

УДК 624.131

РОЛЬ ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НЕФТЕПРОВОДА «ЧАЯНДА-ВСТО»

Строкова Людмила Александровна¹,
sla@tpu.ru

Нечаев Дмитрий Андреевич¹,
nechaevdmitryrf@gmail.com

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

Актуальность работы определена важностью обеспечения бесперебойной работы трубопроводного транспорта, обуславливающего энергетическую и экономическую безопасность страны. Проявления опасных геологических процессов могут привести к сбоям в работе трубопроводов с последствиями, варьирующимися от травм/смерти, воздействия на окружающую среду и материального ущерба до длительных перебоев в обслуживании и невыполнения поставленных задач. Отказы в работе трубопроводов в результате природных явлений, как правило, являются редкими (но дорогостоящими) событиями. Именно поэтому важно правильно оценить грунтовые условия и предсказать их изменение при эксплуатации трубопровода.

Цель: идентифицировать участки трассы с вероятной активацией опасных геологических процессов и их влияние на эксплуатацию сооружения.

Методы: анализ результатов инженерных изысканий по обустройству Чаяндинского нефтегазоконденсатного месторождения и данных геотехнического мониторинга по трассе нефтепровода.

Результаты. Проведено описание инженерно-геологических условий трассы нефтепровода. Наиболее распространенными опасными геологическими процессами в пределах трассы трубопровода являются карст, заболачивание, водная эрозия, а также проявления геокриологических процессов – термоэрозия, термокарст, морозное пучение, морозное трещинообразование, наледеобразование. Определены участки проявления геологических процессов по трассе трубопровода. Наиболее протяженными оказались процессы, связанные с изменением многолетнемерзлых грунтов и карстовые процессы. Оценка вклада опасных геологических процессов произведена по секциям между узлами запорной арматуры нефтепровода, что позволит обеспечить безопасность транспортировки нефти, ее регулировку за счет отключения участка линейной части трубопровода. Идентифицированы наиболее уязвимые участки трассы нефтепровода по возможности проявления геологических опасностей.

Ключевые слова:

Нефтепровод, инженерно-геологические условия, карст, эрозия, наледы

Введение

В связи со стратегической важностью объектов транспорта углеводородов к эксплуатации трубопроводных систем предъявляются особые требования для обеспечения безопасной и безостановочной работы как магистральных, так и внутрипромысловых трубопроводов. Запуск трубопроводной системы транспортировки нефти с нефтяной оторочки Чаяндинского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ) в республике Саха (Якутия) в магистральный нефтепровод (МНП) Восточная Сибирь – Тихий океан (ВСТО) в 2019 г. повысил качество и скорость транспортировки углеводородов. С учетом сложного рельефа местности и экстремальных природно-климатических особенностей региона нефтепровод построен в подземном исполнении. Для исключения влияния трубопровода на многолетнемерзлые грунты при строительстве использовались теплоизолирующие материалы. Однако развитие опасных геологических процессов усложняет условия эксплуатации инженерных систем нефтепровода.

В настоящее время отечественными и зарубежными учеными проведено множество исследований по оценке ОПН на трубопроводах. В работах [1–8] уделяется внимание оценке инженерно-геологических условий и их типизации при проектировании трубо-

проводов в криолитозоне. Примеры типологического районирования территорий представлены в работах [9–20]. Этот метод широко используется в инженерной практике, т. к. позволяет упорядочить имеющиеся разнородные знания об инженерно-геологических особенностях территории. Тем не менее этому методу присуща субъективность в выделении типов геологической среды.

В последние несколько лет ГИС-технологии с мощными инструментами визуализации, анализа и моделирования, которые учитывают большое количество факторов, влияющих на процессы и объекты, широко используются в инженерно-геологической оценке и районировании территорий [21–29]. Для определения веса факторов при классификации объектов широко используются традиционные методы, такие как метод анализа иерархий (АНП), анализ главных компонент [11, 13, 18]. Машинное обучение, нечеткая логика открыли новые возможности для описания, обработки и анализа многомерных данных о сложных разнонаправленных антропогенных воздействиях на окружающую среду и ее реакции. В этой связи заслуживают внимания работы [19–24]. Вышеупомянутые результаты исследований имеют большое значение для охраны и управления природными ресурсами, безопасности и бесперебойной ра-

боты инженерных сооружений в районах добычи и транспортировки полезных ископаемых. Научно обоснованный анализ и оценка состояния нового нефтепровода «Чаянда-ВСТО» обеспечат необходимыми средствами контроль угроз безопасности трубопровода, станут важнейшей научной основой для его мониторинга и управления в случае стихийных бедствий.

Цель данной работы – идентифицировать участки трассы с вероятной активацией опасных геологических процессов и их влияние на эксплуатацию сооружения.

Трасса напорного нефтепровода «Чаянда-ВСТО» протяженностью 69 км (рис. 1) расположена в Ленском улусе республики Саха (Якутия).

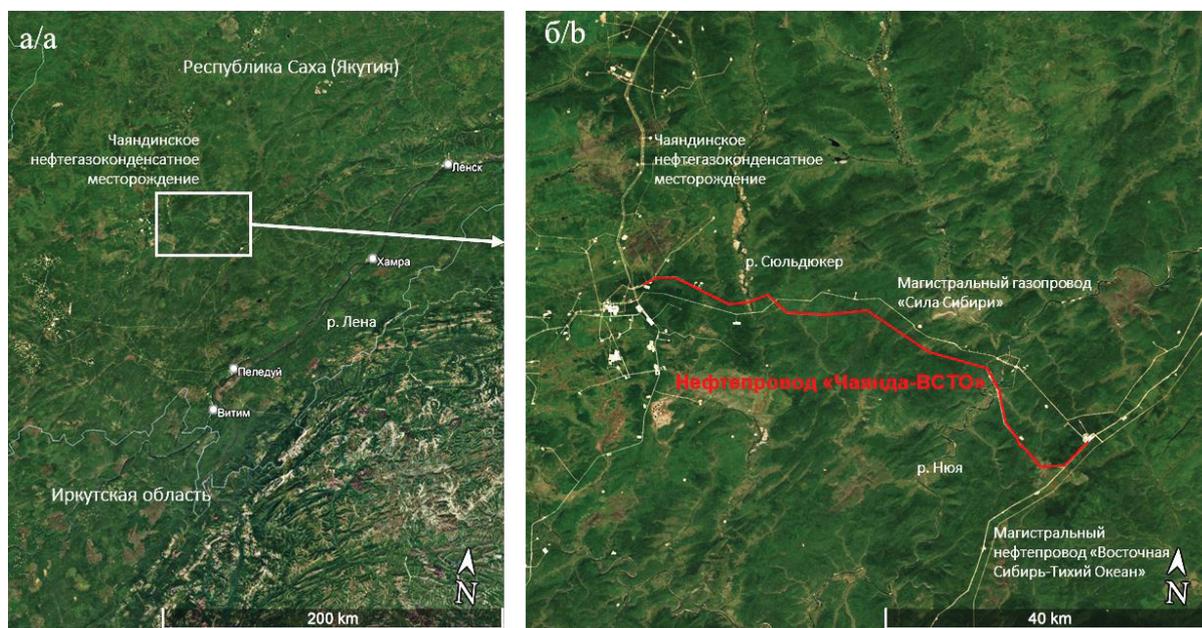


Рис. 1. Спутниковые снимки участка исследования: а) спутниковый снимок месторасположения объекта исследования; б) увеличенный вид участка, трасса нефтепровода выделена цветом

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

Инженерно-геологические условия трассы нефтепровода

Климат изучаемой территории резко-континентальный, с большими амплитудами температур в течение года: с очень низкими зимними температурами воздуха (средняя месячная температура января в районе нефтепровода составляет минус 30,3 °С, с отметкой абсолютного минимума температуры в январе – минус 61 °С) и высокими температурами воздуха в летний период (средняя месячная температура июля в районе нефтепровода составляет 16,9 °С, абсолютный максимум – 36 °С). Осадки на исследуемой территории распределяются неравномерно в течение года, максимальное количество осадков приходится на теплый период (июль–август). Ветровой режим зависит от циркуляции воздушных масс и изменяется в течение года: в зимний период времени преобладают слабые северные ветра, что в свою очередь обуславливает стабильные низкие температуры, в летний период – ветра с западной стороны. Максимальные скорости ветра в течение года зафиксированы в период резкого изменения температурного режима – в мае, и составляют порядка 1,6...2,4 м/с. Климат изучаемой территории влажный, с умеренно теплым летом и умеренно суровой снежной зимой относится к северной строительно-климатической зоне с наиболее суровыми условиями [30].

Гидрография изучаемой территории развитая, с постоянными и временными водотоками, с показателем густоты речной сети – 0,34 км/км². Практически все сравнительно крупные реки, расположенные на месторождении и по трассе нефтепровода, текут в меридиональном направлении, исключением являются мелкие водотоки и река Нюя. Трасса нефтепровода пересекает одиннадцать постоянных водотоков, наиболее крупные из них – реки Нюя, Сольдюкээр, Керемнике, ручьи Кубалах, Чуонда, Куччугуй-Утянних и др. Большая часть водотоков по трассе нефтепровода относится к бассейну реки Нюя – левому притоку реки Лены, впадающему в нее на 2420 км от устья. Длина Нюя составляет 798 км, площадь водосбора 38100 км².

Гидрогеологические условия. На характер подземных вод большое влияние оказывает распространение многолетнемерзлых грунтов, которые образуют водонепроницаемый экран. Поэтому на территориях со сплошным и островным распространением мерзлых грунтов имеют место быть надмерзлотные воды сезонноталого слоя и воды несквозных таликов. На всех плоских или слабонаклонных междуречных массивах и речных террасах, сложенных хорошо фильтрующими четвертичными отложениями и трещиноватыми коренными породами, формируются сквозные талики. Подземные воды этих отложений вскрываются на

глубине от 0 до 8,3 м. Все встреченные подземные воды характеризуются спорадическим распространением. К особому типу подземных вод на изученной территории можно отнести трещинные и трещинно-карстовые воды, приуроченные к трещинам и карстовым пустотам в толще коренных пород. По отношению к многолетнемерзлым породам эти воды находятся в сквозных таликах. Проведенный химический анализ показал относительно невысокую минерализацию – 0,3 г/л, и гидрокарбонатный натриево-кальциевый состав воды. Источник питания таких вод – в основном атмосферные осадки, поверхностный сток с водосборов, реки.

В геоморфологическом отношении трасса нефтепровода располагается в пределах структурно-денудационного Приленского закарстованного плато, которое находится на юге Среднесибирского плоскогорья, в среднем течении реки Лены. Приленское плато является возвышенной равниной, со средними абсолютными высотами 300–600 м. Отметки по трассам меняются в пределах от 245 м (р. Нюя) на урезах воды и до 550–560 м на водоразделах. Рельеф Приленского плато, расчлененного достаточно густой речной сетью, в основном грядовый. На территории месторождения имеются карстовые блюдца и воронки, поноры, суходолы, поля, термокарстовые котловины, бугры пучения, наледные поляны, делли. Ландшафт трассы нефтепровода относится к типу таёжных и мерзлотнотаёжных, в основном со среднетаёжными лиственничными лесами и редколесьями. По всей тер-

ритории распространены заболоченные территории, в долинах рек – незначительные участки лугов.

В тектоническом отношении трасса нефтепровода расположена в южной части Сибирской платформы, прежде всего в границах восточной части Непского свода Непско-Ботуобинской антеклизы. Территория трассы представлена отложениями ордовика и кембрия, которые сжаты в протяженные складки в виде гребней, формирование которых непосредственно связано с протекающими в конце силура процессами интенсивной складчатости (развитие Ангаро-Ленского прогиба). Гребневидные складки, характеризующиеся падающими разрывами (надвигами) в юго-восточном направлении, тянутся вдоль границы Байкало-Патомского нагорья на северо-восток (рис. 2). В пределах рассматриваемого участка следует выделить Нюйскую впадину, характеризующуюся асимметричным строением, ширина которой составляет 160...170 км, а протяженность – более 260 км. Прогнутая часть впадины, смещенная на юго-восток в сторону Уринского антиклинория, представлена отложениями силурийского возраста. На востоке к складкам Нюйской впадины примыкает Пеледуйское поднятие – сводообразная структура с интенсивной складчатостью, расположенная в верхнем течении реки Нюя и далее спускающаяся на территории бассейнов рек Пеледуй и Хамра. На юге Пеледуйское поднятие отделяется от Патомской складчатой области узким синклиналим прогибом, а на севере примыкает к Олдонской зоне разломов.

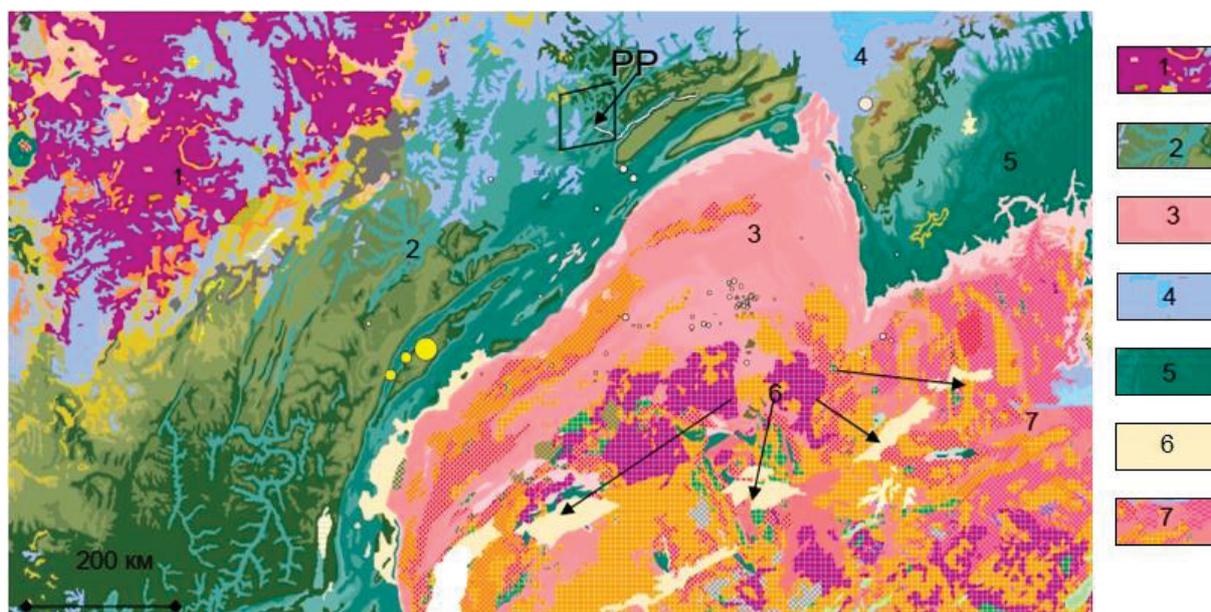


Рис. 2. Основные тектонические структуры южной части Сибирской платформы и ее обрамления, по А.М. Никишину [31]: 1 – Тунгусская синеклиза, 2 – Ангаро-Ленская ступень, 3 – Байкальская метаплатформенная область, 4 – южная часть Вилуйской синеклизы, 5 – Алданская моноклиза, 6 – грабены Байкальской рифтовой зоны (БРЗ), 7 – Алдано-Становая область. PP – Район работ

Fig. 2. The main tectonic structures of the southern part of the Siberian platform and its framing [31], where 1 – Tunguska syncline, 2 – Angara-Lena step, 3 – Baikal metaplatform region, 4 – southern part of the Vilyui syncline, 5 – Aldan monocline, 6 – grabens of the Baikal rift zone (BRZ), 7 – Aldano-Stanovaya region. RR – study area

Согласно карте общего сейсмического районирования России ОСР-97-В масштаба 1:8000000, состав-

ленной в Институте физики Земли РАН специально для проектирования строительства особо ответствен-

ных и экологически опасных объектов, северная часть объектов изысканий попадает в зону низкой сейсмичности – 5 баллов, юго-восточная – 6 баллов по шкале MSK-64.

Геологическое строение исследуемой территории.

Однозначно, все геологические процессы рассматриваемой территории определяются в значительной мере составом и свойствами коренных пород. В пределах трассы нефтепровода выделяют следующие формации коренных пород:

- карбонатная нижнекембрийская и среднекембрийская: сложена брекчированными доломитами с прослоями известняков, мергелей, гипса и известковистых песчаников.
- терригенно-карбонатная средне-верхнекембрийская (красноцветная): наиболее распространенная по территории, представлена на исследуемой территории доломитами (с прослоями гипса) и алевролитами. Породы представленной карбонатной формации (известняки и доломиты), как правило, трещиноватые, кавернозные и закарстованные. Алевролиты в основном микрослоистые, карбонатные (10...26 %), с карбонатно-глинистым и железистоглинистым поровым цементом, очень нестойкие к выветриванию. Эти отложения получили широкое распространение в полосе трассы нефтепровода. Вскрытая мощность отложений изменяется от 2,0 до 18,3 м;
- терригенная нижнеордовикская и средневерхнеордовикская формация: слагает волнистопологоувалистое плато в восточной части участка работ, характеризуется песками, алевролитами, глинами. Продукты выветривания по составу в основном песчаные и супесчаные. Вскрытая мощность отложений изменяется от 1,0 до 6,0 м;
- терригенная нижнеюрская: имеет распространение в основном в пределах структурно-денудационной плоской равнины и грядово-холмистого плато, на очень ограниченных участках некоторых рек (например, на территории реки Сыпаранда и ручья Желокан). Продукты выветривания по составу в основном песчаные и супесчаные. Вскрытая мощность отложений изменяется от 2,0 до 12,5 м.

Четвертичные отложения на исследуемой территории распределены неравномерно по мощности. Сложный характер строения обусловлен условиями залегания: от 0,5 м на некоторых участках до 13,0 м. Четвертичные отложения по трассе нефтепровода представлены различными образованиями, а именно:

- Элювиально-делювиальными отложениями (edQ_{IV}). Щебенисто-песчано-глинистые отложения в площадном отношении господствуют в пределах трассы нефтепровода. Распространены на поверхностях выравнивания и в пределах денудационных равнин. Вершины сопек сложены глыбово-щебенисто-дресвяными породами с супесчаным, реже суглинистым заполнителем. Петрографический состав крупнообломочной составляющей в своем большинстве (90...95 %) представлен поро-

дами скального основания. Это преимущественно доломиты и известняки. Мощность накапливающихся продуктов разрушения зависит от возраста поверхности выравнивания и скорости выветривания коренных пород. Вскрытая мощность грунтов изменяется от 0,5 до 7 м.

- Делювиальные отложения (dQ_{IV}). Делювиальный горизонт имеет типичные лессовидные признаки – это суглинки и супеси с содержанием пылеватой фракции до 61 %. Они полностью покрывают пологие склоны с градусом наклона 3...12° и встречаются у подножий склонов, крутизна которых менее 6°. Мощность данных отложений составляет 1...9 м.
- Элювиальные отложения (eQ_{N-Q}) занимают значительные площади в пределах изучаемых участков и развиты на водораздельных пространствах и преимущественно в верхних участках склонов. Состав образований согласуется с составами коренных пород. Залегают отложения на глубине от 0,3 до 20,0 м. Вскрытая мощность грунтов изменяется от 2 до 14,6 м.
- Делювиально-коллювиальные и коллювиальные (dc,cQ_{III-IV}) отложения приурочены к средним (10–20°) и крутым (более 20°) участкам склонов и представлены, как правило, щебенисто-дресвяными породами с супесчаным заполнителем. Его мощность 1,0–5,0 м. Состав образований согласуется с составами коренных пород.
- Верхнечетвертичные аллювиальные (aQ_{III}) отложения слагают III надпойменную террасу, а верхнечетвертичные аллювиальные отложения (aQ_{III-IV}) слагают II и I надпойменные террасы рек Чаянда, Нюя. Надпойменные террасы сложены супесями, суглинками, гравийно-галечными породами, реже песками и супесями гравелистыми. Мощность данных отложений составляет 4–10 м.
- Голоценовые аллювиальные отложения (aQ_{IV}), которые в основном встречаются в поймах рек и долинах небольших (средних и мелких) водотоков, представляются в пределах изучаемой территории различными породами, которые в основном переслаиваются, однако встречаются и монолитные участки. Аллювий обычно состоит из двух фаций: русловой (мощность до 4...14 м), представленной песками, галечниками, гравийными грунтами и пойменной (мощность 1...13 м), сложенной в нижней части галечниками и гравийными грунтами с линзами и с прослоями песков и супесей, в верхней – глинами, суглинками и илами. В пределах трасс аллювиальные образования представлены на участке перехода через р. Нюя, р. Пеледуй, где они слагают верхнюю часть разреза русла, поймы. На остальных пересекаемых трассой водотоках аллювиальные отложения представляют собой нерасчлененную толщу, где очень трудно (а фактически эта возможность отсутствует) выделить делювий и аллювий, так как деятельность водотоков, как правило, приурочена к весенне-летнему благоприятному периоду года, когда пи-

тание происходит за счет инфильтрации поверхностных вод и разгрузки надмерзлотных водоносных горизонтов. Мощность отложений изменяется от 1,0 до 14,0 м.

- Голоценовые озерно-болотные (lbQ_{IV}) отложения приурочены к заболоченным понижениям на водоразделах и к верховьям долин временных водотоков. В основе отложений выделяют два слоя: нижняя часть представлена оторфованными суглинками, глинами и элювиальными суглинками, верхняя же часть представлена торфом (в среднем мощность оценивается в пределах 0,3...4,0 м). Встречаются горизонты погребенного минерализованного торфа мощностью 0,2...12,6 м. Горизонты погребенного торфа зафиксированы на глубине 2,6...12,9 м. Общая мощность озерно-болотных накоплений преимущественно составляет 3...5 м, максимально – 5...8 м.

Геокриологические условия трассы нефтепровода характеризуется чрезвычайной пестротой и сложностью, частой сменой участков различного распространения ММГ по площади и в разрезе, разнообразием геотемпературных условий и существенным диапазоном изменения мощности. Распространение мерзлых толщ меняется от островного на юге и юго-востоке до сплошного в северной части изучаемой территории. Вскрытая мощность многолетнемерзлых грунтов изменяется от 1,5 до 19,5 м. Температура мерзлых грунтов на исследованной территории, на глубине 10 м, изменяется от минус 0,05 до минус 4,1 °С.

К основным факторам, влияющим на температуру пород, относятся: экспозиция склонов, снежный и растительный покровы, состав и свойства пород, конденсация и фильтрация влаги, охлаждающее влияние зимних ветров. На крутых склонах выпадающие осадки почти полностью переходят в поверхностный сток, поэтому повышение температуры пород связано в основном с экспозицией склонов. Определенные закономерности в распределении температуры пород по площади связаны с генезисом и географическим местоположением таликов.

Исходя из материалов инженерно-геологических изысканий по трассе нефтепровода, выделены следующие типы многолетнемерзлых пород (ММП):

- сплошное распространение ММП, залегающих с поверхности: мерзлые породы занимают более 90 % площади выдела, температура средняя годовая – от минус 0,4 до минус 2,6 °С;
- прерывистое распространение ММП, залегающих с поверхности: мерзлые породы занимают от 50 до 90 % площади, на 10...50 % площади – кровля ММП заглублена на 3...10 м, или ММП отсутствуют, температура средняя годовая от минус 0,1 до минус 1,7 °С;
- островное, редкоостровное распространение ММП, залегающих с поверхности: мерзлые породы занимают менее 10 % площади выдела, более чем на 80 % площади ММП отсутствуют, температура средняя годовая от нуля до минус 1,1 °С. На этой территории встречаются участки ММП с температурой от минус 1,8 до минус 4,1 °С.

Криогенная толща существует непрерывно, по крайней мере, с начала среднего плейстоцена. Коренным дочетвертичным породам, промерзавшим эпигенетически, свойственны массивные и унаследованные по трещинам, пластам и кавернам криогенные текстуры. В песчаных толщах юры отмечается массивная криотекстура. Глинистые сланцы, алевролиты, песчаники, мергели, известняки и доломиты кембрия, а также породы трапповой формации имеют унаследованную пластово-трещинную криотекстуру, часто с неполным заполнением трещин льдом.

Среднечетвертичные тонкодисперсные осадки (суглинки, глины) отличаются высокой льдистостью и большим разнообразием криогенных текстур. Ледяные включения верхнечетвертичных супесей и суглинков представлены тонкими линзочками и прослойками (рис. 3), а также синкриогенными жилами льда и захороненными жилами льда. В аллювиальных отложениях поймы песчано-илистого состава с включением органики, формирующейся с позднеголоценового времени в условиях промерзания, наблюдаются горизонтально-слоистая и массивная криогенные текстуры, в старичных осадках – слоистая и слоисто-сетчатая.

Озерно-болотные отложения, представленные оторфованными суглинками, отличаются высокой суммарной льдистостью. Ледяные включения образованы тонкими шлирами, линзами и льдом – цементом. В озерных отложениях присутствуют мощные (до 10 см) шлиры и небольшие линзы инъекционного льда.

Рыхлые четвертичные отложения на площади представлены преимущественно супесчано-суглинистыми разностями небольшой мощности (до 0,5...7,0 м) от нельдистых до сильнольдистых, от твердых до пластичных и текучих по консистенции. При оттаивании сильнольдистых грунтов часто происходят значительные осадки. Следовательно, целесообразно использование грунтов по I принципу для области сплошного распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ). Необходимо отметить, что малая мощность четвертичных отложений позволяет в качестве оснований использовать коренные породы, особенно в южной, юго-восточной части площади с островным и редкоостровным распространением ММГ. А при наличии в основании скальных грунтов и несплошного развития мерзлоты возможно использование принципа II СП 25.13330.2020.

Геологические и инженерно-геологические процессы исследуемого участка. Широкое распространение ММГ является одним из основных факторов, наравне со свойствами и особенностями коренных и четвертичных пород и климатическими особенностями исследуемой территории, который определяет наличие и развитие современных геологических процессов по трассе нефтепровода. Криогенные процессы представлены в основном морозным пучением грунтов, термокарстовыми формами рельефа, а также наледями, морозобойным трещинообразованием, эрозией. Распространение некоторых геологических процессов по трассе нефтепровода представлено на рис. 4.



Рис. 3. Ледяные включения верхнечетвертичных супесей и суглинков представлены тонкими линзочками и прослойками
Fig. 3. Thin lenses and layers represent ice inclusions of Upper Quaternary sandy loams and loams

Одним из процессов, определяющих сложность трассы нефтепровода в инженерно-геологическом контексте, является карст. В связи с широким распространением карбонатных пород по трассе нефтепровода карстовые процессы встречаются по всей трассе. Особая активность карста выявлена в ослабленных трещиноватых зонах на выровненных поверхностях карбонатных гряд, являющихся в свою очередь ядрами антиклинальных складок. Изменение температуры многолетнемерзлых грунтов, увеличение поверхностного стока вод, изменение в связи с антропогенным вмешательством химического состава грунтовых вод, направления и характера водотоков, повреждение поверхностного слоя почвы (в том числе и изменение четвертичных отложений) – все эти факторы приводят к активации карбонатного карста повсеместно по трассе нефтепровода.

В пределах исследуемой территории развиты как древний (погребенный) карст, так и современный карст, представленный в виде карстовых блюдец, карстовых воронок и локальных оседаний грунта. При вскрытии карстовых воронок заполняющими породами в основном являются суглинки мягкопластичной консистенции, суглинки элювиальные твердой консистенции, суглинки элювиальные мерзлые и нельдистые, супеси пластичные, пески пылеватые. Карстующиеся скальные доломиты и скальные известняки залегают относительно неглубоко, некоторые залегают на глубине 0,6 м.

Наибольшее распространение эрозионных процессов по трассе нефтепровода наблюдается в долинах водотоков, а их интенсивность непосредственно зависит от скорости потока. В связи с достаточно резким подъемом воды в весенний паводок и увеличением

объема и скорости потока наибольшее распространение получила боковая эрозия. Также присутствует плоскостная эрозия, которая протекает в сочетании с процессом термоэрозии, которая свойственна участкам, непосредственно прилегающим к речным долинам. Механизм денудации в основном обусловлен опережающим оттаиванием мерзлых пород и последующим их размывом.

Криогенные процессы при прерывистом и островном распространении мерзлых пород помимо активации процессов сезонного пучения приводят и к образованию наледей. По трассе нефтепровода наледи в основном встречаются на переходах нефтепровода с водотоками и проявляются в виде частичного или же полного замерзания водотока. По происхождению наледи подразделяются на наледи подземных вод (надмерзлотных), наледи поверхностных вод, смешанные наледи подземных и поверхностных вод. Также распространены наледи вод мелких несквозных таликов, развитых под ручьями.

Процесс сезонного пучения грунтов распространен повсеместно по трассе нефтепровода, с наибольшими показателями пучения на участках стока вод и долинах водотоков, в связи с наличием благоприятных факторов для его развития: небольшая глубина залегания грунтовых вод (менее 3 м) и водонасыщенность грунтов. Наибольшая интенсивность процесса достигается в периоды низких температур – с января по март. На территориях, подверженных заболачиванию, сезонное пучение грунтов достигает порядка 0,5 м, а многолетнее пучение представлено на территории буграми высотой 1...2 м. Водоразделы и склоны с грунтами небольшой влажности и глубоким залеганием грунтовых вод менее подвержены процессу пучения грунта, ми-

нимальная величина бугров пучения на таких участках составляет порядка 0,01...0,02 м. В соответствии с СП

115.13330.2016 более 75 % территории трассы нефтепровода оценивается как весьма опасная.

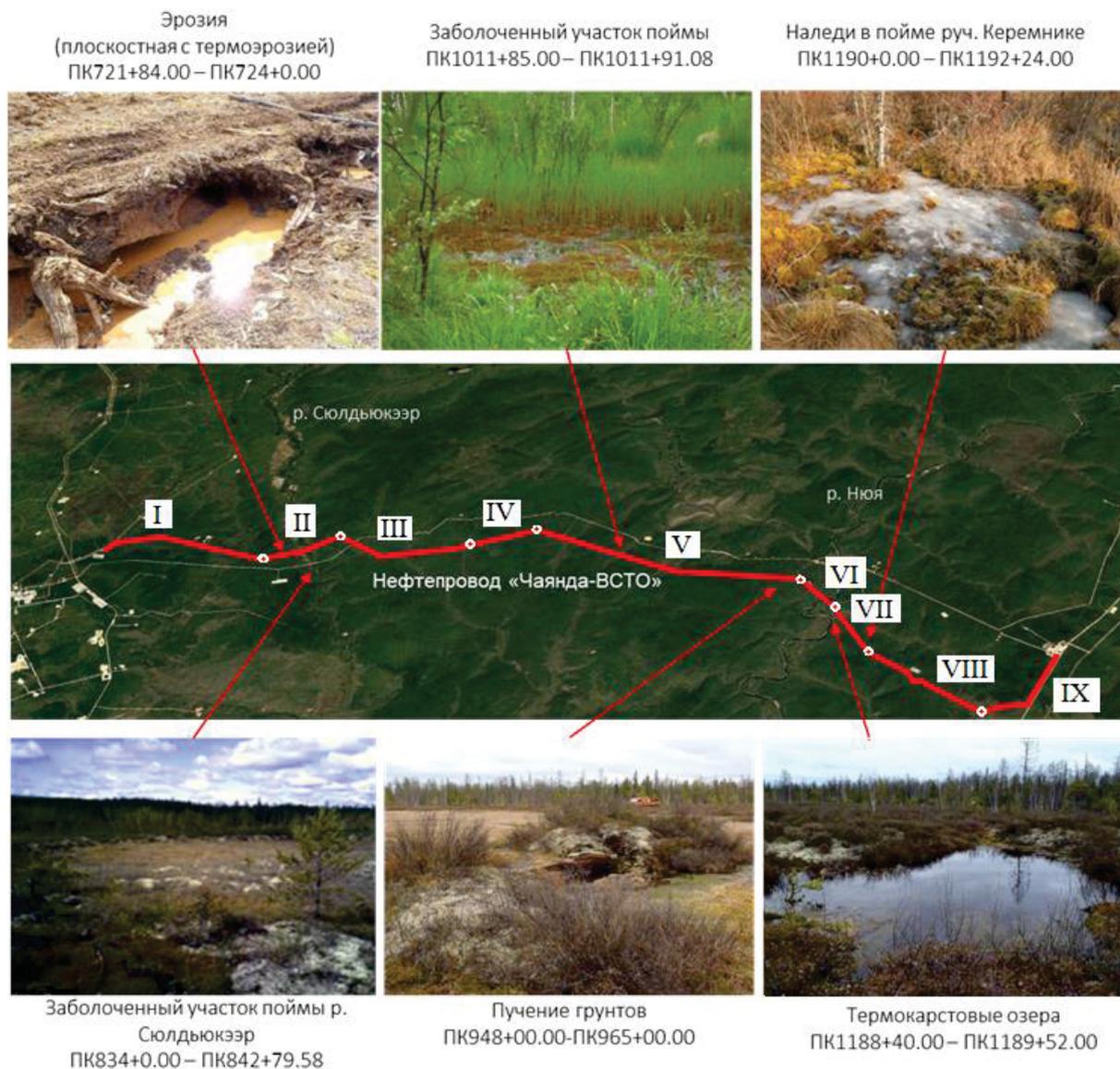


Рис. 4. Распространение некоторых геологических процессов по трассе нефтепровода
Fig. 4. Distribution of geological processes along the route of the oil pipeline

Влияние геоэкологических условий в сочетании со сложным рельефом, геоморфологическим и литологическим строением активизирует процесс заболачивания. Стоит отметить, что заболачивание территории распространено не повсеместно по трассе нефтепровода – наибольшая заболоченность зафиксирована на территориях водоразделов, характеризующихся плоским строением и слабодренированными свойствами пород, на переувлажненных участках – долины и поймы рек и ручьев, подножия склонов и седловины. Также имеются участки на территориях площадных объектов линейной части вследствие изменения поверхностных условий, главным образом изменения поверхностного и подземного стока. Наличие выдержанных суглинистых отложений под почвенно-растительным слоем, служащих водоупором многолетнемерзлых пород, является основным фактором

заболачивания территории. Питание заболоченных участков осуществляется атмосферными осадками и паводковыми водами.

Термокарстовые процессы на исследуемой территории развиваются вследствие изменения теплового режима мерзлых грунтов и наблюдаются в основном на участках сильнольдистых озерно-болотных отложений, аллювиальных отложений пойм и надпойменных террас. Крупными термокарстовыми формами являются озера, мелкие формы термокарста – блюдца, западины, мочажины – именно они повсеместно встречаются по трассе нефтепровода. Активация термокарста предрасполагает скопление вод в неглубоких западинах, глубиной до 1,0...1,5 м. Вода, накапливающаяся в канавах, оказывает отопляющее влияние на отложения и тем самым повышает их среднегодовую температуру, что, в свою очередь, приводит

к увеличению глубины протаивания грунтов. Термокарстовые ложбины (при благоприятных условиях) развиваются до полного вытаивания жильных льдов и постепенно перерастают в обширные заболоченные понижения. Однозначно, одной из причин современной активизации процесса протаивания пород по исследуемой территории считается производственное воздействие на природную среду, проявляющееся прежде всего в разрушении почвенно-растительного покрова, что влечет за собой резкое увеличение глубины сезонного оттаивания. В соответствии с СП 115.13330.2016 категория опасности природных процессов по термокарсту на отдельных участках (потенциальная площадная пораженность территории более 25...75 %) оценивается как опасная.

Методика выполнения работ

Исследование, проведенное в отделении геологии ТПУ, включало анализ литературных и фондовых материалов, полученных при инженерно-геологических изысканиях при проектировании трассы, их обобщение и анализ. Так, на первоначальном этапе были выделены участки по трассе нефтепровода, характеризующиеся определенными технологическими параметрами трубопровода: узлы запорной арматуры, переходы с байпасными линиями и др. В итоге трасса нефтепровода поделена на девять ключевых участков. Далее, используя данные инженерно-геологических изысканий, продольные разрезы трассы нефтепровода, фактические материалы по территории исследования, были идентифицированы участки проявления различных опасных геокриологических и геологических процессов (карст, заболачивание, наледеобразование, эрозия, предрасположенность к пучению грунтов) и их протяженность для каждого из участков трубопровода. Полученные численные значения протяженности участков, на которых наблюдается развитие опасных геологических процессов, использовались для определения удельного веса всех идентифицированных проявлений ОГП на каждом из девяти участков. Оценку удельного веса предлагается определять используя следующую формулу (1):

$$\gamma = \frac{\sum_{i=0}^n l_i}{L}, \quad (1)$$

где γ – удельный вес воздействия опасных геологических процессов на определенном участке трассы трубопровода, уд. ед.; l_i – протяженность участка, на котором обнаружено развитие опасного геокриологического или же геологического процесса; n – количество участков, подверженных воздействию определенного опасного геокриологического или же геологического процесса; L – протяженность исследуемого участка трассы трубопровода, м.

Полученные значения протяженности каждого отдельного инженерно-геологического процесса трассы позволяют выявить относительный вклад определенного процесса на определенном участке в формирование потенциальной возможности развития опасных условий эксплуатации трубопровода.

Результаты

На основании полученной методики оценки для каждого участка определены показатели удельного веса воздействия опасных инженерно-геологических процессов, что дало возможность ранжировать участки трассы трубопровода по степени опасности (рис. 5). Предложено выделить следующие участки: особо опасные (удельный вес воздействия более 90 % от участка), опасные (удельный вес воздействия более 60 % от участка), умеренно-опасные (удельный вес воздействия более 30 % от участка), неопасные (удельный вес воздействия не более 30 % от участка).

Особо опасные участки трассы – участки III и IV – согласно предложенной методике, характеризуются сильно развитыми геокриологическими процессами. Прерывистое распространение ММГ, характеризующееся распространением мерзлых пород как с дневной поверхности, так и на глубине нескольких метров в виде отдельных участков мерзлых пород, а также наличие на рассматриваемой территории мелких водотоков предрасполагает к образованию морозных пучений грунтов и морозобойных трещин, активации термокарстовых процессов и эрозии. Участки удалены от промысловой автодороги, не имеют постоянных проездов для обеспечения непрерывного мониторинга, что, в свою очередь, негативно сказывается на эксплуатации нефтепровода.

Опасный участок VI представляет собой переход через р. Нью, поэтому на данном участке особо развиты процессы наледеобразования, заболачивания и карстовые процессы. Геокриологические условия участка представлены островным распространением многолетнемерзлых грунтов несливающегося и сливающегося типов. Таким образом, не исключена возможность активации процессов боковой и донной эрозии, сезонного пучения грунтов. В рельефе преобладают крутые наклонные поверхности (от 1,5 до 9 градусов), что также представляет сложность при эксплуатации подводного перехода нефтепровода.

Опасный участок IX представляет особый интерес в связи с наличием на нем протяженных закарстованных территорий, которые расположены непосредственно в зоне прокладки нефтепровода. Антропогенное вмешательство, которое заключается в нарушении почвенно-растительного слоя и изменения рельефа местности, во время строительства объекта и при его эксплуатации приводит к увеличению поверхностного стока вод, изменению температуры многолетнемерзлых грунтов, что в свою очередь однозначно будет влиять на увеличение активности карстовых процессов.

Территория умеренно-опасных участков II, V, VII, VIII в основном характеризуется распространением многолетнемерзлых грунтов островного и прерывистого типов, наличием на участках водотоков, которые подвержены процессу наледеобразования и эрозии. Территории реки Сюльдьюкээр (участок II) и ручья Куччугуй-Утянних (участок V) заболоченные, с достаточно сложным рельефом.

Линейная пораженность участков трубопровода ОГП, %

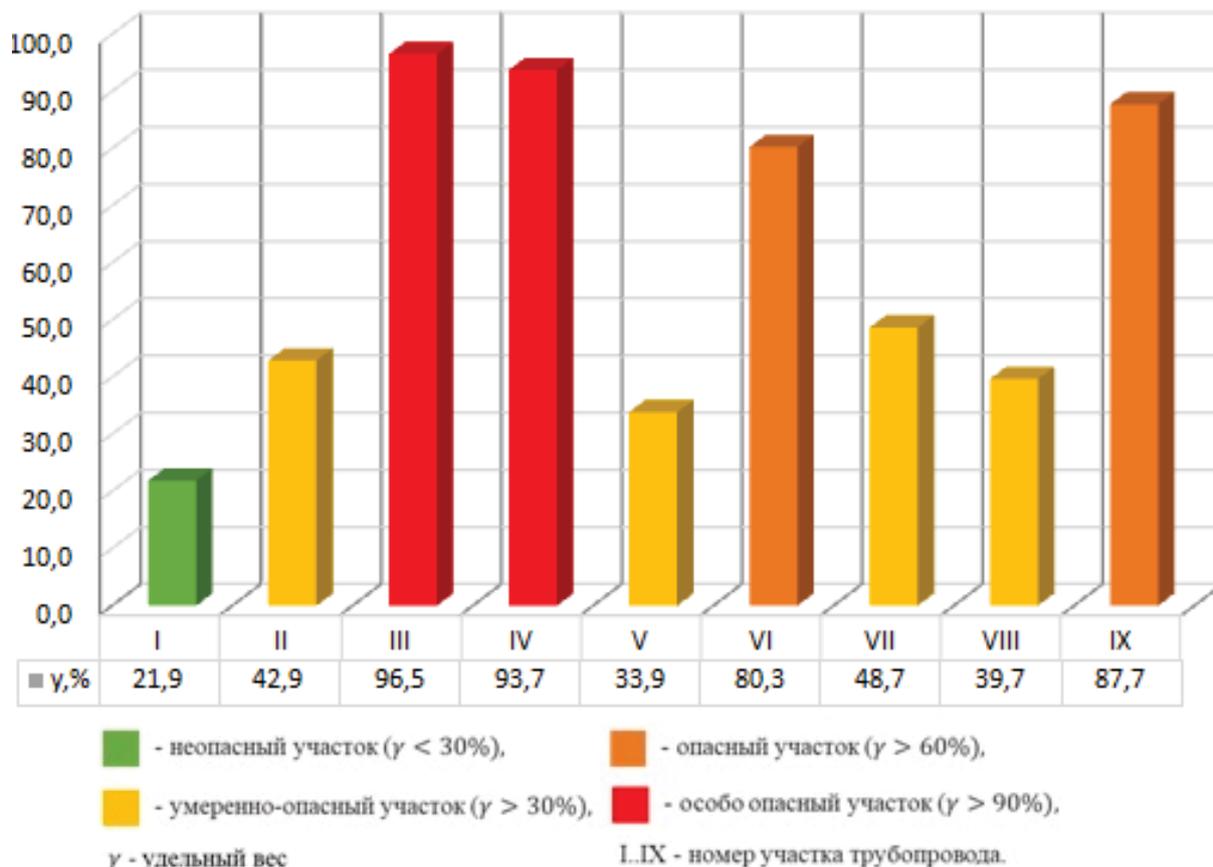


Рис. 5. Линейная пораженность участков трубопровода опасными геологическими процессами
 Fig. 5. Linear distribution of dangerous geological processes in the pipeline sections

Неопасный участок I представляет собой достаточно открытую местность выположенной поверхности, с незначительным уклоном. Стоит отметить, что на данном участке имеют место быть эрозионные процессы (в пределах пересечения трубопроводом ложины). Участок проходит в относительной близости к промышленной автодороге и незначительно удален от объектов инфраструктуры, что в свою очередь также положительно влияет на эксплуатацию нефтепровода.

Обсуждение результатов исследования

Анализируя относительный вклад каждого выявленного геологического процесса в формирование потенциальной возможности развития опасных условий эксплуатации, стоит отметить, что наибольший вклад вносят геокриологические условия территории (рис. 6). Участки, подверженные воздействию криогенных процессов, составляют 41,9 % об общей длины трассы нефтепровода. На участке трассы нефтепровода, ограниченного пикетами ПК705+65.00-ПК920+00.00, определено прерывистое, а также островное распространение многолетнемерзлых грунтов. Начиная с ПК920+00.00 выделяется островное распространение многолетнемерзлых грунтов. Поэтому именно на первом из выделенных участков зафиксиро-

рованы особо опасные участки по наличию и степени воздействия опасных геологических процессов на нефтепровод.

Также немалый вклад в осложнение эксплуатации нефтепровода вносят карстовые процессы. Порядка 6,1 % от общей протяженности трассы нефтепровода расположено в районах с активными карстовыми процессами. Стоит отметить значительную протяженность карстовых территорий на конечных участках трассы трубопровода (начиная с ПК 1245+00.00 и до конца трассы нефтепровода).

Однозначно, необходимо дополнительное изучение влияния на нефтепровод таких геокриологических и физико-геологических образований, как одиночно расположенные зоны сезонного пучения грунтов, карстовые воронки и блюдца, перелетки.

Несмотря на то, что результаты идентификации участков требуют конкретизации и проверки, представленные на данном этапе исследования результаты наглядно демонстрируют разнообразие физико-геологических процессов и различия участков трассы по степени опасности активации тех или иных процессов, которые могут негативно воздействовать на целостность трубопровода.

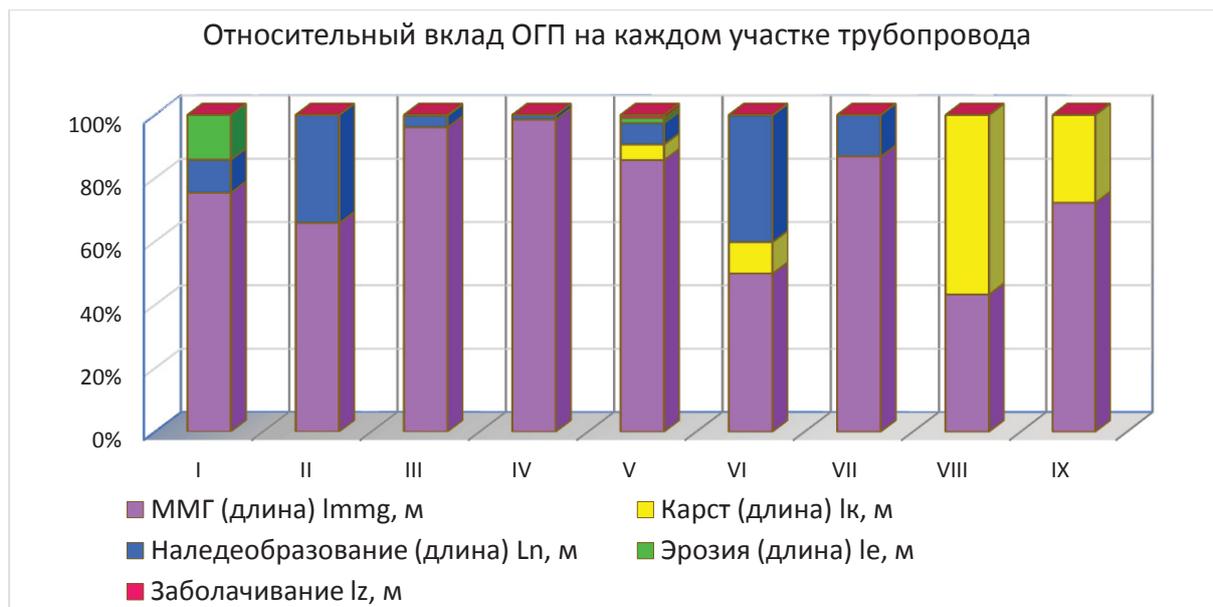


Рис. 6. Относительный вклад опасного геологического процесса на каждом участке
Fig. 6. Relative contribution of hazardous geological process in each area

Выводы

1. При проведении исследований территории трассы нефтепровода на данном этапе дана подробная физико-географическая и геологическая характеристика района. Особые климатические условия, характеризующиеся большими амплитудами температур, особенности тектоники и рельефа местности, густая сеть водотоков, в совокупности с особенностями залегания коренных пород, представленных в основном карбонатными и терригенно-карбонатными формациями кембрия, в конечном итоге и определяют наличие и развитие современных геологических процессов по трассе нефтепровода.
2. В результате исследования территории трассы нефтепровода следует отметить наличие следующих геологических процессов: карст, термокарст, наледообразование, заболачивание, эрозия, сезонное пучение грунтов. В целом инженерно-геологические условия трассы трубопровода достаточно сложные, в связи с наличием на большой площади многолетнемерзлых грунтов, сложного рельефа и суровых климатических условий района.

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 маги-

3. В настоящей работе проведен комплекс обработки проектных данных, продольных разрезов профиля трубопровода, а также фактического материала по трассе нефтепровода с целью определения фактического наличия и протяженности проявлений опасных геологических процессов по трассе трубопровода. Проведена их идентификация и привязка к трассе нефтепровода.
4. Предлагаемая в данной работе методика определения удельного веса воздействия опасных геологических процессов, находящая риск возникновения деформаций трубопровода, является достаточно быстрым в реализации способом для установления наиболее опасных участков. Установлено, что наибольшую угрозу для трубопровода представляют процессы, связанные с изменением многолетнемерзлого грунта, и карстовые процессы.

Исследование выполнено в Томском политехническом университете в рамках программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета (средства ВИУ).

- стральных 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. Investigation of permafrost engineering geological environment with electrical resistivity tomography: A case study along the China-Russia crude oil pipelines / X. Li, X. Jin, X. Wang, H. Jin, L. Tang, X. Li, R. He, Y. Li, C. Huang, S. Zhang // Engineering Geology. – 2021. – V. 291. – № 106237 URL: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106237> (дата обращения 01.06.2022).

6. 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.
7. 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.
8. Stroková 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).
9. Фи Х. Т., Строкова Л.А. Типизация грунтовых толщ территории города Ханой (Вьетнам) при изучении оседания земной поверхности из-за извлечения подземных вод // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 4. – С. 6–17.
10. 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.
11. Строкова Л.А., Ежкова 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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. Papatoussiou, 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).
17. 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.
18. Hearn G.J. Geomorphology in engineering geological mapping and modelling // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2019. – V. 78. – № 2. – P. 723–742.
19. 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.
20. 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.
21. Comparison and validation of per-pixel and object-based approaches for landslide susceptibility mapping / T. Gudiyangada Nachappa, S. Kienberger, S.R. Meena, D. Hölbling, T. Blaschke // Geomatics, Natural Hazards and Risk. – 2020. – V. 11. – № 1. – P. 572–600.
22. 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.
23. Gebreegziabher T., Suryabhagavan 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. – P. 1–18. URL: <https://doi.org/10.1080/24749508.2021.1924441> (дата обращения 11.06.2022).
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. 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.
28. Баборыкин М.Ю. Сходимость результатов дистанционного метода дешифрирования с полевыми работами на линейном объекте. На примере оползневого участка // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 161–175.
29. Елизаров А.С., Курчатова А.Н. Мониторинг надземных трубопроводов с помощью глобальных навигационных спутниковых систем // Вестник СГУиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2020. – Т. 25. – № 1. – С. 28–42.
30. Технический отчет по инженерным изысканиям. Обустройство нефтяной оторочки ботубинской залежи Чайяндинского НКМ с выделением этапа опытно-промышленных работ. Этап 3. Строительство нефтепровода Чаянда-ВСТО. В 5 т. Т. 2.1 (часть 2). – Саратов: ОАО «ВНИПИгаздобыча», 2014. – 412 с.
31. Милановский Е.Е. Геология России и ближнего зарубежья (северной Евразии). – М.: Изд-во МГУ, 1996. – 448 с.

Поступила 23.06.2022 г.

Информация об авторах

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

Нечаев Д.А., аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 624.131

ROLE OF HAZARDOUS GEOLOGICAL PROCESSES IN OPERATION OF THE CHAYANDA-ESPO OIL PIPELINE

Lyudmila A. Stroková¹,
sla@tpu.ru

Dmitry A. Nechaev¹,
nechaevdmitryrf@gmail.com

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

The relevance of the work is caused by the importance of ensuring the smooth operation of pipeline transport, which determines the energy and economic security of the country. Manifestations of hazardous geological processes can cause pipeline failures, with consequences ranging from injury/death, environmental impact, and property damage, to lengthy service disruption and failure to achieve delivery targets. Pipeline failures resulting from natural hazards are typically rare (but costly) events. That is why it is important to correctly assess the ground conditions and predict their change during the operation of the pipeline.

This study aims to identify sections of the route with the probable activation of hazardous geological processes and their impact on the operation of the structure.

Methods of the research. This study includes an analysis of the results of engineering surveys on the arrangement of the Chayanda oil and gas condensate field and geotechnical monitoring data along the pipeline route.

The results. Description of the engineering and geological conditions of the pipeline route was carried out. The most common dangerous geological processes within the pipeline route are karst, waterlogging, water erosion, as well as manifestations of geocryological processes – thermal erosion, thermokarst, frost heaving, frost cracking, and icing. We identified the areas of manifestation of geological processes along the pipeline route. The processes associated with the change of permafrost soils and karst processes turned out to be the most extensive. We made the assessment of the contribution of the hazardous geological processes in sections between the nodes of the shut-off valves of the pipeline, which will ensure the safety of oil transportation, its regulation by disconnecting the section of the linear part of the pipeline.

Summary. The most vulnerable sections of the pipeline route have been identified as possible manifestations of geological hazards.

Key words:

Oil pipeline, engineering and geological conditions, karst, erosion, icing.

The research was carried out at National Research Tomsk Polytechnic University within the program of National Research Tomsk Polytechnic University competitiveness enhancement (VIU funds).

REFERENCES

- Varlamov S., Scriabin P. Inzhenerno-geokriologicheskoe sostoyanie 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-syevye 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.
- Li X., Jin X., Wang X. Jin H., Tang L., Li X., He R., Li Y., Huang C., Zhang S. Investigation of permafrost engineering geological environment with electrical resistivity tomography: a case study along the China-Russia crude oil pipelines. *Engineering Geology*, 2021, vol. 291, no. 106237.
- 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., Berezhnaya M.A., Dudenko I.A. Geotechnical monitoring for trunk pipelines in various types of permafrost. *Nauchny zhurnal Rossiyskogo gazovogo obshchestva*, 2016, no. 2, pp. 22–26. In Rus.
- Stroková 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).
- Phi H.T., Stroková L.A. Classification of soil types for Hanoi (Vietnam) when studying land subsidence at groundwater extraction. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 4, pp. 6–17. In Rus.
- Stroková L.A., Dmitrieva 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.

11. 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.
12. Strokova L.A., Galeeva E.I., Leonova A.V. Zoning of engineering-geocryological conditions of the territory of the route of the projected railway Egeest-Kyzyl-Kuragino. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 10, pp. 14–22. In Rus.
13. Strokova L.A., Nadezhkina Yu.Yu. Typification of engineering and geological conditions of the territory of the route of the projected railway Egeest-Kyzyl-Kuragino. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 2, pp. 64–77. In Rus.
14. 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>
15. 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.
16. 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).
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. Gebreegziabher T., Suryabhagavan 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).
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. 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.
28. 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.
29. Elizarov A.S., Kurchatova A.N. Monitoring of elevated pipelines using global navigation satellite systems. *Siberian State University of Geosystems and Technologies*, 2020, vol. 25, no. 1, pp. 28–42. In Rus.
30. *Tekhnicheskii otchet po inzhenernym izyskaniyam. Obustroystvo nefyanoy otorochki botuobinskoy zalezhi Chayandinskogo NGKM s vydeleniem etapa opytno-promyshlennykh rabot. Etap 3. Stroitelstvo nefteprovoda Chayanda-VSTO* [Technical report on engineering surveys. Arrangement of the oil rim of the Botuobinsk deposit of the Chayandinsky NGCM with the allocation of the stage of pilot industrial works. Stage 3. Construction of the Chayanda-ESPO oil pipeline]. In 5 vol. Vol. 2.1 (part 2). Saratov, VNIPIgazdobycha Publ., 2014. 412 p.
31. Milanovsky E.E. *Geologiya Rossii i blizhnego zarubezhya (severnoy Evrazii)* [Geology of Russia and the near abroad (Northern Eurasia)]. Moscow, Moscow State University Publ., 1996. 448 p.

Received: 23 June 2022.

Information about the authors

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

Dmitry A. Nechaev, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.