасные геологические процессы, подземный трубопровод, многолетнемерзлые грунты.

Введение

Строительство подземного трубопровода в криолитозоне сопряжено с преодолением разнообразных инженерно-геокриологических обстановок. Система «подземный трубопровод – многолетнемерзлый грунт» является многокомпонентной, к ней предъявляются повышенные требования как на этапе проектирования: выполнение прогнозных теплотехнических расчетов состояния грунтов, корректного подбора защитных мероприятий, оценка деформаций грунтов, а также деформаций тела трубопровода, так и на этапах строительства и эксплуатации. Инженерно-геологическое районирование территории трассы при проектировании позволяет обосновать защитные мероприятия. В период эксплуатации трубопровода повторное инженерно-геологическое районирование трассы, учитывающее активизацию опасных геологических процессов при техногенном воздействии, позволяет оптимизировать систему геотехнического мониторинга для безопасного и безаварийного функционирования трубопровода.

Целью данного исследования является комплексная оценка инженерно-геокриологических условий территории трассы трубопровода на этапе эксплуатации.

В качестве объекта исследования выбрана трасса нефтеконденсатопровода с установки подготовки нефти (УПН) Валанжинской залежи до приемосдаточного пункта (ПСП) Заполярное на междуречье Малхойяха–Пур (рис. 1). В задачи исследования входили: оценка инженерно-геологических условий трассы; идентификация участков с активизировавшимися во время эксплуатации опасными геологическими процессами; оценка влияния данных процессов на безопасную эксплуатацию нефтеконденсатопровода.

Методика исследования

Исследование проведено в 2022 г. в отделении геологии ТПУ и включало в себя:

- анализ материалов проектно-сметной документации;
- анализ материалов инженерно-геологических изысканий участков трассы, анализ материалов геотехнического мониторинга объекта исследования;
- установление принципов и методики районирования;
- оценку и районирование территории по степени сложности инженерно-геологических условий.

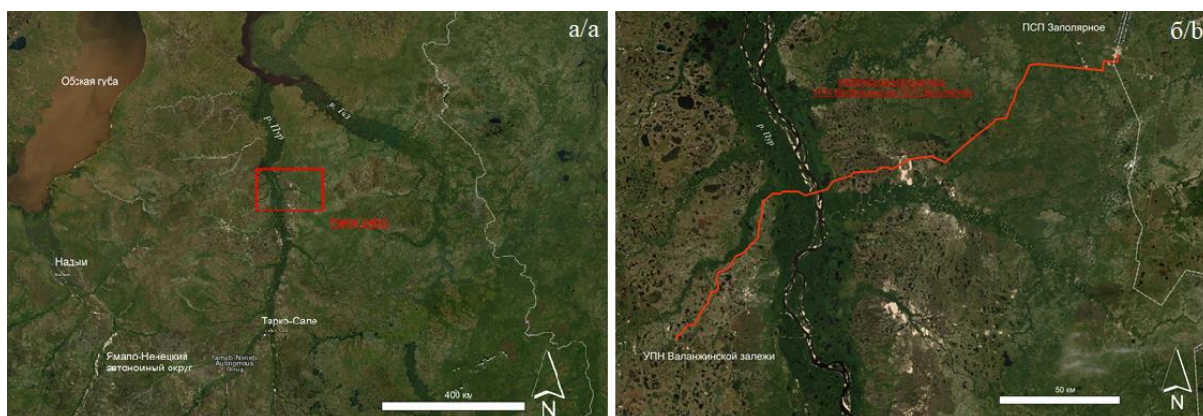


Рис. 1. Спутниковые снимки участка исследования: а) спутниковый снимок месторасположения объекта исследования; б) увеличенный вид участка, трасса нефтеконденсатопровода выделена цветом

Fig. 1. Satellite images of the study area: а) satellite image of the location of the study object; б) enlarged view of the area, the route of the oil and condensate pipeline is highlighted in color

Различные методики районирования инженерно-геологических условий рассмотрены в работах [1–25], в достаточном количестве работ отмечено использование ГИС-технологий в инженерно-геологической оценке и районировании территорий [26–39]. Для определения веса факторов при классификации объектов широко используются традиционные методы, такие как анализ главных компонент, метод анализа иерархий, и нетрадиционные, как вероятностный метод оценки [40–45]. В данном исследовании использована методика балльной оценки для факторной классификации, для районирования – учет удельного веса опасных геологических процессов для участков трассы.

Характеристика инженерно-геологических и климатических условий

На исследуемой территории в разные годы проводились изыскательские и тематические работы рядом организаций, в том числе институтом ВСЕГИНГЕО и МГУ им. Ломоносова. Из крупномасштабных работ можно выделить проект, выполненный ОАО «Гипротюменнефтегаз» в 2012 г. на стадии проект. Материалы прошлых лет изысканий были использованы для общей оценки инженерно-геологических и геокриологических условий, для определения категории сложности инженерно-геокриологических условий. По совокупности характеристик компонентов геологической среды район трассы отнесен к территории III категории сложности инженерно-геокриологических условий.

Климат района трассы трубопровода суровый, континентальный. Зима длится 6–6,5 месяцев, средняя температура января -20 – -24 °C. Весна обычно короткая (30 дней), холодная, с резким изменением погоды, с частыми возвратами холода и заморозками. Средняя температура самого тёплого месяца -12 – -14 °C. Осень короткая, с частыми ранними заморозками. Средние месячные скорости ветра изменяются в пределах 3,3–4,5 м/с. Средняя высота снежного покрова из наибольших за зиму по постоянной рейке составила 72 см, максимальная – 120 см.

В связи с северным положением территории изменение притока солнечной радиации в течение года выражено крайне резко. Радиационный баланс в теплое время года положителен, с наибольшими величинами в июне–июле. Отрицательный баланс наблюдается с октября по март и достигает наименьших величин в декабре–январе. Период с положительным радиационным балансом составляет шесть месяцев – с апреля по сентябрь.

По схеме геоморфологического районирования изучаемая территория приурочена к Северной геоморфологической провинции, Обско-Тазовской области, Пур-Тазовскому району с преобладающим типом рельефа – волнистая равнина. Абсолютные отметки поверхности изменяются от 5,8 (урез воды в р. Пур) до 90 м (рис. 2, а). Преобладающий угол наклона поверхности до 5° (рис. 2, б). Максимальные превышения водоразделов над урезами рек и озер – менее 5 м.

Геологическое строение рассматриваемого объекта представлено следующими стратиграфо-генетическими комплексами: верхнеплейстоценовых и голоценовых аллювиальных и озерно-аллювиальных отложений поймы (аН) и трех надпойменных террас ($a^1\Pi_4$ -Н, $a^2\Pi_3$, $la^3\Pi_{ер}$) (рис. 2, в), а также современных биогенных (болотных) грунтов (бН), развитых на всех геоморфологических уровнях.

На рис. 2, г приведены значения ARVI (Atmospherically Resistant Vegetation Index) – вегетационного индекса, устойчивого к влиянию атмосферы. Значения индекса изменяются от -1 до 1. Отрицательные значения характерны для водоемов и водотоков района (зеленый цвет). Растительность отображается в оттенках красного.

Геокриологические условия

Трасса расположена на границе зон сплошного – I и прерывистого – II распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ). По фактическим наблюдениям протяженность участков с ММГ по трассе нефтеконденсатопровода составляет 55,6 %. Талые грунты приурочены к долинам рек и ложбинам стока в районе крупных озер со сквозными таликами или

с поверхности мощных торфяных отложений, наличие под ними глинистых грунтов с низкими фильтрационными свойствами может активизировать техногенные процессы, связанные с переувлажнением и подтоплением территории. Нарушение снежного покрова при инженерной деятельности и наличие на данной территории пучинистых грунтов может способствовать активизации процессов морозного пучения.

При нарушении мохового покрова может происходить активизация термоэрозии, проявляющаяся в виде мелких ложбин стока. При снятии растительного покрова, изменения дренарованности территории и тепловое влияние сооружений могут привести к развиту термокарста.

Гидрогеологические условия

В сферу взаимодействия трассы нефтеконденсатопровода с геологической средой в данном районе попадают грунтовые воды верхнего гидрогеологического этажа, среди которых выделяются следующие типы:

- надмерзлотные воды слоя сезонного оттаивания;
- надмерзлотные воды несквозных и сквозных таликов;
- подземные воды современного болотного горизонта.

Водовмещающими породами являются чаще талые пески, средние, мелкие или пылеватые с прослойками и линзами средних. Водоупором для выделенных горизонтов служит кровля толщи многолетнемерзлых пород, реже глинистые толщи.

Грунтовые воды несквозных и сквозных таликов на данной территории приурочены к песчаным и глинистым отложениям. На момент проведения изысканий в декабре 2013 г. – апреле 2014 г. уровень подземных вод зафиксирован на глубине от 2,2 до 11,9 м. На момент проведения изысканий в мае–июле 2018 г. уровень подземных вод зафиксирован на глубине от 0,1 до 9,8 м. Общая разгрузка водоносного горизонта в основном происходит в естественные дренажи.

Надмерзлотные воды слоя сезонного оттаивания (СТС), претерпевающие ежегодные изменения фазового состояния, приурочены к участкам развития многолетнемерзлых пород сливающегося типа и имеют повсеместное распространение на всех геоморфологических уровнях. Эти воды залегают на глубине 0,0–1,5 м от дневной поверхности непосредственно над кровлей ММГ. Воды формируются с началом сезонного оттаивания, максимальное их развитие совпадает с наибольшей глубиной сезонного оттаивания. На участках развития СТС супесчано-суглинистого состава надмерзлотные воды имеют преимущественно спорадическое распространение и малую обильность. На участках развития песчаных отложений обильность грунтовых вод несколько больше. Грунтовые воды СТС повсеместно находятся в безнапорном, часто застойном состоянии. При промерзании надмерзлотного горизонта в благоприятных условиях (при образовании локальных замкнутых систем) могут формироваться небольшие (доли атмосферы) криогенные напоры, при этом отмечено крио-

генное распучивание грунтов и формирование сезонных бугров пучения. Водообильность крайне незначительна; воды безнапорные, как правило, пресные, имеют гидрокарбонатно-хлоридный кальциево-магниевый состав. В бортах дренарованных долин, сложенных талыми грунтами, уровень вод отмечен на глубине 7,2 м. Часто талые несквозные талики безводны.

Надмерзлотный горизонт несквозных таликов изолирован в пространстве толщей ММГ, реже наблюдается инфильтрация через талые грунты в горизонт сквозных подрусловых и подозерных таликов. Область питания и разгрузки подрусловых и подозерных таликов совпадает. Пойма р. Пур сложена талыми грунтами – сквозной талик, в гривах которого ниже границы промерзания встречены новообразования мерзлоты – «перелетки».

Слабоводоносный болотный горизонт залегает первым от поверхности земли, имеет локальное распространение и приурочен к болотным массивам. Водовмещающими породами являются торфы и торфяно-илистые образования, подстилаемые мелкими песками или суглинками. Воды безнапорные. Уровень воды устанавливается у поверхности земли или на глубине 0,1–0,3 м, непосредственно под травяно-моховым слоем. Мощность горизонта соответствует мощности торфяной залежи. При оттаивании песчаной толщи под верховыми болотами часть торфяного массива проседает, образуя обводненные понижения и формируя надмерзлотный горизонт несквозных или сквозных таликов. Часть болотного массива представлена крупнобугристыми торфяниками. Высота бугров от 1 до 10 м. Невысокие бугры имеют округлую форму, высокие – хребтообразную. В основании бугров залегает мерзлотное минеральное ядро, покрываемое слоем торфа мощностью 1–2,5 м. В холодное время года горизонт проморожен. На момент проведения изысканий (май–июль 2018 г.) уровень подземных вод зафиксирован на глубине от 0,1 до 1,8 м.

Все типы подземных вод имеют тесную гидравлическую связь и рассматриваются как единый водоносный горизонт. Режим вод может меняться в зависимости от времени года и количества выпавших атмосферных осадков.

Часть трассы располагается на территории, затапливаемой в весеннее половодье р. Пур, а также затапливаемой талой и дождевой водой с водосборов ближайших водотоков бассейна р. Пур.

Геологические и инженерно-геологические процессы трассы

Из опасных геологических процессов в период изысканий по трассе встречены: заболачивание, переработка берегов (деформация русла на участках переходов через водотоки), наледообразование, морозное пучение грунтов, термокарст, затопление, подтопление. По совокупности проявления категория опасности природных процессов территории трассы относится к умеренно-опасной.

Заболачивание трассы нефтепровода составляет порядка 25 %.

Таблица 1. Перечень участков нефтеконденсатопровода

Table 1. List of pipeline sections

№ участка Site no.	Пикетаж участка Stationing of the site	Условное наименование участка Conditional name of the site	Протяженность участка, м Length of the site, m
1	ПК0+00–ПК1+27	УПН Валанжинской залежи – Узел 1 Oil treatment plant Valanginskaya deposit – Node 1	127
2	ПК1+27–ПК4+20	Узел 1–Узел 2/Node 1–Node 2	293
3	ПК4+20–ПК14+20	Узел 2–Узел 3/Node 2–Node 3	1000
4	ПК14+20–ПК160+00	Узел 3–Узел 4/Node 3–Node 4	14580
5	ПК160+00–ПК252+42,58	Узел 4–Узел 5/Node 4–Node 5	9242,58
6	ПК252+42,58–ПК260+40	Узел 5–Узел 6/Node 5–Node 6	797,42
7	ПК260+40–ПК293+45,8	Узел 6–Узел 7/Node 6–Node 7	3305,8
8	ПК293+45,8–ПК377+50	Узел 7–река Пур/Node 7–River Pur	8404,2

Морозное растрескивание грунтов происходит на водораздельных поверхностях с минимальной высотой снежного покрова, формируя медальонную тундру и полигонально-валиковые формы рельефа, активно проявляется на «свежих поверхностях», лишенных растительности.

Развитие термокарста происходит при нарушении теплообмена в системе «атмосфера – мерзлый грунт» в сторону увеличения теплопотока в годовом цикле к мерзлым грунтам. Основные формы криогенного рельефа и образований – это термокарстовые западины и озера, образовавшиеся на участках выхода на поверхность льдистых отложений. Термокарст развит локально, в настоящее время слабо прогрессирует в связи с общей деградацией мерзлоты, происшедшей естественно в результате потепления климата. Обилие озер, которые обходит трасса, подтверждает это. В настоящее время по тундре происходит перемещение термокарстовых озер, отмеченное при сравнении топокарт и космоснимков, образование подозерных таликов, образование хасыреев.

Криогенное пучение при сезонном и многолетнем промерзании грунтов развито локально. Чаще проявляется в слое сезонного промерзания–протаивания, когда в предзимний период он увлажняется до критического значения (влажности порога пучения) и представлен глинистыми грунтами. Величина сезонных бугров пучения не превышает 0,15–0,3 м, на болотах – до 0,5 м, высота многолетних бугров пучения достигает 2,5 м.

Результаты исследования

Из всей протяженности трассы нефтеконденсатопровода 102,4 км для анализа и инженерно-геологического районирования был выделен участок от начала трассы до реки Пур, общей протяженностью 37,8 км. Данный участок нефтеконденсатопровода можно разделить на участки меньшей длины между узлами запорной арматуры для проведения детального исследования геологических процессов на участках. На выделенном участке трассы расположено 7 узлов, делящих нефтеконденсатопровод на 8 участков (табл. 1).

Вначале были собраны и проанализированы имеющиеся опубликованные и фондовые материалы и разработана концепция районирования. В качестве источников информации для составления концепции

районирования были отобраны: данные региональных геологических исследований района, результаты бурения и опробования инженерно-геологических скважин, результаты проведения геотехнического мониторинга объекта – визуального обследования, термометрических исследований по трассе, внутритрубной диагностики профиломером и магнитными дефектоскопами, измерения уровня грунтовых вод.

Следующим этапом работы стала оценка развития опасных геологических процессов. Была разработана классификационная схема геологических процессов на основании результатов инженерных изысканий – для рассмотрения выделены геологические процессы, проявившиеся в районе. Каждый процесс по степени распространения и, как следствие, своему влиянию на эксплуатацию трубопровода охарактеризован по балльной шкале с разбивкой на 2–4 градации (табл. 2).

Обобщенная оценка развития опасных геологических процессов (в баллах) по каждому выделенному участку трассы приведена на рис. 3.

Таблица 2. Оценка развития геологических процессов

Table 2. Assessment of engineering-geological conditions

Критерий оценки Evaluation criterion	Характеристика Description	Вес критерия в баллах Criterion weight in points
Заболачивание/Bogging	Отсутствие/Absense	0
	Наличие/Presence	1
Переработка берегов (переходы через водотоки) Bank processing (crossings through watercourses)	Отсутствие/Absense	0
	Наличие/Presence	1
Наледеобразование Ice mound formation	Отсутствие/Absense	0
	Наличие/Presence	1
Морозное пучение грунтов Frost heave	Отсутствие/Absense	0
	Наличие/Presence	1
Термокарст/Themokarst	Отсутствие/Absense	0
	Наличие/Presence	1
Обводнение/Watering	Отсутствие/Absense	0
	Наличие/Presence	1
Наличие многолетнемерзлых пород Permafrost presence	Отсутствие/Absense	0
	Островное/Sporadic	0,5
	Прерывистое Discontinuous	1
	Сплошное Continuous	2

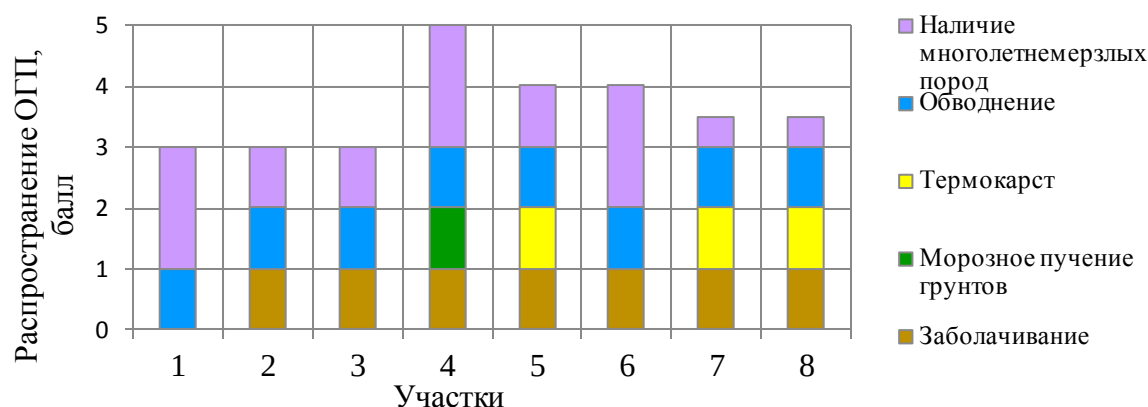


Рис. 3. Балльная оценка инженерно-геологических участков трассы

Fig. 3. Scoring of engineering-geological sections of the route

Нами установлено, что по трассе от УПН до реки Пур в период эксплуатации нефтеконденсатопровода активизировались некоторые ОГП, описанные при выполнении инженерных изысканий. Так, на всех участках трассы отмечено наличие ММГ различных типов распространения: сплошное распространение ММГ со сливающейся мерзлотой на участках № 1, 4, 6, прерывистое распространение со сквозными и несквозными таликами на участках № 2, 3, 5, и редкостровное распространение на участках № 7, 8. Именно поэтому на части трассы были предусмотре-

ны мероприятия по температурной стабилизации многолетнемерзлых грунтов (рис. 4, а), однако зафиксировано изменение геокриологических условий: весной 2022 г. обнаружены проявления обводнения, которые встречены на всех восьми участках трассы, заболачивания встречены на семи из восьми участков трассы (рис. 4, а, б).

Также по трассе были встречены локальные проявления морозного пучения – на участке № 4, при переходе через автодорогу; термокарста – выявлены на участках № 5, 7, 8 (рис. 4, в, г).



Рис. 4. Геологические процессы по трассе трубопровода: а) заболачивание; б) обводнение; в) термокарст; г) морозное пучение

Fig. 4. Geological processes along the pipeline route: a) swamping; b) watering; c) thermokarst; d) frost heaving

На основании методики балльной оценки развития геологических процессов была предложена модель районирования участков трассы по сложности инженерно-геологических условий для эксплуатации трубопровода (табл. 3).

Таблица 3. Модель районирования

Table 3. Zoning model

Наименование таксона Taxon name	Оценка условий Evaluation of conditions	Значения граничного критерия Boundary criterion values, %
I	Благоприятные условия Favourable conditions	$\gamma < 25$
II	Умеренно благоприятные условия Moderately favourable conditions	$25 \leq \gamma < 50$
III	Неблагоприятные условия Unfavourable conditions	$50 \leq \gamma < 75$
IV	Весьма неблагоприятные условия Very unfavourable conditions	$75 \leq \gamma$

Обоснование граничных условий для выделения таксонов

В соответствии с моделью районирования был назначен граничный критерий γ – удельный вес выявленных опасных геологических процессов для участка трассы.

Оценку удельного веса предлагается определять по формуле:

$$\gamma = \frac{\sum i}{n * 100},$$

где γ – удельный вес воздействия опасных геологических процессов на определенном участке трубопровода, %; i – вес критериев выявленных опасных геологических процессов в баллах; n – максимальное количество баллов в соответствии с классификационной схемой.

В соответствии с моделью районирования выделенные ранее участки нефтеконденсатопровода были проранжированы по сложности инженерно-геологических условий, пораженность участков трассы ОГП приведена на рис. 5.

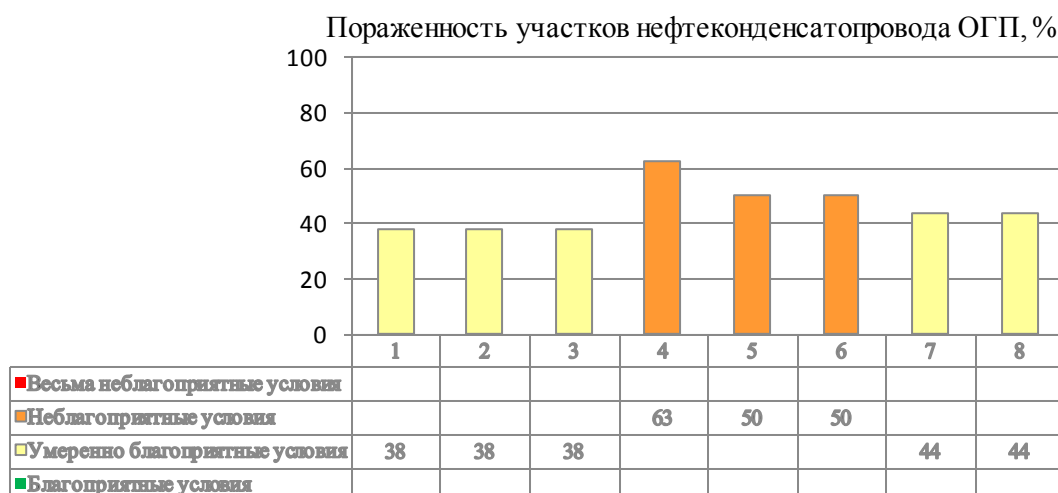


Рис. 5. Распространение опасных геологических процессов на участках трубопровода

Fig. 5. Distribution of dangerous geological processes in the pipeline sections

По полученным инженерно-геологическим данным выделены следующие таксоны:

- I – таксон, характеризуемый благоприятными условиями, по трассе нефтеконденсатопровода не выявлен;
- II – таксон, характеризуемый умеренно благоприятными условиями, по трассе выявлено 5 участков. Участки сложены в основном низкотемпературными многолетнемерзлыми грунтами, твердомерзлыми суглинками и песками. На участках встречены процессы обводнения и заболачивания, а также на двух из пяти участков встречены процессы термокарста;
- III – таксон характеризуется неблагоприятными условиями, по трассе выявлено 3 участка. Участки имеют сложное геологическое строение, сложены в основном пластичномерзлыми суглинками и супесями с часто сменяемым наличием по трассе сквозных и несквозных таликов. Из процессов

наблюдаются заболачивание, обводнение, морозное пучение;

- IV – таксон характеризуется весьма неблагоприятными условиями, по трассе нефтеконденсатопровода не выявлен.

Таким образом, в результате проведенного инженерно-геологического районирования исследуемая часть трассы нефтеконденсатопровода разделена на 8 инженерно-геологических участков, которые были ранжированы на 4 класса по степени инженерно-геологической сложности, из которых на трассе были выявлены только 2 (рис. 6).

Сравнение результатов инженерно-геологического районирования

Было проведено сравнение результатов ранжирования участков трубопровода с результатами проведенного в 2022 г. внутритрубного обследования трубопровода профиломером и магнитными дефектоскопами с продольным и поперечным намагничиванием.

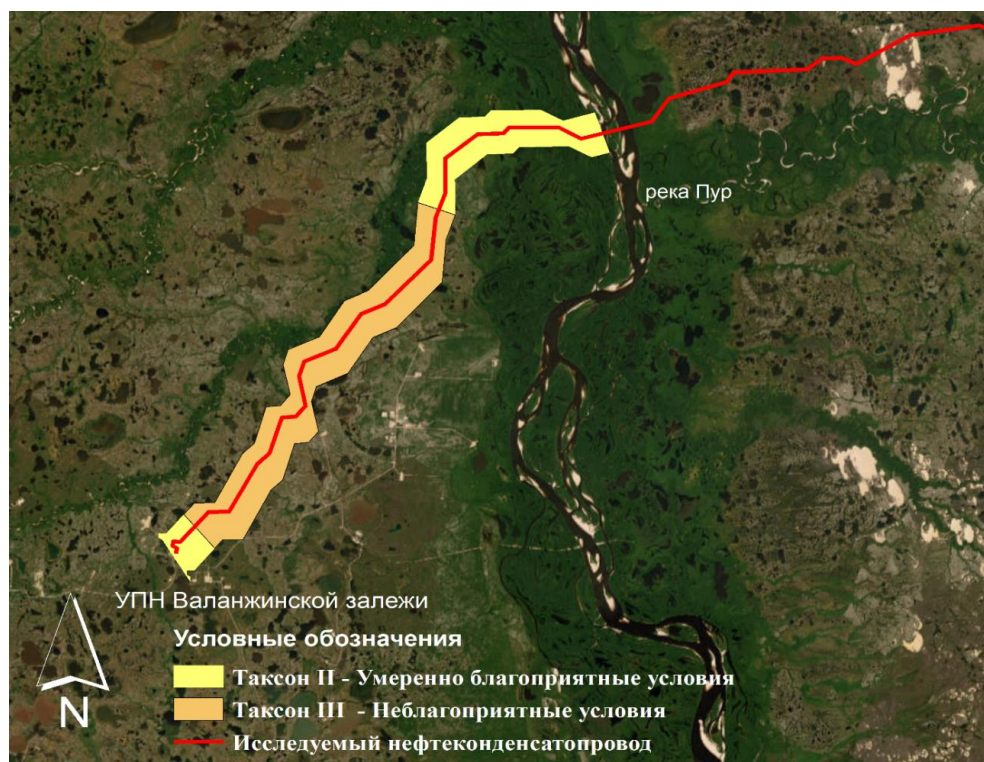


Рис. 6. Карта инженерно-геологического районирования участков трассы нефтеконденсатопровода
Fig. 6. Map of engineering-geological zoning of sections of the oil and condensate pipeline route

В соответствии с техническим отчетом по результатам внутритрубного обследования по всей длине трубопровода было выявлено 1812 различных аномалий, таких как: аномалия кольцевого шва, вмятины, коррозия, заводские дефекты, механические повреждения, аномалии по линейным размерам потерь металла и другие.

Распределение выявленных аномалий говорит о том, что самый опасный участок трубопровода с наибольшим количеством аномалий – 30–40 км трассы, который соответствует участку № 8, выделенному в данном исследовании, остальные участки имеют относительно схожее количество аномалий, равномерно распределенных по участкам трассы (рис. 7).

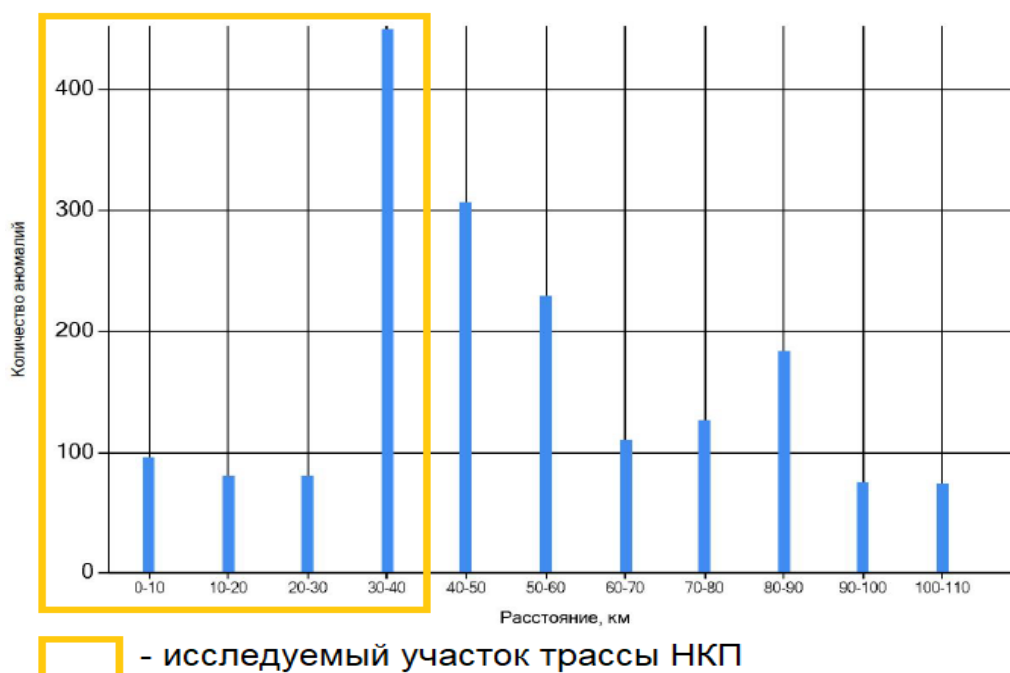


Рис. 7. Распределение аномалий по трассе трубопровода, выявленных при профилометрии
Fig. 7. Distribution of anomalies along the pipeline route identified during profile logging

Стоит уточнить, что при инженерно-геологическом районировании не учитывались способы прокладки трубопровода, которые могут оказывать влияние на количество выявляемых аномалий, а также нужно отметить инерционность системы «многолетнемерзлый грунт – трубопровод». Однако стоит выделить участок № 8, на котором были отмечены процессы термокарста, что также может говорить о серьезном изменении пространственного положения трубопровода, что, в свою очередь, сказывается на количестве выявленных аномалий трубопровода.

На участке 30–40 км трассы, соответствующем участку № 8, расположено 3 участка переходов через водные преграды, выполненных методом наклонно-направленного бурения, общей протяженностью 3 км, что также может сказываться на количестве выявленных аномалий. Участки 0–30 км, соответствующие участкам № 1–7, показывают одинаково усредненные значения аномалий, что совпадает с установленной сложностью участков трассы.

В целом результаты инженерно-геологического районирования совпадают на 7 участках из 8 с результатами проведенной внутритрубной диагностики трубопровода.

Выводы

1. В результате инженерно-геологического районирования территория эксплуатируемой трассы разделена на 8 инженерно-геологических участков, которые ранжированы на 4 класса по степени сложности инженерно-геологических условий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варламов С., Скрыбин П. Инженерно-геокриологическое состояние коридоров трасс трубопроводов центральной Якутии // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: Материалы X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / отв. ред. В.Ю. Фридовский. – Якутск, 8–10 апреля 2020. – Якутск: ИД СВФУ, 2020. – С. 430–433.
2. Трифонов О.В., Силкин В.М., Черний В.П. Прогнозирование напряженно-деформированного состояния магистрального газопровода «Сила Сибири» на участках развития опасных инженерно-геокриологических процессов на основе математических моделей // Вести газовой науки. – 2020. – № 2 (44). – С. 34–50.
3. Трифонов О.В., Морин И.Ю., Володин П.А. Принципы классификации участков по прогнозируемой опасности для магистральных газопроводов, расположенных в зонах развития опасных инженерно-геокриологических процессов // Наука и техника в газовой промышленности. – 2021. – № 2. – С. 82–98.
4. Hoopes O., Croft P., Wutting F. Embankment fill slope movement on thaw sensitive permafrost: combining creep testing and thermal simulations to develop mitigation options at lost creek along the Trans-Alaska pipeline system; Lost Creek. P. 2 // Permafrost 2021: Merging Permafrost Science and Cold Regions Engineering. – Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2021. – С. 360–373.
5. 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.
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.

2. Около 35 % длины исследованной трассы находится в умеренно благоприятных инженерно-геологических условиях, около 65 % – в неблагоприятных условиях. Участков с весьма неблагоприятными и благоприятными условиями на исследуемой части трассы не выявлено.
3. На основе проведенных исследований можно предложить некоторые рекомендации по включению в программу проведения геотехнического мониторинга мероприятий для повышения безопасности и снижению уровня сложности инженерно-геологических условий трассы:
 - Следует предусмотреть мероприятия по отводу поверхностных вод от коридора прокладки трубопровода на участках трассы – дополнительную отсыпку защитного валика, восстановление растительного покрова, устройство дренажных систем и другие;
 - Не допускать дальнейшего заболачивания и обводнения трассы на участках с умеренно-благоприятными условиями;
 - Уделить особое внимание при проведении геотехнического мониторинга участкам с неблагоприятными инженерно-геологическими условиями.
4. Предлагаемая методика инженерно-геологического районирования эксплуатируемой трассы нефтеконденсатопровода является быстрым способом установления опасных геологических процессов и выявления опасных участков по трассе. Установлено, что самые распространенные опасные геологические процессы на трассе НКП – обводнение и заболачивание.
7. Strokov L.A. Recognition of geological processes in permafrost conditions // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2019. – V. 78. – № 8. – P. 5517–5530. URL: <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01511-4> (дата обращения 01.06.2022).
8. Середин В.В., Красильников П.А. Инженерно-геологическое районирование, основанное на многомерной оценке классификационного показателя // Вестник Пермского университета. Геология. – 2016. – № 2 (31). – С. 48–54. DOI: 10.17072/psu.geol.31.48. EDN WFEFNF.
9. Гайнанов Ш.Х., Коноплев А.В., Козловский С.В. Инженерно-геологическое районирование с использованием ГИС объектов обустройства скважин Чураковского нефтяного месторождения // Вестник Пермского университета. Геология. – 2020. – Т. 19. – № 4. – С. 372–379. DOI: 10.17072/psu.geol.19.4.372. EDN LUYXPJ.
10. Мележ Т.А. Типологическое районирование трасс магистральных трубопроводов по возможности проявления инженерно-геологических процессов (на примере трассы магистрального трубопровода «Дружба 2» в пределах Республики Беларусь) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле. – 2020. – Т. 20. – № 1. – С. 10–16.
11. Failache M.F., Zuquette L.V. Geological and geotechnical land zoning for potential Hortonian overland flow in a basin in southern Brazil // Engineering Geology. – 2018. – V. 246. – P. 107–122.
12. Engineering geological mapping of earthquake-induced landslides in South Lefkada Island, Greece: evaluation of the type and characteristics of the slope failures / N. Grendas, V. Marinou, G. Papathanassiou, A. Ganas, S. Valkaniotis // Environmental Earth Sciences. – 2018. – V. 77. – № 12. – P. 425. URL: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7598-9> (дата обращения 01.06.2022).
13. Hassanpour J., Firouzei Y., Hajipour G. A regional-scale engineering geological study for selecting suitable rock masses for constructing unlined oil storage caverns in Southern Zagros, Iran //

- Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2019. – V. 78. – № 1. – P. 267–280.
14. Баборыкин М.Ю. Сходимость результатов дистанционного метода дешифрирования с полевыми работами на линейном объекте. На примере оползневой участка // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 161–175.
15. Елизаров А.С., Курчатова А.Н. Мониторинг надземных трубопроводов с помощью глобальных навигационных спутниковых систем // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2020. – Т. 25. – № 1. – С. 28–42.
16. Строкова Л.А., Ежова А.В., Леонова А.В. Применение линейного анализа для оценки карстоопасности при проектировании магистрального газопровода в южной Якутии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 11. – С. 117–126.
17. Строкова Л.А., Надеждина Ю.Ю. Типизация инженерно-геологических условий территории трассы проектируемой железной дороги Элегест–Кызыл–Курагино // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 2. – С. 64–77.
18. Опыт инженерно-геологического районирования по несущей способности грунтов промплощадки Эльгинского ГОК в Якутии / Л.А. Строкова, С.А. Дмитриева, Н.В. Осьмушкина, А.В. Осьмушкин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 2. – С. 175–185.
19. Епифанова Е.А., Строкова Л.А. Оценка деформаций исторического здания в Томске с помощью комплексного подхода, основанного на сочетании наземного лазерного сканирования и конечно-элементного моделирования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 5. – С. 27–41.
20. Епифанова Е.А., Строкова Л.А. Анализ деформаций проекторной мачты при помощи наземного лазерного сканирования и метода конечных элементов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 7–17.
21. Оценка инженерно-геокриологических условий Берегового нефтегазоконденсатного месторождения / Л.А. Строкова, Д.В. Пургина, Э.И. Галеева, А.Н. Курчатова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 12. – С. 6–19.
22. Строкова Л.А., Галеева Э.И., Леонова А.В. Районирование инженерно-геокриологических условий трассы трубопровода на Восточно-Мессояхском нефтегазоконденсатном месторождении // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 14–22.
23. Строкова Л.А., Нечаев Д.А. Роль опасных геологических процессов при эксплуатации нефтепровода «Чаянда–ВСТО» // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 9. – С. 125–134.
24. Hearn G.J. Geomorphology in engineering geological mapping and modelling // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2019. – V. 78. – № 2. – P. 723–742.
25. Селезнева Ю.Н., Ядзинская М.Р. Инженерно-геологическое районирование участка железной дороги методом вероятностной оценки классификационного показателя // Вестник Пермского университета. Геология. – 2021. – Т. 20. – № 2. – С. 142–149. DOI: 10.10702/psu.geol.20.2.142. EDN ESFXHX.
26. Li X., Wu Q., Jin X. Mitigation strategies and measures for frost heave hazards of chilled gas pipeline in permafrost regions: a review // Transportation Geotechnics. – 2022. – V. 36. – P. 100786.
27. Thermal and mechanical analysis of the China–Russia Crude Oil Pipeline suffering settlement disaster in permafrost regions / J. Zhou, Z. Liang, L. Zhang, T. Zheng, J. Zheng // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2022. – V. 199. – P. 104729.
28. Numerical evaluation of the effectiveness of frost heave mitigation strategies for chilled arctic gas pipelines / X. Li, Q. Wu, H. Jin, R. Shi, G. Wu, Y. Cao // Research in Cold and Arid Regions. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rcar.2022.12.002> (дата обращения 01.06.2022).
29. Li G. et al. A newly integrated ground temperature dataset of permafrost along the China–Russia crude oil pipeline route in Northeast China // Earth System Science Data. – 2022. – V. 14. – № 11. – P. 5093–5110.
30. Vladova A.Y. Remote geotechnical monitoring of a buried oil pipeline // Mathematics. – 2022. – V. 10. – № 11. – P. 1813.
31. Changes in near-surface permafrost temperature and active layer thickness in Northeast China in 1961–2020 based on GIPL model / S. Huang, Q. Ding, K. Chen, Z. Hu, Y. Liu, X. Zhang, L. Ding // Cold Regions Science and Technology. – 2023. – V. 206. – P. 103709.
32. Past and future of permafrost monitoring: stability of Russian energetic infrastructure / V.P. Melnikov, V.I. Osipov, A.V. Brouchkov, S.V. Badina, M.R. Sadurtdinov, D.S. Drozdov, R.Y. Fedorov // Energies. – 2022. – V. 15. – № 9. – P. 3190.
33. Monitoring the permafrost conditions along pipeline routes in Central Yakutia, Russia / S. Varlamov, P. Skryabin, A. Zhirkov, Z. Wen // Land. – 2022. – V. 11. – № 12. – P. 2331.
34. Wang F. et al. Assessment of permafrost disturbances caused by two parallel buried warm-oil pipelines: a case study at a high-latitude wetland site in Northeast China // Cold Regions Science and Technology. – 2022. – V. 206. – P. 103753.
35. Shen Y. et al. Fuzzy comprehensive safety evaluation of pipeline disaster in China–Russia crude oil permafrost region based on improved analytic hierarchy process–entropy weight method // Advances in Materials Science and Engineering. – 2022. – V. 2022. – P. 1–10.
36. Li X., Wu Q., Jin H. New methods for predicting strain demand of Arctic gas pipelines across permafrost under frost heave displacement // Geofluids. – 2022. – V. 2022. – P. 1–16.
37. Landslide mapping from aerial photographs using change detection-based Markov random field / Z. Li, W. Shi, P. Lu, Q. Wang, Z. Miao // Journal Remote Sensing of Environment. – 2016. – V. 187. – P. 76–90.
38. Martínez-Graña A.M., Goy J.L., Zazo C. Engineering geology maps for planning and management of natural parks: «Las Batuecas-Sierra de Francia» and «Quilamas», (Central Spanish System, Salamanca, Spain) // Geosciences. – 2013. – V. 1. – P. 46–62.
39. Comparison and validation of per-pixel and object-based approaches for landslide susceptibility mapping / T. Gudiyangada Nachappa, S. Kienberger, S.R. Meena, D. Höbling, T. Blaschke // Geomatics, Natural Hazards and Risk. – 2020. – V. 11. – № 1. – P. 572–600.
40. Effects of extreme floods on fluvial changes: the Khorramabad River as case study (western Iran) / S. Sharafi, H. Kamangir, S.A. King, R. Safaierad // Arabian Journal of Geosciences. – 2021. – V. 14. – № 12. – P. 1–11.
41. Gebreegziabher T., Suryabhagavan K.V., Kumar Raghuvanshi T. Web GIS-based decision support system for soil erosion assessment in Legedadi watershed, Oromia Region, Ethiopia // Geology, Ecology, and Landscapes. – 2021. – P. 1–18. URL: <https://doi.org/10.1080/24749508.2021.1924441> (дата обращения 11.06.2022).
42. Mapping soil erosion-prone sites through GIS and remote sensing for the Tifnout Askaoun watershed, southern Morocco / A. Tairi, A. Elmouden, L. Bouchaou, M. Aboulouafa // Arabian Journal of Geosciences. – 2021. – V. 14. – № 9. – P. 1–22.
43. Moses A.N. GIS-RUSLE interphase modelling of soil erosion hazard and estimation of sediment yield for river Nzoia basin in Kenya // J Remote Sens GIS. – 2017. – V. 6. – № 3. – P. 1–13.
44. Pambudi A.S., Moersidik S.S., Karuniasa M. Analysis of recent erosion hazard levels and conservation policy recommendations for Lesti Subwatershed, Upper Brantas Watershed // Jurnal Perencanaan Pembangunan: the Indonesian Journal of Development Planning. – 2021. – V. 5. – № 1. – P. 71–93.
45. Soil erosion modelling using GIS and revised universal soil loss equation approach: a case study of Guna-Tana landscape, Northern Ethiopia / A. Teshome, A. Halefom, M. Teshome, I. Ahmad, Y. Taddele, M. Dananto, P. Szucs // Modeling Earth Systems and Environment. – 2021. – V. 7. – № 1. – P. 125–134.

Поступила 10.01.2023 г.
Прошла рецензирование: 26.05.2023 г.

Информация об авторах

Филимонов А.А., аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета; главный специалист отдела геотехнического мониторинга и прогнозного моделирования АО «ТомскНИПИнефть».

Строкова Л.А., доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 624.131

ASSESSMENT OF ENGINEERING AND GEOCRYOLOGICAL CONDITIONS OF THE TERRITORY OF THE OPERATED PIPELINE ROUTE ON THE MALKHOYAKHA–PUR INTERFLUVE

Andrey A. Filimonov^{1,2},
andrey_filimonoff@list.ru

Lyudmila A. Strokovaya¹,
sla@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² JSC TomskNIPIneft,
72, Mira avenue, Tomsk, 634027, Russia.

The relevance of the work is determined by the importance of trouble-free operation of pipeline transport facilities located in the permafrost zone. Manifestations of dangerous engineering and geological processes during the operation of an underground pipeline can lead to changes in the permafrost soil-pipeline system, which will entail the occurrence of off-design loads on the pipeline body, pipeline failures and accidents. It is required to analyze the activation and development of dangerous geological processes along the pipeline route in order to correctly assess changes in engineering and cryological conditions during pipeline operation.

The main aim is to rank sections of the route with developing hazardous geological processes and to identify their impact on the conditions for the further operation of the facility.

Methods: analysis of the results of engineering surveys on the object of study and geotechnical monitoring data of the oil and condensate pipeline; evaluation methods for zoning sections of the route

Results. At the first stage of the study, the route was classified, the study areas were identified, and criteria were determined for assessing active hazardous geological processes using the scoring method. At the second stage, the zoning model was determined, the boundary criteria γ (the proportion of identified hazardous geological processes for the section of the route) were designated, taxa were designated, sections of the route were ranked in accordance with the zoning model. The most vulnerable sections of the oil and condensate pipeline route from the point of view of the manifestation of geological processes were identified.

Key words:

zoning, engineering-geological conditions, dangerous geological processes, underground pipeline, permafrost soils.

REFERENCES

- Varlamov S., Scryabin P. Inzhenerno-geokriologicheskoe sostoyaniye koridorov trass truboprovodov tsentralnoy Yakutii [Engineering-geocryological state of corridors of pipelines of Central Yakutia]. X Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem. *Geologiya i mineralno-syrevyye resursy Severo-Vostoka Rossii* [Geology and mineral resources of the North-East of Russia. X All-Russian Scientific conference with international participation]. Yakutsk, 8–10 April 2020. Yakutsk, SVFU Publ., 2020. pp. 430–433.
- Trifonov O.V., Silkin V.M., Cherniy V.P. Prognozirovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya magistralnogo gazoprovoda «Sila Sibiri» na uchastkakh razvitiya opasnykh inzhenerno-geokriologicheskikh protsessov na osnove matematicheskikh modeley [Forecasting of the stress-strain state of the main gas pipeline «Power of Siberia» in the areas of development of hazardous engineering and geocryological processes based on mathematical models]. *Scientific-technical collection book*, 2020, no. 2 (44), pp. 34–50.
- Trifonov O.V., Morin I.Yu., Volodin P.A. Printsipy klassifikatsii uchastkov po prognozirovomoy opasnosti dlya magistralnykh gazoprovodov, raspolozhennykh v zonakh razvitiya opasnykh inzhenerno-geokriologicheskikh protsessov [Principles of classification of sites according to the predicted danger for main gas pipelines located in areas of development of hazardous engineering and geocryological processes]. *Nauka i tekhnika v gazovoy promyshlennosti*, 2021, no. 2, pp. 82–98.
- Hoopes O., Croft P., Wutting F. Embankment fill slope movement on thaw sensitive permafrost: combining creep testing and thermal simulations to develop mitigation options at lost creek along the Trans-Alaska pipeline system; Lost Creek. P. 2. *Permafrost 2021: Merging Permafrost Science and Cold Regions Engineering*. Reston, VA, American Society of Civil Engineers, 2021. pp. 360–373.
- Kazantseva L.A., Vorobyeva S.V. Monitoring of geocryological conditions of natural landscapes on the route of the Nadym–Punga gas pipeline. *Transport and mechanical engineering of West Siberia*, 2020, no. 1, pp. 29–35. In Rus.
- Reutskikh N.V., Berezhnoy M.A., Dudenko I.A. Geotechnical monitoring for trunk pipelines in various types of permafrost. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo gazovogo obshchestva*, 2016, no. 2, pp. 22–26. In Rus.
- Strokovaya L. Recognition of geological processes in permafrost conditions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, vol. 78, no. 8, pp. 5517–5530. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01511-4> (accessed 1 June 2022).
- Seredin V.V., Krasilnikov P.A. Engineering-geological zoning based on a multidimensional assessment of the classification indicator. *Bulletin of the Perm University. Geology*, 2016, no. 2 (31), pp. 48–54. In Rus. DOI: 10.17072/psu.geol.31.48. EDN WFENF.
- Gainanov Sh.Kh., Konoplev A.V., Kozlovsky S.V. Engineering-geological zoning using GIS of well facilities at the Churakovskiy oil field. *Bulletin of the Perm University. Geology*, 2020, vol. 19, no. 4, pp. 372–379. In Rus. DOI: 10.17072/psu.geol.19.4.372. EDN LUYXPJ.
- Melezh T.A. Typological zoning of trunk pipeline routes according to the possibilities of engineering-geological processes (on the example of the trunk pipeline «Druzhba 2» within the Limits of the Republic of Belarus). *Izv. Saratov Univ. (N. s.), Ser. Earth Sciences*, 2020, vol. 20, Iss. 1, pp. 10–16. In Rus. DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2020-20-1-10-16>
- Failache M.F., Zuquette L.V. Geological and geotechnical land zoning for potential Hortonian overland flow in a basin in southern Brazil. *Engineering Geology*, 2018, vol. 246, pp. 107–122.
- Grendas N., Marinos V., Papathanassiou G., Ganas A., Valkaniotis S. Engineering geological mapping of earthquake-induced landslides in South Lefkada Island, Greece: evaluation of the type and characteristics of the slope failures. *Environmental Earth Sciences*,

- 2018, vol. 77, no. 12, p. 425. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7598-9> (accessed 1 June 2022).
13. Hassanpour J., Firouzei Y., Hajipour G. A regional-scale engineering geological study for selecting suitable rock masses for constructing unlined oil storage caverns in Southern Zagros, Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, vol. 78, no. 1, pp. 267–280.
 14. Baborykin M.Yu. Convergence of the results of interpretation remote method with field work on a linear object. On the example of landslide plot. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 11, pp. 161–175. In Rus.
 15. Elizarov A.S., Kurchatova A.N. Monitoring of elevated pipelines using global navigation satellite systems. *Siberian State University of Geosciences and Technologies*, 2020, vol. 25, no. 1, pp. 28–42. In Rus.
 16. Strokova L.A., Ezhkova A.V., Leonova A.V. The application of lineament analysis to assess the karst hazard in the design of the main gas pipeline in South Yakutia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 11, pp. 117–126. In Rus.
 17. Strokova L.A., Nadezhkina Yu.Yu. Typification of engineering and geological conditions of the territory of the route of the projected railway Elegest–Kyzyl–Kuragino. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 2, pp. 64–77. In Rus.
 18. Strokova L.A., Dmitriev S.A., Osmushkina N.V., Osmushkin A.V. Experience of engineering-geological zoning on bearing capacity of soils of the industrial site of Elga coal-preparation plant in Yakutia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 2, pp. 175–185. In Rus.
 19. Strokova L.A., Epifanova E.A. Evaluation of deformation of a historic building in Tomsk by an integrated approach based on terrestrial laser scanner and finite element modeling. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 5, pp. 27–41. In Rus.
 20. Epifanova E.A., Strokova L.A. Numerical analysis of deformations of the lighting mast by ground laser scanning and finite elements method. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 5, pp. 7–17. In Rus.
 21. Strokova L.A., Purgina D.V., Galeeva E.I., Kurchatova A.N. Evaluation of engineering-geocryological conditions of the Beregovoye oil and gas condensate field. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 12, pp. 6–19.
 22. Strokova L.A., Galeeva E.I., Leonova A.V. Zoning of engineering-geocryological conditions of the pipelines on Vostochno-Messoyakhskoye field oil and gas condensate field. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 10, pp. 14–22.
 23. Strokova L.A., Nechaev D.A. The role of hazardous geological processes in the operation of the Chayanda-ESPO oil pipeline. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 9, pp. 125–134.
 24. Hearn G.J. Geomorphology in engineering geological mapping and modelling. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, vol. 78, no. 2, pp. 723–742.
 25. Selezneva Yu.N., Yadrinskaya M.R. Engineering-geological zoning of the railway section by the method of probabilistic assessment of the classification indicator. *Bulletin of the Perm University. Geology*, 2021, vol. 20, no. 2, pp. 142–149. In Rus. DOI: 10.17072/psu.geol.20.2.142. EDN ESFXHX.
 26. Li X., Wu Q., Jin X. Mitigation strategies and measures for frost heave hazards of chilled gas pipeline in permafrost regions: a review. *Transportation Geotechnics*, 2022, vol. 36, no. pp. 100786.
 27. Zhou J., Liang Z., Zhang L., Zheng T., Zheng J. Thermal and mechanical analysis of the China–Russia Crude Oil Pipeline suffering settlement disaster in permafrost regions. *International Journal of Pressure Vessels and Pipings*, 2022, vol. 199, 104729.
 28. Li X., Wu Q., Jin H., Shi R., Wu G., Cao Y. Numerical evaluation of the effectiveness of frost heave mitigation strategies for chilled arctic gas pipelines. *Research in Cold and Arid Regions*, 2022. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rcar.2022.12.002> (accessed 1 June 2022).
 29. Li G., Ma W., Wang F., Jin H., Fedorov A., Chen D., Li Y. A newly integrated ground temperature dataset of permafrost along the China–Russia crude oil pipeline route in Northeast China. *Earth System Science Data*, 2022, vol. 14 (11), pp. 5093–5110.
 30. Vladova A.Y. Remote geotechnical monitoring of a buried oil pipeline. *Mathematics*, 2022, vol. 10 (11), 1813.
 31. Huang S., Ding Q., Chen K., Hu Z., Liu Y., Zhang X., Ding L. Changes in near-surface permafrost temperature and active layer thickness in Northeast China in 1961–2020 based on GIPL model. *Cold Regions Science and Technology*, 2023, vol. 206, 103709.
 32. Melnikov V.P., Osipov V.I., Brouchkov A.V., Badina S.V., Sadurtdinov M.R., Drozdov D.S., Fedorov R.Y. Past and future of permafrost monitoring: stability of Russian energetic infrastructure. *Energies*, 2022, vol. 15 (9), 3190.
 33. Varlamov S., Skryabin P., Zhirkov A., Wen Z. Monitoring the permafrost conditions along pipeline routes in Central Yakutia, Russia. *Land*, 2022, vol. 11 (12), 2331.
 34. Wang F., Li G., Ma W., Chen D., Wu G., Cao Y., Che F. Assessment of permafrost disturbances caused by two parallel buried warm-oil pipelines: a case study at a high-latitude wetland site in Northeast China. *Cold Regions Science and Technology*, 2022, 103753.
 35. Shen Y., Chen D., Zhang M., Zuo T. Fuzzy comprehensive safety evaluation of pipeline disaster in China–Russia crude oil permafrost region based on improved analytic hierarchy process-entropy weight method. *Advances in Materials. Science and Engineering*, 2022, vol. 206 (2), pp. 1–10.
 36. Li X., Wu Q., Jin H. New methods for predicting strain demand of Arctic gas pipelines across permafrost under frost heave displacement. *Geofluids*, 2022, vol. 2022, pp. 1–16.
 37. Li Z., Shi W., Lu P., Wang Q., Miao Z. Landslide mapping from aerial photographs using change detection-based Markov random field. *Journal Remote Sensing of Environment*, 2016, vol. 187, pp. 76–90.
 38. Martínez-Graña A.M., Goy J.L., Zazo C. Engineering geology maps for planning and management of natural parks: «Las Batuecas-Sierra de Francia» and «Quilamas» (Central Spanish System. Salamanca. Spain). *Geosciences*, 2013, vol. 1, pp. 46–62.
 39. Gudiyangada Nachappa T., Kienberger S., Meena S.R., Hölbling D., Blaschke T. Comparison and validation of per-pixel and object-based approaches for landslide susceptibility mapping. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2020, vol. 11, no. 1, pp. 572–600.
 40. Sharafi S., Kamangir H., King S.A., Safaierad R. Effects of extreme floods on fluvial changes: the Khorramabad River as case study (western Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, vol. 14, no. 12, pp. 1–11.
 41. Gebreegziabher T., Suryabagavan K.V., Kumar Raghuvanshi T. WebGIS-based decision support system for soil erosion assessment in Legedadi watershed, Oromia Region, Ethiopia. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 2021, pp. 1–18. Available at: <https://doi.org/10.1080/24749508.2021.1924441> (accessed 11 June 2022).
 42. Tairi A., Elmouden A., Bouchaou L., Aboulouafa M. Mapping soil erosion-prone sites through GIS and remote sensing for the Tifnout Askaoun watershed, southern Morocco. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, vol. 14, no. 9, pp. 1–22.
 43. Moses A.N. GIS-RUSLE interphase modelling of soil erosion hazard and estimation of sediment yield for river Nzoia basin in Kenya. *J Remote Sens GIS*, 2017, vol. 6, no. 3, pp. 1–13.
 44. Pambudi A.S., Moersidik S.S., Karuniasa M. Analysis of recent erosion hazard levels and conservation policy recommendations for Lesti Subwatershed, Upper Brantas Watershed. *Jurnal Perencanaan Pembangunan: the Indonesian Journal of Development Planning*, 2021, vol. 5, no. 1, pp. 71–93.
 45. Teshome A., Halefom A., Teshome M., Ahmad I., Taddele Y., Dananto M., Szucs P. Soil erosion modeling using GIS and revised universal soil loss equation approach: a case study of Guna-Tana landscape, Northern Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2021, vol. 7, no. 1, pp. 125–134.

Received: 10 January 2023.

Reviewed: 26 May 2023.

Information about the authors

Andrey A. Filimonov, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University; chief specialist, JSC TomskNIPIneft.

Lyudmila A. Strokova, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.