

УДК 622.691.4

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2018

ЭКОЛОГО-ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЕ И ГЕОТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ «СИЛА СИБИРИ»

М.Н. Железняк, С.И. Сериков, М.М. Шац

Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук
(677010, Россия, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36)

ECOLOGICAL, GEOCRYOLOGICAL AND GEOTECHNICAL CONDITIONS OF THE GAS TRANSPORTATION SYSTEM "FORCE OF SIBERIA"

Mikhail N. Zheleznyak, Sergey I. Serikov, Mark M. Shatz

Melnikov Permafrost Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
(36 Merzlotnaya st., Yakutsk, 677010, Russian Federation)

Получена / Received: 24.03.2018. Принята / Accepted: 09.06.2018. Опубликовано / Published: 29.06.2018

Ключевые слова:

выбор варианта трассы трубопровода, конкретные инженерно-геологические условия, прокладка трубы и строительство системы, достоинства и проблемность выбранного варианта трассы.

Предметом статьи является реакция природной среды на различные воздействия, связанные с нефтегазовой отраслью. Проанализировано современное состояние реализации проекта создания газотранспортной системы «Сила Сибири» в Восточной и Юго-Восточной Сибири. Цель исследования – показать проблемы, возникающие на различных стадиях создания объекта. К ним отнесены выбор варианта трассы трубопровода, способа прокладки трубы.

Проект газотранспортной системы (ГТС) «Сила Сибири» в Восточной Сибири в последнее время успешно реализуется. Завершены стадии изысканий и проектирования, в разгаре прокладка трубы. После успешных изысканий и проектирования начат один из наиболее ответственных этапов – прокладка трубы и строительство системы в целом. В общей комплексной системе инженерно-геологических знаний совершенно особым направлением является изучение сезонно- и многолетне-мерзлых пород. И дело не только в изучаемых параметрах – составе, строении и свойствах горных пород, но и в особенностях агрегатных состояний объекта исследований. Отрицательные температуры обуславливают принципиальные отличия в составе горных пород с развитием разнообразных подземных льдов, иногда составляющих до 90 % толщи, и иных характеристик.

Приведены основные результаты эколого-геокриологических исследований Института мерзлотоведения СО РАН последних лет, позволившие выявить главные сложности проекта и показать пути их решения. Показаны достоинства и описаны проблемы выбранного варианта трассы в конкретных инженерно-геологических условиях, подтверждена целесообразность применения подземного способа прокладки труб. Сделаны выводы, что сложные и разнообразные природные условия трассы ГТС обуславливают на стадиях строительства и эксплуатации в пределах участков с многолетне-мерзлыми грунтами и опасными геокриологическими и инженерно-геокриологическими процессами ряд специфических проблем. Избежать их можно лишь при условии доизучения наиболее сложных участков. Даны рекомендации по структуре ведомственного инженерно-геокриологического мониторинга.

Key words:

selection of pipeline route, specific engineering and geological conditions, pipe laying and construction of system, advantages and problems of chosen route.

The subject of the paper is the response of the natural environment to various impacts associated with the oil and gas industry. The paper is devoted to the analysis of the current state of implementation of the project of development of the gas transportation system "Power of Siberia" in East and Southeast Siberia. The purpose of the study is to show the problems that arise at various stages of creating the object. That includes choosing the appropriate pipeline route and method of pipe laying.

The project of gas transportation system (GTS) "Power of Siberia" in East Siberia is being successfully implemented recently. The stages of exploration and design are completed, pipe is being laid. After successful research and design, one of the most important stages (pipe laying and system building in general) has started. Studying the seasonal and permafrost rocks is a very special direction in the general integrated system of engineering and geological knowledge. It is important to consider both studied parameters such as composition, structure, properties of rocks, and features of aggregate states of the object of research. Negative temperatures cause fundamental differences in the composition of rocks with the development of diverse underground ice, sometimes constituting up to 90% of the thickness, and other characteristics.

The main results of ecological and geocryological research recently performed by Melnikov Permafrost Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, which have revealed the main difficulties of the project and show the ways of their solution, are given. Advantages and features of the selected route in the specific engineering and geological conditions are described. The need for underground method of pipe laying is confirmed.

It is concluded that complex and diverse natural conditions of the route of the GTS determine a number of specific problems at the stages of construction and operation within areas with permafrost soils and dangerous geocryological and engineering-geocryological processes. It is possible to avoid them only while studying the most difficult areas. Recommendations on the structure of department of engineering and geocryological monitoring are given.

Железняк Михаил Николаевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор, директор (тел.: +007 914 226 93 47, e-mail: fe@mpi.ysn.ru).

Сериков Сергей Иванович – научный сотрудник (тел.: +007 914 294 72 63, e-mail: grampus@mpi.ysn.ru).

Шац Марк Михайлович – кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник (тел.: +007 921 102 05 76, e-mail: mmshatz@mail.ru). Контактное лицо для переписки.

Mikhail N. Zheleznyak (Author ID in Scopus: 22959266400) – Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Director (tel.: +007 914 226 93 47, e-mail: fe@mpi.ysn.ru).

Sergey I. Serikov – Scientific fellow (tel.: +007 914 294 72 63, e-mail: grampus@mpi.ysn.ru).

Mark M. Shatz – PhD in Geography, Leading Research Fellow (tel.: +007 921 102 05 76, e-mail: mmshatz@mail.ru). The contact person for correspondence.

Введение

Проект газотранспортной системы (ГТС) «Сила Сибири» в Восточной Сибири в последнее время успешно реализуется. Завершены стадии изысканий и проектирования, в разгаре прокладка трубы. Ранее были освещены сложные природные, в том числе инженерно-геологические условия трассы, геотехнические и геоэкологические характеристики трубопровода, ряд сопутствующих моментов разной ведомственной принадлежности [1–32]. Рассмотрен ход прокладки трубы по состоянию на начало 2017 г. [33, 34, 36]. Особенно актуальной задачей реализуемого этапа является получение оперативной информации о состоянии природной среды по трассе ГТС, а именно о реакции ее наиболее динамичных компонентов, в том числе многолетне-мерзлых пород (ММП), на техногенные воздействия. Отсутствие либо недостаточность указанных выше материалов, как правило, приводят к неопределенности при выборе стратегии природопользования, связанной с невозможностью разработки плана конкретных природоохранных и компенсационных мероприятий. Их реализация позволяет существенно уменьшить ущерб от освоения.

Это положение можно подтвердить следующим неудачным примером. В середине прошлого века в Поволжье развернулась грандиозная стройка крупнейшего комплекса «Атоммаш» по производству оборудования для атомной отрасли. Некачественные изыскания и проектирование привели к серьезным ошибкам. Не был получен объем материалов об инженерно-геологических свойствах горных пород, достаточный для достоверного прогноза. В результате комплекс разместили на просадочных грунтах. Более того, при проектировании в целях экономии было принято решение о сокращении на несколько метров длины свай в основаниях огромных, протяженностью многие сотни метров, корпусов.

Еще до завершения строительства в результате значительного подъема уровня грунтовых вод, питаемых необычно большим количеством атмосферных осадков, в основаниях многих корпусов произошли недопустимые просадки пород, повлекшие нарушения их устойчивости. Технических решений по исправлению ситуации в то время не было,

разработать новые не получилось, и стройку пришлось законсервировать. Таким образом, из-за преступной халатности и недооценки значения инженерно-геологического обеспечения строительства были допущены колоссальные потери бюджетных средств.

В общей комплексной системе инженерно-геологических знаний совершенно особым направлением является изучение сезонно- и многолетне-мерзлых пород. И дело не только в изучаемых параметрах – составе, строении и свойствах горных пород, но и в особенностях агрегатных состояний объекта исследований. Отрицательные температуры обуславливают принципиальные отличия в составе горных пород с развитием разнообразных подземных льдов, иногда составляющих до 90 % толщи, и иных характеристик. Особое значение эти свойства приобретают в процессе освоения северных территорий, когда воздействию подвергаются толщи со специфическими свойствами, принципиально отличными от свойств немерзлых горных пород.

Современное освоение криолитозоны, использование ее ресурсов, проживание городского и сельского населения невозможны без системной оценки совокупного влияния на нее как проектируемых, так и уже существующих промышленных объектов. Их взаимосвязь в сочетании с оценкой последствий социально-экономических, экологических, историко-культурологических и медико-биологических процессов представляет сложную задачу, требующую глубокого системного подхода и имеющую фундаментальное социально-региональное значение. Именно эколого-геокриологическая составляющая стала в последнее время наиболее актуальной в общей системе инженерно-геологических знаний.

Эколого-геокриологические условия и сложности трассы ГТС

Выше было показано, что одним из серьезно затрудняющих реализацию проекта обстоятельств является недостаточность оперативной информации о состоянии природной среды по трассе. В связи с этим особый интерес представляют результаты комплексных исследований сотрудников Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН последних лет.

В целом обуславливающий многообразие природных условий трассы рельеф ГТС довольно сложен, он включает высокие горные хребты, плато, плоскогорья и низменности, расчлененные речными долинами [13, 19, 20, 32]. Наиболее высокие горы располагаются в южной и юго-восточной частях территории, где преобладают отметки от 800 до 1500 м над уровнем моря. Основные элементы вытянуты в субширотном или в северо-восточном направлении. Район Алданского плоскогорья включает крупные мезозойско-кайнозойские морфоструктуры широтного направления – Чульманскую впадину и Центрально-Алданский пологий свод. Морфоструктура Чульманской впадины, выполненной песчано-глинистыми отложениями юры и нижнего мела, характеризуется платообразным рельефом. Рельеф Чульманского плато отличается наличием широких плоских или пологоволнистых водоразделов с довольно крутыми ступенчатыми склонами. Высоты водоразделов составляют 950–1050 м, увеличиваясь к югу до 1200 м.

Трасса газопровода пересекает Становой хребет на стыке Республики Саха (в пределах Нерюнгринского района) и Амурской области в пределах Тындинского района. Становой хребет состоит из двух, а местами трех параллельных цепей, не всегда четко выраженных орографически. Абсолютные высоты по трассе достигают 1000–1100 м.

Геокриологические и инженерно-геокриологические условия по трассе ГТС «Сила Сибири» чрезвычайно пестрые и сложные [1, 9, 11, 13, 14–16, 21–28, 31]. В целом ММП охватывают около трети трассы,

зафиксированы участки со всеми типами их пространственного распространения – от сплошного и прерывистого до островного и спорадического. Что касается разреза горных пород, то характерны толщи как с монотонным, так и с полигенным строением, при этом последние наиболее опасны для трубопроводов подземной прокладки, вызывающих дополнительные напряжения в системах труба – мерзлый грунт.

Температура горных пород на подошве слоя ее годовых колебаний, обычно 10–12 м, в зависимости от напочвенных покровов, состава, строения и свойств самих пород варьируется в широких пределах. Самые низкие температуры характерны для пониженных участков развития переувлажненных, а порой и заболоченных грунтов и наиболее приподнятых горных пространств, достигая там $-6,5$ °С [15, 16]. На рис. 1 показана временная динамика температуры горных пород на одном их участков трассы.

На фоне подобного разнообразия природных условий многоплановы и инженерно-геологические криогенные процессы, особо опасные при освоении [2–8, 12, 17, 18, 29, 32]. Их характерной чертой является разнообразие форм и приуроченность к определенным элементам рельефа – днищам и нижним частям склонов долин. Более ограничено они развиты на водоразделах.

Наиболее развито морозобойное растрескивание пород, криогенное выветривание, наледообразование и пучение грунтов, в меньшей степени – термокарст, солифлюкция [22, 32]. Морозобойное трещинообразование обуславливает потерю монолитности и прочности массивов пород,

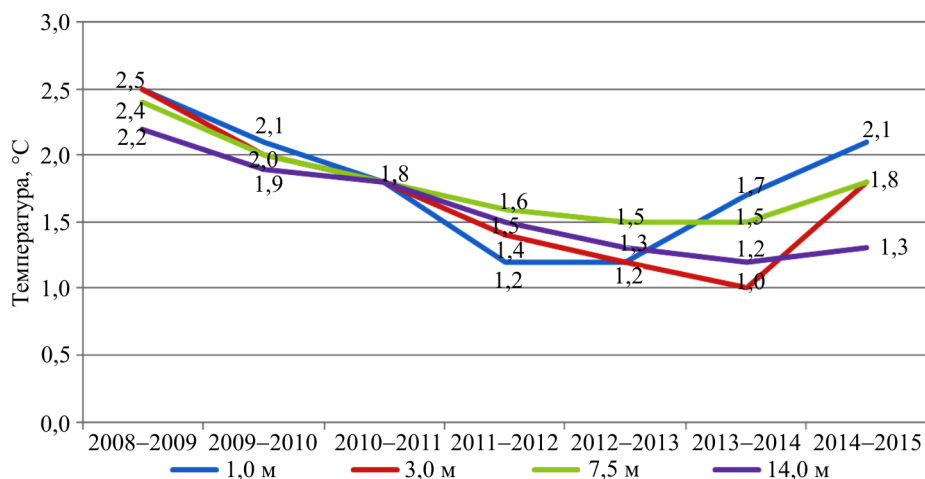


Рис. 1. Динамика температуры горных пород на участке «АЯН» за период 2008–2015 гг.

а также является причиной образования таких неблагоприятных для строительства и эксплуатации инженерных сооружений процессов и явлений, как трещины (рис. 2) и каменные моря – курумы (рис. 3).

У подножий небольших местных поднятий формируются залежи подземного льда, многочисленных форм крупно- и мелкобугристого рельефа (рис. 4), а также развиваются склоновые процессы.

Морозобойные трещины в поверхностных отложениях и связанный с ними полигональный рельеф наиболее четко выражены на поверхности низких заторфованных аккумулятивных террас, в нижних частях пологих склонов, верховьях рек Иенгры, Тимптона, Улахан-Леглигер и др.

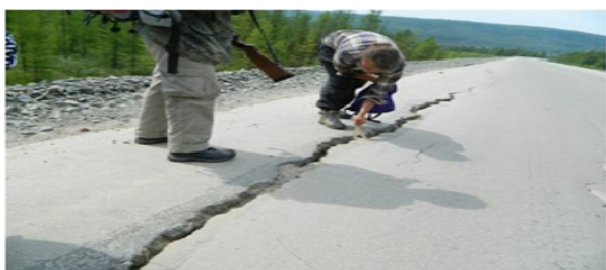


Рис. 2. Трещины на проезжей части дороги с твердым покрытием на участке устья р. Большой Ключ. Фото С.И. Серикова, 2015 г.



Рис. 3. Курум на склоне между речьями рр. Таёжный, Гольцовый, сложенного крупноглыбовым материалом. Фото С.И. Серикова, 2015 г.



Рис. 4. Замаренный бугристо-западинный участок трассы ГТС. Фото И.В. Дорофеева, 2012 г.

Средние размеры полигонов здесь достигают 10×10 м, что свидетельствует о низких среднегодовых температурах пород. Максимальная ширина трещин на надпойменных террасах рек достигает 0,2–0,5 м при длине 20–40 м и видимой глубине до 2–3 м. На водоразделах и в верховьях долин встречаются торфяники, представляющие собой торфяные блоки размером 30×50 м, разделенные полигональной сетью трещин. Сами блоки с поверхности сложены торфом мощностью до 2–3 м, подстилаемые тяжелыми суглинками, вмещающими ледяные жилы мощностью до 3 м при ширине до 2 м. Максимальная ширина жил зафиксировано на контакте торфа и суглинков. Повторно-жильные льды встречаются в долинах рек Ороченка, Васильевка, Николкин ключ и др. Наиболее характерно для рассматриваемой территории трещинообразование в пластичных (супесчано-суглинистых) породах, не сопровождающееся заполнением трещин водой и образованием жильных льдов [32]. Такого рода трещинообразование выражается в формировании особого вида мерзлотного микрорельефа – бугристых марей с размерами полигонов от $2 \times 1,5$ до 3×5 м, реже до 5×10 м. Ширина трещин варьируется от 5–15 см до 0,5 м и более при глубине от 0,2 до 0,7 м. На пологих ($1-3^\circ$) приводораздельных частях склонов трещиноватость поверхностных грунтов выражена четко и полигоны имеют большие размеры сторон в десятки метров. На более крутых участках склонов ($3-6^\circ$) полигоны имеют меньшие размеры.

Кроме полигонального рельефа, на рассматриваемой территории широко распространены структурные формы микрорельефа в виде каменных многоугольников, особенно широко развитых в центральной части Алданского плоскогорья, каменных колец и полос на Чульманском плоскогорье [32]. Обычно каменные многоугольники достигают диаметра 2–3 м на породах карбонатной и терригенной формаций и 3–10 м на породах магматической группы формаций. Бордюры многоугольников часто представлены обломками скальных пород размерами от 0,1 до 1 и более метров, несущих следы морозной сортировки и выпучивания, а породы внутри многоугольников или колец имеют меньшую крупность или вообще представлены мелкоземом. На плоских водоразделах

многоугольники имеют форму, близкую к правильной, а на более крутых склонах (до 10°) часто приобретают форму каменных полос. Примером полигонального рельефа в пределах развития скальных пород являются нагорные террасы [29].

Неглубокое залегание по трассе ММП и связанных с ними вод слоя сезонного протаивания способствует широкому развитию процессов пучения грунтов, весьма неблагоприятных для инженерного освоения. Отмечаются бугры пучения двух циклов развития – однолетние и многолетние. Наиболее широко бугры пучения развиты в заболоченных верховьях речных долин и на участках, сложенных суглинистыми оторфованными отложениями [32]. Кроме того, бугры пучения отмечаются на заболоченных и замшелых участках террас и водоразделов и особенно в пределах слаборасчлененной части Алданского плоскогорья.

Сезонные (однолетние) бугры пучения высотой 0,5–0,8 и диаметром 1–2 м приурочены в основном к участкам избыточного увлажнения – тыловым швам террас, русловым участкам ручьев и рек, водораздельным седловинам, заболоченным склонам [32]. В ядрах бугров наблюдаются многочисленные линзы или прослойки льда. Подобные бугры формируют специфический микрорельеф днищ большинства водотоков бассейнов рек Малого и Большого Нимыра, Улахан-Леглигера и других, а их особенностью является широкое развитие специфического «пьяного леса».

Многолетние бугры пучения – гидролакколиты, встречаются более локально, достигают высоты 5 м и диаметра основания 15–25 м. Обычно они приурочены к местам разгрузки трещинно-жильных и других подземных вод (бассейны рек Васильевка, Керак и др.) [32]. Наиболее крупный бугор на пойме р. Горбылях зафиксирован в пределах обводненного осоково-сфагнового болота. Форма бугра овальная, высота 4–5 м, длина основания – 15–20 м.

Еще одним проявлением процессов пучения и сортировки являются весьма распространенные пятна-медальоны, каменные многоугольники и т.д. [32]. Процесс неравномерного пучения, связанный с промерзанием воды в замкнутом объеме, относится к наиболее геотехнически опасным и может приводить к выпучиванию

трубопроводов подземного заложения из-за притока влаги к фронту промерзания.

По трассе прокладки ГТС отмечаются залежи подземных льдов двух генераций – повторно-жильные и инъекционные. В северной части трассы повторно-жильные льды приурочены к надпойменным террасам крупных рек и фрагментам озерно-аллювиальной равнины в районах средней Лены, где на участках их развития встречаются термокарстовые озера. Отдельные выходы повторно-жильных льдов для рассматриваемой трассы известны в долинах некоторых рек Алданского щита в южной части Якутии и даже на севере Амурской области [1–3].

На большей части трассы ГТС поверхностные отложения имеют небольшую льдистость при неглубоком залегании коренной основы. Поэтому там преобладают мелкие термокарстовые формы деструктивной направленности – мочажины и воронки, достигающие в диаметре 0,5–2,0 м и по глубине 0,5 м, развитые в плоскогорных районах распространения пород метаморфической и магматической формаций докембрия. Обусловлены они в основном увеличением глубины сезонного протаивания сильно льдистых делювиальных суглинков в процессе эволюции микрорельефа и растительного покрова. Реже встречаются термокарстовые озера диаметром до 300 м (бассейн р. Кабакта и др.) [1]. Южнее п. Чульман термокарстовые озера более распространены в долине р. Горбылях, в частности на первой его террасе. Форма озер круглая или овальновытянутая, дно плоское. Размеры их в поперечнике колеблются от 5,0–10,0 м, мелкие – до 200–300 м (крупные). По [3] особенности географического распространения ММП в Южной Якутии предполагают полное отсутствие термокарстовых процессов лишь на склонах и водоразделах Лено-Алданского и Чульманского плато.

В пределах резко расчлененных плоскогорных массивов отмечается еще одна форма термокарста – бугристо-мочажинный рельеф. Обычно он формируется в днищах узких речных долин, заполненных флювиогляциальным материалом, имеющим большую льдистость, и имеет эрозионно-термокарстовое происхождение. Округлые бугры диаметром 15–50 м и высотой до 2,0 м, разделенные полосками сочленяющихся мочажин, генетически представляют обрывки

первой или второй надпойменных террас. Особые по степени развития термокарста районы представляют собой аллювиальные равнины (Токарикано-Иенграская и др.) и пологоволнистые участки плоскогорий (Чульманского, Нимныро-Ыллымахского). Специфику термокарстовых форм рельефа здесь определяют высокая льдистость покровных отложений и условия стока поверхностных вод [32].

Вытаивание подземных льдов в сочетании с морозным пучением, морозобойным растрескиванием, солифлюкцией, эрозией и плоскостным смывом создают здесь своеобразные комплексы криогенных форм рельефа, не встречающиеся в других районах центральной части Южной Якутии [2, 3].

Особо следует отметить, что территория, на которую распространяется влияние строительства и эксплуатации магистрального газопровода «Сила Сибири», относится к одному из наиболее наледоопасных регионов в нашей стране [2–8, 10, 17]. Судя по имеющимся материалам, только в пределах отрезка трассы Чаянда–Ленск отмечено 12 участков пучения грунтов и три с наледями, для отрезка Ленск–Сковородино – 63 участка с наледями и 273 участков сезонного или многолетнего пучения. Очень часто наледообразование там сопровождается развитием сезонных и многолетних бугров пучения, а также процессами термокарста по залежам инъекционных и повторно-жильных льдов. Поэтому все эти участки следует рассматривать в отношении инженерного освоения как потенциально по образованию наледи опасные.

Результаты дешифрирования пространственных закономерностей развития наледей по трассе ГТС свидетельствуют об их широком распространении от центральной части южной Якутии вплоть до юга Амурской области. В подобных условиях на участках пересечения трассой можно ожидать усиление наледообразования.

Судя по опыту предыдущего инженерного освоения (строительство и эксплуатация федеральной автомобильной трассы «Лена», часто именуемой АЯМ, Амуро-Якутской железнодорожной и Байкало-Амурской железнодорожной магистралью, нефтепровод «Восточная Сибирь – Тихий Океан» [2, 18, 33, 34, 35], к наиболее геотехнически проблемным следует отнести участки наледообразования в пределах горных

участков трассы. Там воздействие собственно трубопровода и других сопутствующих инженерных сооружений на грунты основания приводит к изменению теплового режима и свойств. Не менее сложное и комплексное криогенное явление – мерзлотный карст. Имеются сведения о многочисленности и активности карстовых воронок на участках развития ММП в пределах Лено-Алданского карстующегося плато, расположенных севернее трассы ГТС «Сила Сибири», активных карстовых воронках непосредственно в принятой части Чаяндинского нефтегазового газоконденсатного месторождения (ЧНГГКМ), на Якоkit-Селигдарском междуречье, на переходе Алданского плоскогорья к Чульманскому плато [20, 30]. Подобные участки представляют особую опасность в плане геотехнической надежности и требуют пристального внимания от периода рекогносцировочных работ до стадий строительства и эксплуатации. Именно такие участки обычно становятся базой развития других процессов – активных тектонических разломов, ослабленных зон дробления коренных пород, наледообразования и т.п.

Ресурсной базой ГТС является ЧНГГКМ, в орографическом отношении представляющее собой слабо всхолмленную равнину [20]. Открыто в 1989 г. и включает в себя два более мелких месторождения – Озерное и Нижне-Хамакинское. Согласно нефтегеологическому районированию, данная территория относится к Непско-Ботуобинской нефтегазоносной области – богатейшей по разведанным запасам углеводородов и прогнозным ресурсам части Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции, где в настоящее время разведано 13 месторождений нефти и газа, среди которых три крупных и одно уникальное.

Главные нефтегазоносные толщи – базальные отложения рифей-венд-нижнекембрийского терригенно-карбонатного комплекса. Месторождение приурочено к крупной неантиклинальной ловушке в северо-восточной части Непского свода и связано с зонами выклинивания песчаников венда.

Основные горизонты: ботуобинский – соответствует нижней подсвите бюкской свиты; хамакинский – верхней подсвите паршинской свиты. Горизонты сложены линзовидными телами преимущественно средне- и мелкозернистых

хорошо сортированных песчаников с кварцевым и сульфатно-карбонатным цементом. Мощность тел достигает 20 м. Все залежи пластовые, литологически и тектонически экранированные. Глубина нахождения залежи – 1450–1850 м. Разрывные нарушения делят месторождение на два блока – северный и южный. Виды газа – метановый (86 %), низкоуглекислый, азотный (до 8 %) и низкоконденсатный. Газовая залежь содержит нефтяные оторочки. Нефть тяжелая, смолистая, сернистая, парафиновая.

Современное состояние проекта

В настоящее время основное внимание уделяется двум главным аспектам реализации проекта. В первую очередь, это комплекс проблем, связанных непосредственно со строительством трубопровода, во вторую – продолжением обустройства ресурсной базы ГТС – Чаяндинского НГТКМ. История начальных стадий реализации проекта была освещена ранее [34].

21 мая 2014 г. «Газпром» и CNPC подписали 30-летний договор купли-продажи российского газа по восточному маршруту – по газопроводу «Сила Сибири». Документ предполагает поставку в КНР 38 млрд м³ газа в год. В 2015 г. «Газпром» и CNPC подписали меморандум о взаимопонимании по проекту трубопроводных поставок природного газа в Китай с Дальнего Востока России, а в 2016 г. – меморандум по хранению газа и электрогенерации на территории КНР и меморандум о проведении исследования возможности сотрудничества в области газомоторного топлива.

4 июля 2017 г. «Газпром» и CNPC подписали дополнительное соглашение к договору купли-продажи природного газа по восточному маршруту. В соответствии с документом, поставки газа в КНР должны начаться 20 декабря 2019 г. [35].

«Газпром» построил уже 1 тыс. 120 км газопровода «Сила Сибири», сварено в нитку 1 тыс. 348 км, сообщил журналистам председатель правления ПАО «Газпром» А. Миллер.

В конце 2017 г. А. Миллер подтвердил, что поставки «голубого топлива» в Китай начнутся точно в установленные сроки. Согласно соглашению с китайской корпорацией CNPC, Россия будет поставлять 38 млрд кубометров в год в течение 30 лет при общей сумме контракта 400 млрд долл. [36]. Помимо самого

трубопровода, началось строительство огромного Амурского газоперерабатывающего завода, который станет крупнейшим в России, явится важным звеном в цепочке поставок газа в Китай и одним из самых больших в мире предприятий по переработке природного газа. Его проектная мощность составит до 49 млрд м³ газа в год. В состав завода также войдет крупнейшее в мире производство гелия – до 60 млн м³ год. На завод будет поступать многокомпонентный газ Якутского и Иркутского центров газодобычи, которые «Газпром» создает в рамках восточной газовой программы. На ГПЗ из газа будут выделяться этан, пропан, бутан, пентан-гексановая фракция и гелий – ценные компоненты для газохимической и других отраслей промышленности.

Собственно Чаяндинское месторождение имеет сложное геологическое строение и особые термобарические пластовые условия. Поэтому для его освоения «Газпром» применяет самые передовые технические достижения. В суровых природно-климатических условиях Якутии используются малолюдные технологии, предполагающие обеспечение контроля за работой оборудования и комплексное управление объектами в автоматическом режиме. Такой подход способствует оптимизации численности персонала, сокращению транспортных издержек при перевозках людей, отказу от избыточного строительства инфраструктуры, связанной с пребыванием работников на объектах.

Месторождение имеет большую площадь, поэтому для снижения затрат на строительство линий электропередач на удаленных кустах газовых скважин планируется применять автономные источники энергоснабжения на основе возобновляемых источников энергии.

На Чаяндинском месторождении впервые в России в промышленном масштабе будет использована технология мембранного извлечения гелия из природного газа непосредственно на промысле [34]. Она позволит направлять в газопровод то количество гелия, которое будет востребовано рынком. В последний период освоения на месторождении проведены бурение восемнадцати разведочных скважин, а также на территории более 4 тыс. км² сейсморазведочные работы в 3D-формате, позволяющие детально оценить большинство категорий запасов.

Еще одной серьезной проблемой является оценка степени риска поражения природной среды при реализации проекта [34, 37]. Существует много подходов при подобной оценке [37–48], и специалистам предстоит применительно к местным условиям выбрать наиболее достоверный и объективный.

Заключение

Судя по результатам проведенных исследований, к наиболее сложным участкам, где необходимы систематические мониторинговые исследования, связанные с угрозой термокарста по залежам подземных льдов и ледогрунтов, относится пространство от р. Бирюк до Олекмы, по карстовой опасности – от Чаяндинского месторождения до компрессорной станции (КС) 4 «Нимнырская» и небольшой участок между КС «Нимнырская» – КС «Нагорная», наледная опасность имеется на отрезке трассы от р. Нюя до р. Малый Иньм.

Особое внимание следует уделить широко развитому на Лено-Алданском и Приленском плато мерзлотному карсту. Даже в пределах Чаяндинского НГКМ имеются участки с активными карстовыми воронками. При техногенном нарушении в ходе строительства и эксплуатации ГТС это может привести к серьезным негативным последствиям и

отказам техногенных систем. Примечательно, что в случае сопряженного воздействия на один и тот же участок трассы трубопровода нескольких экзогенных процессов, даже при их одновременности, степень пораженности геосистем возрастает и усугубляются геотехнические риски эксплуатационной надежности. Сложные и разнообразные природные условия трассы ГТС обуславливают на стадиях строительства и эксплуатации в пределах участков с многолетне-мерзлыми грунтами и опасными геокриологическими и инженерно-геокриологическими процессами ряд специфических проблем. Избежать их возможно лишь при условии доизучения наиболее сложных участков в отношении:

- характера распространения ММП;
- геотермических условий с выстойкой скважин;
- конкретных данных о пространственном развитии криогенных процессов, их динамике, тенденциях и интенсивности;
- необходимых для прогнозных теплотехнических расчетов теплофизических характеристик напочвенных покровов.

Это позволит уменьшить степень технологических опасностей и сократить расходы на их оптимизацию.

Библиографический список

1. Алексеев В.Р. Закономерности распространения многолетне-мерзлых горных пород на юго-востоке Сибирской платформы // Геокриологические условия Забайкалья и Прибайкалья. – М.: Наука, 1967. – С. 117–123.
2. Алексеев В.Р. Индикационное значение геоботанических карт при изучении мерзлых горных пород // Докл. Ин-та географии Сибири и Дальнего Востока. – 1968. – Вып. 17. – С. 20–26.
3. Алексеев В.Р. Условия формирования и распространение наледей на юге Якутии // Наледи Сибири. – М.: Наука, 1969. – С. 31–41.
4. Алексеев В.Р. Наледи как фактор долинного морфолитогенеза // Региональная геоморфология Сибири. – Иркутск, 1973. – С. 99–134.
5. Алексеев В.Р. Наледи Лено-Амурского междуречья // Сибирский географический сборник. – Новосибирск: Наука, 1975. – С. 46–127.
6. Алексеев В.Р. Принципы и методы оценки наледной опасности // География и природные ресурсы. – 1980. – №2. – С. 117–122.
7. Алексеев В.Р. Проблемы картографирования наледных явлений // Материалы гляциологических исследований. – М., 1988. – Вып. 61. – С. 140–142.
8. Алексеев В.Р. Ландшафтная индикация наледных явлений. – Новосибирск: Наука, 2005. – 364 с.
9. Байкало-Амурская железнодорожная магистраль. Геокриологическая карта. М-б 1 : 2 5000 000. – М.: ГУГК, 1979. – 2 л.
10. Балобаев В.Т. О некоторых особенностях выхода на поверхность наледных источников в Южной Якутии // Наледи Сибири. – М.: Наука. – 206 с.
11. Белокрылов И.Д., Ефимов А.И. Многолетне-мерзлые породы зоны железорудных и угольных месторождений Южной Якутии. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 75 с.
12. Выпуклые бугры пучения многолетне-мерзлых торфяных массивов / Ю.К. Васильчук, А.К. Васильчук, Н.А. Буданцева, Ю.Н. Чижова. – М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 2008. – 560 с.
13. Геокриология СССР. Средняя Сибирь. – М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1990. – 383 с.
14. Железняк М.Н. Температурное поле горных пород переходной зоны Приленского плато и Олекмо-Чарского плоскогорья // Региональные инженерные и геокриологические исследования. – Якутск: ИМ СО АН СССР, 1985. – 117–127 с.

15. Железняк М.Н. Геотермические условия формирования и существования криолитозоны в западной части Алданской антеклизы. – Якутск: Изд-во СО РАН, 1998. – 91 с.
16. Железняк М.Н. Геотемпературное поле и криолитозона юго-востока Сибирской платформы. – Новосибирск: Наука, 2005. – 227 с.
17. Завадский Ф.Р. Динамика формирования наледей на территории Южной Якутии // Наука и образование – 2013. – № 2. – С. 36–40.
18. Завадский Ф.Р., Максимова Е.Н. Мониторинг подземных вод в Южной Якутии // Мониторинг подземных вод криолитозоны. – Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2002. – С. 149–158
19. Коржуев С.С. Геоморфология долины средней Лены и прилегающих районов. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 150 с.
20. Коржуев С.С. Мерзлотный карст Среднего Приленья и некоторые особенности его проявления // Региональное карстоведение. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – С. 207–220.
21. Мерзлотно-ландшафтная карта Якутской АССР. М-б 1: 2 500 000 / ред. П.И. Мельников. – М.: ГУГК, 1991. – 2 л.
22. Мерзлотные ландшафты Якутии: Пояснительная записка к Мерзлотно-ландшафтной карте Якутской АССР масштаба 1 : 2 500 000 / А.Н. Федоров, Т.А. Ботулу, С.П. Варламов [и др.] – Новосибирск: ГУГК, 1989. – 170 с.
23. Некрасов И.А. Криолитозона северо-востока и юга Сибири и закономерности ее развития. – Якутск: Кн. изд-во, 1976. – 248 с.
24. Геокриологическое картирование Южной Якутии по аэрокосмическим снимкам / И.А. Некрасов, М.С. Делеур, И.В. Дорофеев, С.П. Грибанова // Региональные и криолитологические исследования в Сибири. – Якутск: Институт мерзлотоведения СО АН СССР, 1979. – С. 3–16.
25. Некрасов И.А., Климовский И.В. Вечная мерзлота зоны БАМ. – Новосибирск: Наука, 1978. – 120 с.
26. Байкало-Амурская железнодорожная магистраль. Геокриологическая карта. М-б 1 : 2 500 000 / И.А. Некрасов, И.В. Климовский, С.И. Заболотник [и др.]. – М.: ГУГК, 1979.
27. Некрасов И.А., Заболотник С.И. Геокриологическая карта Амурской области. М-б 2 500 000. Врезка: Сезонное протаивание грунтов, м-б 7 500 000 // Амурская область: атлас. – Вып. I. Природные условия и ресурсы. – Иркутск: ИГСидВ СО АН СССР, 1980. – С. 49–52.
28. Некрасов И.А., Заболотник С.И. Геокриологические условия Амурской области // Региональные геокриологические исследования в Восточной Азии. – Якутск, 1983. – С. 110–124.
29. Оспенников Е.Н. Динамика геокриологических условий болотных массивов юга криолитозоны в голоцене // Материалы третьей конференции геокриологов России. – М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 2005. – С. 203–211.
30. Самсонова В.В., Киприянова Л.Д. Активные карстовые воронки в бассейне Средней Лены // Географические исследования Якутии: история, современность и перспективы: материалы Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию со дня создания Якутского отдела Императорского Русского географич. общ-ва. – Якутск: Сфера, 2014. – С. 149–154.
31. Фотиев С.М. Подземные воды и мерзлые породы Южно-Якутского угленосного бассейна. – М.: Наука, 1965. – 231 с.
32. Южная Якутия. Мерзлотно-геологические и инженерно-геологические условия Алданского горнопромышленного района / под ред. В.А. Кудрявцева. – М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1975. – 444 с.
33. Дальневосточный газ приберегут для «Силы Сибири» [Электронный ресурс]. – URL: <http://gazoprovod-sila-sibiri.ru/dalnevostochnyj-gaz-priberegut-dlya-sily-sibiri/>. (дата обращения: 17.08.2017).
34. Шац М.М. Магистральные газотранспортные системы Сибири (современное состояние и перспективы) // Трубопроводный транспорт (Теория и практика). – М., 2016. – №4. – С. 50–57.
35. Сухов Д. Газпром построит до конца года две трети газопровода «Сила Сибири» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.kp.ru/online/news/2975306/>. (дата обращения: 26.12.2017).
36. Самсонова В.В., Дручина О.Е., Самсонова М.А. Прогнозная оценка мерзлотно-климатических и геокриологических геотехнических рисков строительства и эксплуатации магистральных трубопроводов // Анализ, прогноз и управление природными рисками в современном мире (ГЕОРИСК-2015): материалы 9-й Междунар. науч.-практ. конф. – 2015. – С. 523–530.
37. Nelson F.E., Anisimov O.A., Shiklomanov N.I. Subsidence risk from thawing permafrost // Nature. – 2001. – 410. – P. 889–890. DOI: 10.1038/35073746
38. Nelson F.E., Anisimov O.A., Shiklomanov N.I. Climate change and hazard zonation in the circum-Arctic permafrost regions // Natural Hazard. – 2002. – № 26 (3). – P. 203–225. DOI: 10.1023/A:1015612918401
39. Sazonova T.S., Romanovsky V.E. A model for regional-scale estimation of temporal and spatial variability of active-layer thickness and mean annual ground temperatures // Permafrost and Periglacial Processes. – 2003. – № 14 (2). – С. 125–140. DOI: 10.1002/ppp.449
40. Shur Y., Hinkel K.M., Nelson F.E. The transient layer: implications for geocryology and climate-change science // Permafrost and Periglacial Processes. – 2005. – № 16. – С. 5–17. DOI: 10.1002/ppp.518
41. Anisimov O.A., Kokorev V.A., Ziltcova E.L. Temporal and spatial patterns of modern climatic warming: case study of Northern Eurasia // Climatic Change. – 2013. – Vol. 118, № 3. – P. 871–883. DOI: 10.1007/s10584-013-0697-4

43. Grebenets V.I., Streletskiy D.A., Shiklomanov N.I. Geotechnical safety issues in the cities of Polar Regions // *Geography, Environment, Sustainability*. – 2012. – № 5(3). – P. 104-119. DOI: 10.24057/2071-9388-2012-5-3-104-119

44. Estimating future costs for Alaska public infrastructure at risk from climate change / P.H. Larsen, S. Goldsmith, O. Smith, M.L. Wilson, K. Strzepak, P. Chinowsky, B. Saylor // *Global Environmental Change*. – 2008. – № 18(3). – P. 442–457. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2008.03.005

45. Stephenson S.R., Smith L.C., Agnew J.A. Divergent long-term trajectories of human access to the Arctic // *Nature Climate Change*. – 2011. – № 1(3). – P. 156–160. DOI: 10.1038/nclimate1120

46. Streletskiy D.A., Anisimov O.A., Vasiliev A.A. Permafrost degradation // *Snow and Ice-Related Risks, Hazards and Disasters* / Ed. W. Haeberli, C. Whiteman. – Oxford: Elsevier, 2014. – P. 303–344. DOI: 10.1016/B978-0-12-394849-6.00001-9

47. Streletskiy D.A., Shiklomanov N.I., Hatleberg E. Infrastructure and a changing climate in the Russian Arctic: a geographic impact assessment // *Proceedings of the 10th International Conference on Permafrost*. – 2012. – Vol. 1. – P. 407–412.

48. Streletskiy D.A., Shiklomanov N.I., Nelson F.E. Permafrost, infrastructure, and climate change: a GIS-based landscape approach to geotechnical modeling // *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. – 2012. – № 44(3). – P. 368–380. DOI: 10.1657/1938-4246-44.3.368

References

1. Alekseev V.R. Zakonomernosti rasprostraneniia mnogoletnemerzlykh gornykh porod na iugo-vostoke Sibirskoi platformy [The laws of the proliferation of permafrost rocks in the southeast of the Siberian platform]. *Geokriologicheskie usloviia Zabaikalia i Pribaikalia*, Moscow, Nauka, 1967, pp.117-123.

2. Alekseev V.R. Indikatsionnoe znachenie geobotanicheskikh kart pri izuchenii merzlykh gornykh porod [Indicative value of geobotanical maps in the study of frozen rocks]. *Doklady Instituta geografii Sibiri i Dalnego Vostoka*, 1968, iss.17, pp.20-26.

3. Alekseev V.R. Usloviia formirovaniia i rasprostranenie naledei na iuge Iakutii [Terms of formation and distribution of rains in the south of Yakutia]. *Naledi Sibiri*. Moscow, Nauka, 1969, pp.31-41.

4. Alekseev V.R. Naledi kak faktor dolinnogo morfolitogeneza [Glaze as a factor of valine morpholithogenesis]. *Regionalnaia geomorfologiya Sibiri*, Irkutsk, 1973, pp.99–134.

5. Alekseev V.R. Naledi Leno-Amurskogo mezhdurechya [Glaze of the Leno-Amur Intercontinental]. *Sibirskii geograficheskii sbornik*. Novosibirsk, Nauka, 1975, pp.46-127.

6. Alekseev V.R. Printsipy i metody otsenki naleednoi opasnosti [Principles and methods for assessing the extreme danger]. *Geografiia i prirodnye resursy*, 1980, no.2, pp.117-122.

7. Alekseev V.R. Problemy kartografirovaniia naleednykh iavlenii [Problems of flying mapping]. *Materialy gliatsiologicheskikh issledovaniia*, Moscow, 1988, iss.61, pp.140-142.

8. Alekseev V.R. Landshaftnaia indikatsiia naleednykh iavlenii [Landscape display of flying phenomena]. Novosibirsk, Nauka, 2005, 364 p.

9. Baikalo-Amurskaia zheleznodorozhnaia magistral [Baikal-Amur Railway]. *Geokriologicheskaia karta. Masshtab 1: 2 5000 000*. Moscow, GUGK, 1979, 2 l.

10. Balobaev V.T. O nekotorykh osobennostiakh vykhoda na poverkhnost naleednykh istochnikov v iuzhnoi Iakutii [Some features of the exit to the surface of the ice

springs in southern Yakutia]. *Naledi Sibiri*, Moscow, Nauka, 206 p.

11. Belokrylov I.D., Efimov A.I. Mnogoletnemerzlye porody zony zhelezorudnykh i ugolnykh mestorozhdenii iuzhnoi Iakutii [Perennial frozen species of the zone of iron ore and coal deposits of southern Yakutia]. Moscow, Izdatelstvo AN SSSR, 1960, 75 p.

12. Vasilchuk Iu.K., Vasilchuk A.K., Budantseva N.A., Chizhova Iu.N. Vypuklye bугry puchenii mnogoletnemerzlykh torfiannykh massivov [Convex bumps of perennial frosty peat massifs]. Moscow, Izdatelstvo Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta, 2008, 560 p.

13. *Geokriologiya SSSR. Sredniaia Sibir* [Geocryology of the USSR. Middle Siberia]. Moscow, Izdatelstvo Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta, 383 p.

14. Zhelezniak M.N. Temperaturnoe pole gornykh porod perekhodnoi zony Prilenskogo plato i Olekmo-Charskogo ploskogoria [The temperature field of the rocks of the transition zone of the Prilensky Plateau and the Olekmo-Charsky Plateau]. *Regionalnye inzhenernye i geokriologicheskie issledovaniia*, Iakutsk, IM SO AN SSSR, 1985, 117-127 p.

15. Zhelezniak M.N. Geotermicheskie usloviia formirovaniia i sushchestvovaniia kriolitozony v zapadnoi chasti Aldanskoi anteklizy [Geothermal conditions for the formation and existence of the cryoliton in the western part of the Aldan anteclisus]. Iakutsk, Izdatelstvo SO RAN, 1998, 91 p.

16. Zhelezniak M.N. Geotemperaturnoe pole i kriolitizona iugo-vostoka Sibirskoi platformy [Geotemperature field and cryolithozone of the southeast of the Siberian platform]. Novosibirsk, Nauka, 2005, 227 p.

17. Zavadskii F.R. Dinamika formirovaniia naledei na territorii Iuzhnoi Iakutii [Dynamics of ice formation in the territory of South Yakutia]. *Nauka i obrazovanie*, 2013, no.2, pp.36-40.

18. Zavadskii F.R., Maksimova E.N. Monitoring podzemnykh vod v iuzhnoi Iakutii [Monitoring of groundwater in South Yakutia]. *Monitoring podzemnykh vod kriolitozony*. Iakutsk, IM SO AN SSSR, 2002, pp.149-158.

19. Korzhuev S.S. Geomorfologiya doliny srednei Leny i priliegaiushchikh raionov [Geomorphology of the valley of the middle Lena and adjoining areas]. Moscow, Izdatelstvo AN SSSR, 1959, 150 p.
20. Korzhuev S.S. Merzlotnyi karst Srednego Prilenia i nekotorye osobennosti ego proiavlennia [Permafrost karst of the Middle Priena and some features of its manifestation]. *Regionalnoe karstovedenie*, Moscow, Izdatelstvo AN SSSR, 1961, pp.207-220.
21. Merzlotno-landshaftnaia karta Iakutskoi ASSR [Permafrost-Landscape map of Yakutsk]. Masshtab 1: 2 500 000. Ed. P.I. Melnikov. Moscow, GUGK, 1991, 2 l.
22. Fedorov A.N., Botulu T.A., Varlamov S.P. et al. Merzlotnye landshafty Iakutii [Frozen landscapes of Yakutia]. Poiasnitelnaia zapiska k merzlotno-landshaftnoi karte Iakutskoi ASSR masshtaba 1 : 2 500 000. Novosibirsk, GUGK, 1989, 170 p
23. Nekrasov I.A. Kriolitizona Severo-Vostoka i iuga Sibiri i zakonomernosti ee razvitiia [Cryolithozone of the North-East and the south of Siberia and the laws of its development]. Iakutsk, Knizhnoe izdatelstvo, 1976, 248 p.
24. Nekrasov I.A., Deleur M.S., Dorofeev I.V., Gribanova S.P. Geokriologicheskoe kartirovanie Iuzhnoi Iakutii po aerokosmicheskim snimkam [Geocryological mapping of Southern Yakutia by aerospace photographs]. Regionalnye i kriolitologicheskie issledovaniia v Sibiri. Iakutsk, Institut merzlotovedeniia SO AN SSSR, 1979, pp.3-16.
25. Nekrasov I.A., Klimovskii I.V. Vechnaia merzlota zony bam [Permafrost of the BAM zone]. Novosibirsk, Nauka, 1978, 120 p.
26. Nekrasov I.A., Klimovskii I.V., Zabolotnik S.I. et al. Baikalo-Amurskaia zheleznodorozhnaia magistral. Geokriologicheskaia karta [Baikal-Amur Railway. Geocryological map]. Masshtab 1 : 2 5000 000. Moscow, GUGK, 1979.
27. Nekrasov I.A., Zabolotnik S.I. Geokriologicheskaia karta Amurskoi oblasti. Masshtab 2 500 000. Vrezka: Sezonnnoe protaivanie gruntov. Masshtab 7 500 000 [Geocryological map of the Amur region. Masshtab 2 500 000. Insert: Seasonal thawing of soils, Masshtab 7 500 000]. Amurskaia oblast. Atlas, iss. I. Prirodnye usloviia i resursy. Irkutsk, IGSiDV SO AN SSSR, 1980, pp.49-52.
28. Nekrasov I.A., Zabolotnik S.I. Geokriologicheskie usloviia Amurskoi oblasti [Geocryological conditions of the Amur region]. *Regionalnye geokriologicheskie issledovaniia v Vostochnoi Azii*. Iakutsk, 1983, pp.110-124.
29. Ospennikov E.N. Dinamika geokriologicheskikh uslovii bolotnykh massivov iuga kriolitozony v golotsene [Dynamics of geocryological conditions of the bog masses of the south of the cryolithozone in the Holocene]. *Materialy tretei konferentsii geokriologov Rossii*. Moscow, Izdatelstvo Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta 2005, pp.203-211.
30. Samsonova V.V., Kipriianova L.D. Aktivnye karstovye voronki v basseine Srednei Leny [Active karst craters in the basin of the Middle Lena]. *Geograficheskie issledovaniia Iakutii: istoriia sovremennost i perspektivy: materialy vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posviashchennoi 100-letiiu so dnia sozdaniia Iakutskogo otdela Imperatorskogo Russkogo geograficheskogo obshchestva*. Iakutsk, Sfera, 2014, pp.149-154.
31. Fotiev S.M. Podzemnye vody i merzlye porody Iuzhno-Iakutskogo ughlenosnogo basseina [Underground waters and frozen rocks of the South Yakut coal basin]. Moscow, Nauka, 1965, 231 p.
32. Iuzhnaia Iakutiia. Merzlotno-gidrogeologicheskie i inzhenerogeologicheskie usloviia Aldanskogo gornopromyshlennogo raiona [South Yakutia. Merzlotno-hydrogeological and engineering-geological conditions of the Aldan mining region]. Ed. B.A. Кудрявцев Moscow, Izdatelstvo Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta, 1975, 444 p.
33. Dalnevostochnyi gaz priberegut dlia "Sily Sibiri" [Far East gas will save for "Power of Siberia"], available at: <http://gazoprovod-sila-sibiri.ru/dalnevostochnyj-gaz-priberegut-dlya-sily-sibiri> (accessed: 17 August 2017).
34. Shats M.M. Magistralnye gazotransportnye sistemy Sibiri (sovremennoe sostoianie i perspektivy) [Trunk gas transportation systems of Siberia (current state and prospects)]. *Truboprovodnyi transport (teoriia i praktika)*. Moscow, 2016, no.4, pp.50-57.
35. Krupneishaia sistema transportirovki gaza na vostoke Rossii [The largest gas transportation system in the east of Russia], available at: <http://www.gazprom.ru> (accessed: 17 August 2017).
36. Sukhov D. Gazprom postroit do kontsa goda dve treti gazoprovoda "Sila Sibiri" [Gazprom will build two thirds of the gas pipeline "Strength of Siberia" by the end of the year"], available at: <https://www.kp.ru/online/news/2975306/> (accessed: 17 August 2017).
37. Samsonova V.V., Druchina O.E., Samsonova M.A. Prognoznaia otsenka merzlotno-klimaticheskikh i geokriologicheskikh geotekhnicheskikh riskov stroitelstva i ekspluatatsii magistralnykh truboprovodov [Predictive estimation of permafrost-climatic and geocryological geotechnical risks of construction and operation of trunk pipelines]. *Analiz, prognoz i upravlenie prirodnymi riskami v sovremennom mire (GEORISK-2015) Materialy 9 mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*, 2015, pp.523-530.
38. Nelson F.E., Anisimov O.A., Shiklomanov N.I. Subsidence risk from thawing permafrost. *Nature*, 2001 (410), pp.889-890. DOI: 10.1038/35073746
39. Nelson F.E., Anisimov O.A., Shiklomanov N.I. Climate change and hazard zonation in the circum-Arctic permafrost regions. *Natural Hazards*, 2002, no.26 (3), pp.203-225. DOI: 10.1023/A:1015612918401
40. Sazonova T.S., Romanovsky V.E. A model for regional-scale estimation of temporal and spatial variability of active-layer thickness and mean annual ground temperatures. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2003, no.14 (2), pp.125-140. DOI: 10.1002/ppp.449
41. Shur Y., Hinkel, K.M., Nelson, F.E. The transient layer: implications for geocryology and climate-change

science. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2005, no.16, pp.5-17. DOI: 10.1002/ppp.518

42. Anisimov O.A., Kokorev V.A., Ziltcova E.L. Temporal and spatial patterns of modern climatic warming: case study of Northern Eurasia. *Climatic Change*, 2013, vol.118, no.3. pp.871-883. DOI: 10.1007/s10584-013-0697-4

43. Grebenets V.I., Streletskiy D.A., Shiklomanov N.I. Geotechnical safety issues in the cities of Polar Regions. *Geography, Environment, Sustainability*, 2012, no.5(3), pp.104-119. DOI: 10.24057/2071-9388-2012-5-3-104-119

44. Larsen P.H., Goldsmith S., Smith O., Wilson M.L., Strzepak K., Chinowsky P., Saylor B. Estimating future costs for Alaska public infrastructure at risk from climate change. *Global Environmental Change*, 2008, no.18(3), pp.442-457. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2008.03.005

45. Stephenson S.R., Smith L.C., Agnew J.A. Divergent long-term trajectories of human access to the

Arctic. *Nature Climate Change*, 2011, no.1(3), pp.156-160. DOI: 10.1038/nclimate1120

46. Streletskiy D.A., Anisimov O.A. Vasiliev A.A. Permafrost degradation. *Snow and Ice-Related Risks, Hazards and Disasters*. Ed. W. Haerberli, C. Whiteman. Oxford, Elsevier, 2014, pp.303-344. DOI: 10.1016/B978-0-12-394849-6.00001-9

47. Streletskiy D.A., Shiklomanov N.I., Hatleberg E. Infrastructure and a Changing climate in the Russian Arctic: a geographic impact assessment. *Proceedings of the 10th International Conference on Permafrost*, 2012, vol.1, pp.407-412.

48. Streletskiy D.A., Shiklomanov N.I., Nelson F.E. Permafrost, infrastructure, and climate change: a GIS-based landscape approach to geotechnical modeling. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2012, no.44(3), pp.368-380. DOI: 10.1657/1938-4246-44.3.368

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Железняк М.Н., Сериков С.И., Шац М.М. Эколого-геокриологические и геотехнические условия газотранспортной системы «Сила Сибири» // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2018. – Т.17, №2. – С.189–200. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.2.8

Please cite this article in English as:

Zheleznyak M.N., Serikov S.I., Shatz M.M. Ecological, geocryological and geotechnical conditions of the gas transportation system “Force of Siberia”. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2018, vol.17, no.2, pp.189-200. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.2.8