

Прогноз изменений морфодинамики гидросети Западной Сибири вследствие глобального потепления для оценки проблем газовой отрасли

С. Г. Смолина

Институт системного анализа РАН

Из 47,8 трлн м³ разведанных запасов газа в России 36,9 трлн м³ или 77 % сосредоточено в Западной Сибири [7]. Подавляющее большинство газовых месторождений Западной Сибири находится на территории ее северных районов в зоне распространения вечной мерзлоты — так называемые «северные районы Тюменской области» (СРТО).

Поэтому оправдано то внимание, которое оказывается изучению проблемы влияния изменения мерзлотных условий на функционирование и развитие газовой отрасли. Именно возможное изменение мерзлотных условий вследствие глобального потепления климата и их негативное гипотетическое влияние на добычу и транспортировку газа выдвигается как одна из угроз для экономики России, которая определяется этим потеплением [5, 6].

Для решения этой задачи были использованы методики комплексного геоэкологического прогноза, реализованные в виде Автоматизированной системы регионального экологического прогноза (АСРЭП), разработанные в Институте системного анализа РАН [8–10].

Предварительное исследование проблемы позволило сформулировать вопросы для исследования.

1. Влияние деградации мерзлоты на транспортировку газа. Газопроводы являются протяженными объектами, и в большей степени подвержены влияниям природной среды, чем относительно компактные места добычи газа. При этом проблема обслуживания газопроводов подразделяется на две основные задачи: а) обслуживание переходов через реки и крупные линейные эрозионные формы; б) проблема обслуживания линейных участков газопроводов, вследствие разного влияния

природных факторов на работу газопроводов в рассматриваемых ситуациях.

2. Влияние изменений мерзлотных условий и вообще природной среды на возможности освоения новых месторождений газа.

Характеризуя систему газопроводов в исследуемом регионе, следует отметить, что на территории Тюменской области проложены следующие системы магистральных газопроводов: Уренгой — Новопсков, Ямбург — Центр, Перегребное — Пунга — Ухта, СРТО — Торжок, СРТО — Нечерноземье. Газопроводы проложены, в основном, в одном техническом коридоре, наибольшие отклонения трасс от этого коридора не превышают 15 км. В географическом отношении на участке от месторождений газа до Уральского хребта трассы газопроводов расположены в границах 63–67° с. ш. и 65–74° в. д.

В административном отношении трассы газопроводов расположены на территории Надымского, Пуровского, Приурального районов Ямало-Ненецкого автономного округа и Белоярского, Березовского, Октябрьского районов Ханты-Мансийского автономного округа Тюменской области.

Трассы газопроводов проходят по Западно-Сибирской равнине. До широты компрессорной станции «Надымская» трасса пересекает тундру и лесотундру с прерывистым распространением многолетнемерзлых пород. Далее она проходит по территории северной тайги. Протяженность трасс газопроводов на территории Тюменской области значительна, например, длина трассы СРТО — Торжок равна 1006 км, а длина трассы СРТО — Нечерноземье — 1150 км.

1. Опасные природные явления на территории севера Западной Сибири, влияющие на функционирование газовой промышленности

Территория прохождения газопроводов расчленена значительным числом малых, средних и крупных водотоков, логов, оврагов, подверженных боковой и донной эрозии. Эти процессы значительно усиливаются вследствие следующих факторов: нарушения естественного состояния грунтов при строительстве, подпруживания паводкового стока инженерными сооружениями (насыпи автодорог), расположением подводных или балочных переходов в излучинах. В результате происходит размыв русла и оголение береговых участков дюкеров или подмыв опорных частей оснований балочных переходов. Отступление размываемых берегов вызывает расширение подрусловых таликов, которое способствует «сходу» опор трубопроводов с пойм в русло. Прокладка трубопроводов вблизи берегов озер влечет за собой нарушение равновесного состояния прибрежных грунтов.

Воздействие озерного волнения (абразия) на грунты с разрушенной структурой усиливается, что вызывает рост аварийных ситуаций.

Основными особенностями тундровых рек являются их повышенная извилистость и аномально широкие поймы, являющиеся следствием крайне интенсивной их боковой эрозии.

Поймы, долины и придолинные части междуречий лесотундровых и северотаежных рек заняты преимущественно лесами, существенно регулируемыми поверхностный и внутрипочвенный сток, а также характер прохождения половодий и паводков на реках. Помимо этого, корневые системы деревьев и подлеска обуславливают относительно высокую противозерозионную устойчивость пойменных почвогрунтов. Все это вместе взятое существенно ограничивает боковую эрозию лесотундровых рек в естественных условиях.

В зоне тундры поймы заняты преимущественно тундровыми растительными сообществами, способными противостоять поверхностному смыву, но обладающими низкой противозерозионной способностью по отношению к речному потоку. Более того, моховые и лишайниковые покровы имеют очень низкую регулируемую способность по отношению к поверхностному и внутрипочвенному стокам (коэффициент стока в этих условиях достигает 0,7–0,8), что обуславливает резкие подъемы и спады половодий и паводков на тундровых реках, «залповый» характер их развития и прохождения.

Извилистость рек связана с регрессивной аккумуляцией наносов, что сопровождается подъемом уровня воды в реке, расширением русла и усилением боковой эрозии.

Развитие русел идет различными темпами в периоды с повышенной и пониженной водностью рек. Во влажные периоды наблюдаются усиление глубинной эрозии, вынос наносов вниз по течению, сужение и спрямление русел. В сухие, наоборот, идет заполнение русел наносами, расширение русел, обострение боковой эрозии. Удовлетворительный прогноз руслоформирования невозможен без прогноза влажных и сухих климатических циклов в предстоящие 30 и более лет (расчетный период эксплуатации трубопроводных систем).

Другим фактором, влияющим на интенсивность боковой эрозии и развитие меандр, является поступление наносов с бортов долин. Интенсивность этого процесса только косвенно связана с водностью рек и в значительной степени определяется в условиях тундры и северной тайги солифлюкцией. При потеплении и связанной с этим деградации мерзлоты, солифлюкция усиливается, долины оказываются перегруженными рыхлым материалом, а интенсивность боковой эрозии растет. Возможно, именно с этим, а не с изменением водности рек связан рост боковой эрозии в относительно сухие (и теплые) периоды.

Как правило, трассы газопроводов привязаны к автодорожным магистралям, а поэтому переходы газопроводов через реки находятся вблизи мостовых переходов. Мостовые переходы стесняют паводковый поток и приводят к сильному изменению режима затопления поймы и направления движения вод по пойме и в русле. При выходе сжатого речного потока из отверстия моста ниже последнего образуются растекающиеся косо-струйные течения, которые усиливают размыв берегов русла. Это приводит к деформациям русел, величины которых превышают значения прогнозных деформаций, определяемых в проектах переходов подводных газопроводов.

Боковая эрозия в районах подводных переходов развивается ускоренно по сравнению с деградацией многолетнемерзлых пород (ММП) в зоне теплового влияния газопровода. Отрицательную роль сыграли принятые конструктивные решения, в частности, устройство вертикальных колен, уложенных близ бровок высоких пойм, размываемых в естественных условиях. Тепловыделение от них сформировало глубокие, уходящие ниже русла реки, талики. В этой зоне во время половодий возможны не только интенсивная боковая эрозия, но и оползни (оплывания) грунта.

Определенную роль в обострении процессов переформирования русел рек сыграло рытье траншей в русле при прокладке дюкеров, а также земляные работы по заглублению береговых участков дюкеров в пойму. При проведении строительных работ происходит разрушение структуры откосов на дне русла, что приводит к понижению отметок дна на участке переходов, превышающим значение размыва, определенное проектом.

Формирование динамически устойчивых русел гидромеханизированным способом [3] является достаточно перспективным, как показали результаты обследований состояния переходов подводных газопроводов через р. Обь на трассе Ямбург — Центр. Перспективным мероприятием по стабилизации русловых процессов может оказаться спрямление русел посредством выполнения прохода в шейке меандра, так как это спрямление русла может произойти естественным образом за ряд лет с аномально высокими половодьями.

Подводные переходы в условиях тундр предусматривают заглубление трубопроводов под дно русла ниже линии прогнозируемого размыва. При этом трубы, особенно большого диаметра, становятся своеобразными плотинами на пути подрусловых инфильтрационных водных потоков, существенно трансформируя их скорость и направление. Фильтрующаяся в подрусловом потоке вода оказывает существенное воздействие на подошву перегораживающих русла реки плотин. Оно уменьшает собственный вес сооружений (дюкеров), что приводит к выталкиванию трубопроводов подрусловыми водными потоками. В условиях криолитозоны этот процесс может оказаться гораздо более значительным, чем в южных регионах. Рас-

Таблица 1

Аварии на линейной части магистральных газопроводов Тюменской области за период 1981–1990 гг. (по данным Газнадзора СССР)

Наименование газопровода	Пикет, км трассы	Дата аварии	Потеряно газа, млн м ³
Пунга — Ухта — Грязовец	738,4	26.03.81	10,27
Надым — Пунга	557,0	21.05.83	30,00
Уренгой — Центр	521,8	15.07.85	21,57
Ямбург — Елец	2,0	12.04.87	21,00
Уренгой — Ужгород	614,0	22.05.87	3,30
Уренгой — Челябинск	174,3	20.11.87	20,1
Уренгой — Петровск (пойма р. Обь)	741,0	27.05.88	2,30
Уренгой — Центр	1055,0	25.10.89	17,00

смагивая систему «трубопровод — многолетнемерзлые грунты», образованную различными способами прокладки, можно заключить следующее:

- участки газопроводов, уложенные подземно и полужаглубленно, на суглинистых, супесчаных грунтах и торфах с засыпкой их вечномерзлым грунтом, как правило, обнажены в результате размыва грунта засыпки;
- насыпи, с уложенными в них газопроводами, как правило, не имеют положенного слоя грунта (0,8–1,0 м) над верхней образующей (как в результате их недостаточного объема, так и последующего размыва, оползания и ветровой эрозии).

Результатом этих факторов являются аварии на линейных частях газопроводов (табл. 1).

2. Влияние изменений климата на функционирование газовой промышленности

На функционирование газопроводов влияют как инженерно-технические, так и природные факторы. При этом возможно усиление роли природного фактора в процессе потепления климата за время эксплуатации газопроводов на территории севера Западной Сибири.

Анализ чередования маловодных и многоводных периодов на севере Западной Сибири за период 1930–2000 гг. свидетельствует о существовании в регионе четко выраженных 5-летних циклов. Первая половина каждого десятилетия была повышено влажной, вторая — относительно су-

хой. Исключение составлял период 1950–1960 гг., причем вторая его половина отличалась аномально высоким увлажнением. Это был переход от теплого 25-летнего периода (1930–1955 гг.) к холодному 25-летнему периоду (1955–1980 гг.). В настоящее время идет очередной теплый период, который должен закончиться примерно к 2009 г. Однако очередной цикл потепления усиливается отчетливо выраженной линейной тенденцией к потеплению (7 из 10 самых теплых лет за все время метеонаблюдений пришлось на период с 1990 по 1999 гг.).

В период с 1990 по 2000 гг. все соответствующие процессы, обусловленные потеплением, были гораздо резче выражены, чем это бывало раньше. Весьма возможно, что по аналогии с 1950–1960 гг. десятилетие 2000–2010 гг. окажется многоводным периодом (рост стока для рек Сибири прогнозируется многими моделями). Этот период будет очень сложным и опасным для эксплуатации подводных переходов.

Имеются данные для сравнения аварийности в относительно холодный период 1955–1980 гг. и отрезка теплого периода 1984–1990 гг. Однако, следует учесть процесс «старения» газопроводов за эти годы и при анализе попытаться «снять» влияние данного фактора.

Согласно данным РАО «Газпром» и АК «Транснефть», рост числа дефектных ниток связан с увеличением срока эксплуатации трубопроводов. Удельный вес аварий достигает 85 % для трубопроводов со сроком службы более 15–20 лет. Структура возрастного состава действующих подводных переходов газопроводов следующая: до 10 лет — 15 %; 10–20 лет — 25 %; 20–30 лет — 25 %; 30–40 лет — 25 %; более 40 лет — 7 %.

Таким образом, срок службы 75 % подводных переходов превышает 15 лет. В связи с этим в ближайшие годы следует ожидать резкого увеличения числа отказов, вызванных, в первую очередь, износом трубопроводов.

Общий вывод о преобладании инженерно-технических причин аварий на газопроводах в значительной степени подтверждают данные анализа аварий газопроводов на переходах через реки в период эксплуатации магистральной сети с 1971 по 1990 гг. [2]. Причины отказов следующие: наружная коррозия труб — 22,5 %; заводские дефекты труб — 17,5 %; брак при строительно-монтажных работах — 15 %; брак при сварочных работах — 12,5 %; разрыв труб при их провисании в руслах рек — 12,5 %; внутренняя коррозия — 7,5 %; нарушение правил эксплуатации — 10 %; прочие причины — 2,5 %.

Как видно, вклад отказов вследствие провисания (это обусловлено именно геодинамическими природными факторами) относительно невелик. Однако оценку в 12,5 % можно увеличить, так как именно этот вид отказов служит первопричиной последующих механических повреждений изоляции и стенок труб, и способствует развитию дефектов на оголенных

участках трубопроводов. С. И. Левин [1], обобщив материалы Госгазинспекции, получил, что из 39 случаев аварий на переходах газопроводов с 1965 по 1970 гг. на русловые участки (где геодинамические процессы особенно интенсивные) приходится 23 (59 %). Таким образом, оценки вклада природного фактора в создание проблем для эксплуатации газопроводов колеблются от 12 до 60 %.

По данным института Гипротрубопровод, за последние 20 лет средняя интенсивность отказов составляет 1–1,5 отказа в год на 1000 переходов газопроводов. При этом сюда не включены сведения об отказах на переходах через малые водотоки.

Так, количество отказов на подводных переходах магистральных нефтепроводов в период 1984–1989 гг. составило 2,7 отказа на 1000 переходов [4]. Именно в эти годы наблюдался переход от холодного 25-летнего периода (1955–1980 гг.) к теплomu периоду, сопровождающийся интенсивной циклонической деятельностью. Таким образом, интенсивность отказов в относительно более теплый период возросла примерно в 1,8–2,0 раза. Но ведь и сами газопроводы «постарели» за это время в среднем не менее чем на 10 лет.

В итоге на основе приведенных данных и экспертных оценок представляется все же, что пока вклад собственно природной составляющей был причиной не более 50 % от всех аварий. Эти выводы были сделаны в основном на основе анализа функционирования переходных участков газопроводов (большая часть аварий, не менее 2/3, происходит именно на переходах, и поэтому данная проблема лучше изучена). Вместе с тем, общие тенденции в оценках доли влияния природных изменений на функционирование газопроводов на переходных и линейных участках приблизительно совпадают [4, 11].

Для геоэкологических исследований оценки влияния глобального потепления на функционирование газовой промышленности представляется целесообразным:

- Охарактеризовать экологические, инженерно-геологические и мерзлотные условия с учетом их реальной региональной специфики на всей территории севера Западной Сибири, провести комплексное физико-географическое и геокриологическое районирование.

Для всех регионов, где находятся интересующие нас объекты (промыслы, газопроводы), как ныне действующие, так и в местах предполагаемого освоения, необходимо:

1. Спрогнозировать динамику изменения мерзлотных условий. При этом следует добиться получения численных оценок динамики важнейших характеристик мерзлотных условий, непосредственно влияющих на

функционирование любых хозяйственных объектов [8–10]. К ним относятся глубины сезонно-талого слоя (СТС) и доли площади, занятой сливающейся мерзлотой по всем типам местности в каждом рассматриваемом регионе.

2. Спрогнозировать основные черты морфодинамики гидросети. В частности, на уровне тенденций оценить развитие процессов глубинной эрозии (изменение глубины эрозионного вреза долинной сети по региону) и боковой эрозии (изменение ширины пойм и пояса меандр).
3. Спрогнозировать динамику изменения заозеренности и заболоченности.

При оценках изменений морфодинамики долин и геокриологических условий очень важен комплексный геоэкологический подход, ибо на многие абиотические процессы существеннейшее влияние оказывает биота (отмечено влияние залесенности пойм на возможное развитие эрозионных процессов, на интенсивность склоновых процессов и т. п.).

В качестве базового сценария потепления целесообразно принять сценарий оптимума голоцена, как наиболее вероятный. Вместе с тем необходимо изучить влияние нескольких сценариев и оценить, насколько могут отличаться тенденции изменения природной среды от базового сценария. Решить все поставленные задачи с учетом сделанных замечаний можно только с использованием количественных методов комплексного геоэкологического прогноза.

3. Общая характеристика геоэкологических и геокриологических условий севера Западной Сибири и прогноз их изменений в результате глобального потепления

Исследование общей экологической и инженерно-геологической обстановки на севере Западной Сибири является весьма объемной задачей, требующей полевых изысканий, привлечения аэрокосмических методов, долговременных дорогостоящих и масштабных исследований. Такие данные были предоставлены в рамках совместных работ сотрудниками кафедры мерзловедения Географического факультета МГУ. Работы сводились к решению следующих задач.

1. Было проведено комплексное геоэкологическое, инженерно-геологическое и геокриологическое районирование территории севера Западной Сибири в масштабе 1:2500000. При этом учитывались ландшафтные, геоморфологические, гидрогеологические и мерзлотные условия.
2. Для каждого выделенного района по всем типам местности (водоразделам, болотам, склонам и т. п.) составлялись описания почв, раститель-

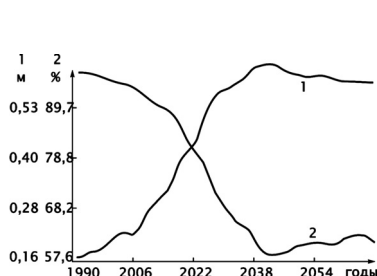


Рис. 2. Динамика озер и болот в Северо-Ямальском регионе вследствие глобального потепления климата: 1 — заозеренность; 2 — доля общей площади региона

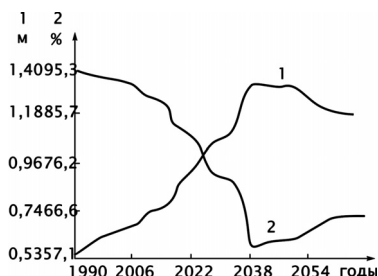


Рис. 3. Динамика мерзлоты на болотах в Северо-Ямальском регионе вследствие глобального потепления климата: 1 — глубина мерзлоты; 2 — доля площади мерзлоты в данном типе местности

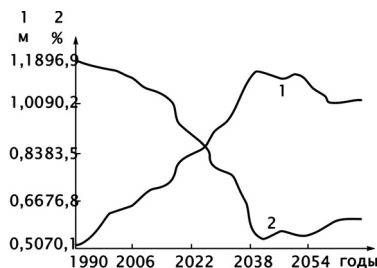


Рис. 4. Динамика мерзлоты на водоразделах в Северо-Ямальском регионе вследствие глобального потепления климата: 1 — глубина мерзлоты; 2 — доля площади мерзлоты в данном типе местности

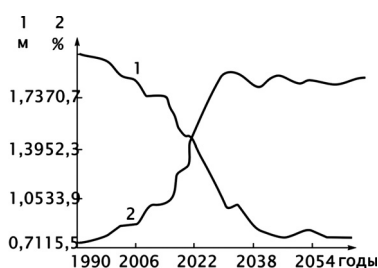


Рис. 5. Динамика мерзлоты на склонах северной экспозиции в Северо-Ямальском регионе вследствие глобального потепления климата: 1 — глубина мерзлоты; 2 — доля площади мерзлоты в данном типе местности

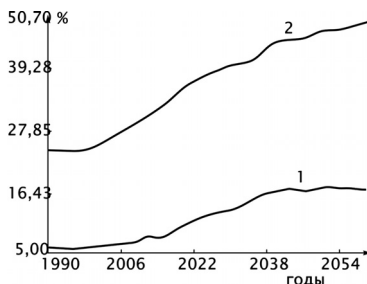


Рис. 6. Динамика мерзлоты на склонах южной экспозиции в Северо-Ямальском регионе вследствие глобального потепления климата: 1 — глубина мерзлоты; 2 — доля площади мерзлоты в данном типе местности

Таблица 2
Характеристики мерзлотных условий п-ова Ямал (номера районов соответствуют их нумерации в базе данных)

№ райо-нов	Глубина СТС/СМС (Верхняя строка —СТС, нижняя строка — СМС), м. Минеральные группы на водоразделах суглинки пески торф				Площадь сливающихся ММП, (верхняя строка — дренажные междуречья, нижняя строка — болота), %	Общая характеристика криогенного строения				Глубина залегания подземных льдов в ММП, м (верхняя строка — кровля, нижняя строка — подошва)							Объемная льдистость верхних 10-20 м разре-за, %				Место-поло-жение района
	2	3	4			5	Криоген-ные тек-туры, в т. ч. лед-цемент	ГЖЛ	8	9	10	11	12	13	14	15					
701	0,4-0,6 Нет	0,8-1 Нет	0,2-0,4 Нет		100 100	Сингенети-ческие: слоисто-сетчатые до глубины 10-20 м	Синген.		Инъ-екц.	0,2-1,0 10-60	0,5-5 2,0-8,0	5-25 7-35	0,2-0,6 5-15	40-45 55-60	35-40 север 5-10 юг	Ямал					
702	0,4-0,6 Нет	0,8-1,0 Нет	0,2-0,4 Нет		100 100	Сингенети-ческие: слоистые, сетчатые до глубины 10-20 м	Синген.	Нет	Инъ-екц.	0,2-1,0 10-60	0,5-5 2,0-8,0	Нет	0,2-0,6 5-15	40-45 55-60	35-40	Ямал					
703	0,8-1,0 Нет	1,0-1,2 Нет	0,3-0,5 Нет		100 100	Синизиге-нетические: слоистые, сетчатые	Синген., Эпиген.	Инъекц.-сетре-гац.	Редко	0,3-1,2 15-30	0,5-1,5 2,5-3	5-10 до 20-30 10-40	Нет	35-40 45-60	3-5	Ямал					
704	0,8-1,0 Нет	1,0-2,0 Нет	0,2-0,4 Нет		100 100	Сингенети-ческие: слоистые, сетчатые	Синген.	Редко	Инъ-екц.	0,2-1,0 10-60	0,2-1,0 12-17	Нет	0,2-0,4 5-10	35-55 50-65	20-30	Ямал					

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
705	0,6–0,8 нет	0,8–1,0 Нет	0,4–0,6 Нет	100 100	Синген. Запад, эпигенетический, слоистые, сетчатые	Синген.	Инъекц.-сегрегация	Инъекц.-сегрегация	0,4–0,6 10–50	0,4–0,8 10–13	1–15 15–30	0,4–0,6 от 2–3 до 10–15	30–40 35–45	От 5–7 до 20	Ямал
727	0,6–0,8 Нет	1,2–1,4 Нет	0,4–0,6 Нет	100 100	Син- и эпигенетические: слоистые, сетчатые, массивные	Синген.	Инъекц.-сегрегация	Редко	0,4–1,4 10–50	0,4–0,6 8,5–10,5	3–6 8–12	Нет	45–55 60–85	13–14	Ямал
707	0,8–1,0 Нет	1,5–2,0 Нет	0,6–0,8 Нет	100 100	Эпи- и сингенетические: слоистые, массивные	Эпиген.	Редко	Инъекц.-сегрегация	0,6–2,0 10–40	0,4–0,6 1,5–2,0	Нет	0,4–1,0 8–12	30–40 40–55	До 5	Ямал
714	0,6–1,0 Нет	1,3–1,5 Нет	0,6–0,8 Нет	95 100	Эпи- и сингенетические: массивные, слоистые	Эпиген.	Нет	Инъекц.-сегрегация	0,6–1,5 10–40	0,4–0,6 1,5–2,0	Нет	0,4–1,0 8–12	20–45 50–65	До 5	Ямал

Принятые в таблице и дальнейшем тексте описания аббревиатуры:

СТС — сезонотальный слой

СМС — сезонноморфный слой

ПЖЛ — полигонально-жильный лед

ПЛ — пластовый лед

БП — бугры пучения

ММП — многолетнемерзлые породы

Инъекц. — инъекционные

(текстуры или льды бугров пучения)

Сегрегация — сегрегационные

(текстуры или льды бугров пучения)

Синген. — сингенетические (ММП)

Эпиген. — эпигенетические (ММП)

Погребен. — погребенные (пластовые льды)

Миграция — миграционные (текстуры)

Миграц.-инъекц. — миграционно-инъекционные (текстуры)

Атаксит. — атакситовые (текстуры)

ности, морфологии гидросети, гидрогеологии, давались характеристики сезонно-талого слоя, глубины кровли и подошвы залежеобразующих льдов, объемной макрольдистости и общее описание специфики залежеобразующих льдов.

3. Все упомянутые характеристики оценивались количественно и заносились в базу данных, состыкованную с системой комплексного геоэкологического прогноза в единый программно-вычислительный комплекс. В процессе заполнения базы данных проводились методические вычислительные эксперименты с целью уточнения различных характеристик и проверки их на непротиворечивость.

В итоге территория севера Западной Сибири была разделена на 78 относительно однородных ландшафтно-экологических регионов. Карта районирования представлена на рис. 1. В качестве иллюстрации степени детальности описания основных черт этих регионов ниже приводятся данные по п-ову Ямал. Далее по всем выделенным регионам делались комплексные прогнозы динамики изменения геоэкологических условий (включая мерзлотные условия, структуру земельного фонда, морфодинамику долинной сети и т. п.). Результаты прогнозов на примере некоторых характеристик для Северо-Ямальского региона приведены на рис. 2–6.

4. Проблемы транспортировки газа и их возможное обострение в связи с изменениями природной среды вследствие глобального потепления

Одной из главных угроз для безаварийного функционирования участков перехода газопроводов через реки является боковая эрозия. Ее интенсивность, помимо всего прочего, зависит от гидрологического режима и в наибольшей степени проявляется на реках со свободным меандрированием. В табл. 3 указаны большие реки, пересекаемые системой газопроводов, с указанием типа руслового процесса на участке перехода.

Анализ обследований подводных переходов показывает, что к числу рек, наиболее подверженных опасным размывам в створах переходов, относятся реки Надым, Казым, Лонг-Юган, Пр. Хетта, Ныда, Сарум и Амня. Эти реки расположены в пределах 744, 745, 758, 759, 761 регионов (рис. 1).

Из данных табл. 3 следует, что в разряд наиболее опасных попали реки со свободным меандрированием. Всего из 249 переходов через средние и крупные реки севера Тюменской области около 200 переходов построены через реки с типом руслового процесса, представляющим свободное меандрирование.

Таблица 3

Большие реки, пересекаемые системой газопроводов

№п/п	Река	Тип руслового процесса	Число ниток
1	Надым	Осередковый	27
2	Казым	Свободное меандрирование	33
3	Лонг — Юган	Свободное меандрирование	13
4	Пр. Хетта	Свободное меандрирование	17
5	Ныда	Осередковый	10
6	Амня	Свободное меандрирование	19
7	Сарум	Свободное меандрирование	5
8	Лозьва	Побочной	14
9	Б. Ярудей	Свободное меандрирование	3
10	Ехам-Ехам	Свободное меандрирование	3
11	Ун-Лыньюган	Свободное меандрирование	3
12	Лыхма	Свободное меандрирование	7
13	Пелым	Побочной	4
14	С. Сосьва	Свободное меандрирование	3
15	Сосьва	Побочной	3
16	М. Сосьва	Побочной	3

Потепление климата на некоторых из них возможно и вызовет незначительное уменьшение годового стока, однако, скорее всего, сток на значительной части территории севера Западной Сибири может даже возрасти. Несомненно, будет наблюдаться заполнение русел наносами, их расширение, обострение боковой эрозии, усиление меандрирования в связи с изменениями климата. Но произойдет это как вследствие деградации мерзлоты на склонах долинной сети и резкой интенсификации солифлюкции, из-за чего долины окажутся переполненными наносами. Иллюстрацией подобных тенденций может служить прогноз расширения пойм в результате потепления климата в 759 районе (рис. 7). При различных допущениях о темпах потепления и уточнениях оценок характеристик подземных льдов, сроки наступления финальной фазы деградации мерзлоты и масштабы расширения пойм несколько меняются (сроки начала реализации соответствующих процессов — на 2–3 года, а амплитуды расширения пойм — на 2–4 %). Однако общие результаты прогноза остаются неизменными.

Следует особо подчеркнуть, что характер тенденций эволюции морфодинамики долинной сети в упомянутых регионах остается неизменным,

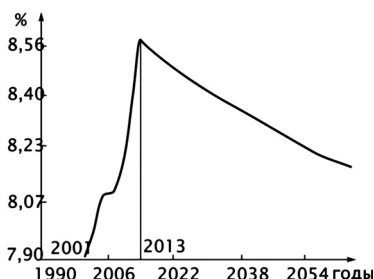


Рис. 7. Расширение пойм вследствие боковой эрозии в Верхне-Пурском регионе вследствие глобального потепления климата: доля площади мерзлоты в данном типе местности

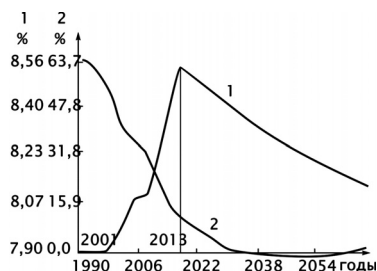


Рис. 8. Расширение пойм и деградация мерзлоты на склонах южной экспозиции в Верхне-Пурском регионе вследствие глобального потепления климата. 1 — доля площади пойм в регионе; 2 — доля площади мерзлоты в данном типе местности

в том числе и в широком диапазоне допущений о прогнозе осадков и стока. В случае такого увеличения осадков, которое обеспечивает неизменность или даже некоторый рост стока на фоне потепления, на меандрирующих реках будет отмечено усиление боковой эрозии, обусловленное деградацией мерзлоты на склонах и переполнением долинной сети рыхлым материалом.

Именно на такую причину интенсификации боковой эрозии указывает характер графика рис. 7, из которого видно, что расширение пояса меандр носит временный характер и совпадает с периодом усиленной деградации мерзлоты на склонах (рис. 8). При любых допущениях оценки расширения пояса меандр будут составлять не менее 3–5 % от имеющейся ныне ширины за 10 лет (для крупных рек — это десятки и сотни метров).

Последствия различных вариантов реализации глобального потепления сравнивались с последствиями начального периода потепления в 1980–1990 гг. Сравнения показали, что интенсификация соответствующих процессов в период 2005–2015 гг. по сравнению с периодом 1980–1990 гг. ожидается выше, чем это наблюдалось при сравнении периодов 1950–1980 гг. и 1984–1990 гг. То есть, упоминаемое ранее увеличение аварийности при потеплении в 1984–1990 гг. в 1,8 раз будет превышено.

Хотя линейные экстраполяции не вполне корректны, по экспертным оценкам, прогнозируемая дальнейшая интенсификация морфодинамических процессов, связанных с усилением боковой эрозии, вызовет увеличение аварийности на переходах газопроводов через реки еще в 2,0–2,5 раза по сравнению с периодом 1990–2000 гг.

При обосновании ущерба, вызванного интенсификацией опасных природных процессов на линейной части системы магистральных газопрово-

дов (термокарстовые, термоэрозионные, пучения, солифлюкции, обваль-но-осыпные, водно-эрозионные процессы), и обосновании выбора защитных мероприятий на трассах использовался анализ природных условий, а также результаты прогноза развития неблагоприятных геодинамических процессов вследствие потепления климата.

Технический коридор, в пределах которого расположены трассы газопроводов, расположен в пределах 726, 731, 744, 745, 758, 759, 761, 762, 764, 765, 767 регионов карты-схемы (рис. 1).

Напомним, что для всех этих регионов нами были сделаны прогнозы изменений геоэкологических и геокриологических условий (рис. 2–8).

На основе проведенных исследований можно охарактеризовать основные черты динамики мерзлотных условий по трассе технического коридора газопроводов СРТО, разбив ее на ряд зон, близким образом реагирующих на потепление (табл. 4).

Напомним, что меньшие значения глубины СТС и, соответственно, большие значения доли площади сливающейся мерзлоты характеризуют ситуацию середины 1990-х гг., а большие значения глубины СТС и меньшие значения доли площади сливающейся мерзлоты характеризуют ситуацию, прогнозируемую к 2020–2030 гг.

Трактуя геокриологические изменения с точки зрения их влияния на работу газопроводов, следует также учитывать, что глубина 1 м является глубиной верхней образующей трубы, а глубина 2,5 м — глубиной нижней образующей. Поэтому превышение глубины СТС в 1 м означает, что соответствующие участки трубопровода будут частично находиться в зоне действия процессов сезонного промерзания-оттаивания, а превышение 2,5 м (если только при этом мерзлота не исчезла окончательно) будет означать, что труба может «зависнуть».

Обобщая влияние потепления на трассу газопроводов СРТО в целом, следует отметить, что оно будет проявляться в усилении процессов пучения, просадки, локальному увеличению обводненности, развитию процессов, уменьшающих устойчивость склонов — солифлюкции, эрозии и оползневых процессов. Все они в разном сочетании будут присутствовать в районах (табл. 4), и степень их относительной интенсификации можно оценить, опираясь на прогнозы динамики мерзлоты.

Далее была проведена оценка возможностей прогноза больших аварий в результате развития негативных вышеупомянутых явлений с помощью методов оценки риска. Понятие риск, трактуемое как вероятность появления негативных природных процессов вследствие потепления климата, может быть охарактеризовано применительно к рассматриваемой трассе следующим образом. В пределах отрезка трассы L комплексы прогнозируемых природных процессов $(n_1, n_2, \dots, n_i)$, занимающие участки

трассы $(l_1, l_2 \dots l_n)$, включают в себя неблагоприятные природные процессы (криогенные, эрозионно-склоновые, заболачивания) с вероятностями $P_1, P_2, \dots, P_n$.

Вероятность появления в пределах участка L неблагоприятных процессов R равна:

$$R = \sum_{k=1}^n \frac{l_k}{L} \sum_{i=1}^{n_k} p_{n_i} \quad (1)$$

Величины p_{n_i} представляют собой отношения площади с n_i -м неблагоприятным природным процессом к общей площади данного региона.

В табл. 5 приведены вероятности проявления неблагоприятных природных процессов в различных ландшафтно-экологических условиях, присутствующих в СРТО, откуда следует, что:

- вся территория, по которой проложена трасса, относится к зоне повышенного экологического риска;
- наивысшая степень риска приурочена к горным тундрам и лесным долинам малых рек лесной зоны.

В целом обнаруживается тенденция снижения степени риска при прослеживании трассы с северо-востока на юго-запад (от 0,54–0,60 поражения площади полосы отвода негативными процессами до 0,3–0,4). Наивысшая вероятность (55–61 %) неблагоприятных следствий потепления климата отмечена для Северо-Надымско-Пуровской и Южно-Надымско-Пуровской лесотундровых провинций (100–500 км трассы Ямбурга, 0–160 км трассы от Уренгоя). Прилегающие к Ямбургскому ГКМ участки, расположенные в пределах Тазовской южнотундровой провинции (0–100 км трассы от Ямбурга), также сложны — степень риска составляет 54 %. При пересечении границы

Надымской северотаежной провинции (160 км трассы от Уренгоя) риск уменьшается до 45 %. Несколько увеличивается риск в пределах Полуйской северотаежной провинции (до 53 %). В среднетаежном Белогорье риск равен 50 % из-за повышения вероятности развития эрозии.

Сложность условий невелика в интервале 700–750 км по трассе от Уренгоя, соответствующем долине р. Обь (34 %).

Северо-Сосьвинская среднетаежная провинция может считаться сложным районом (50 %), как и Уральская горная (46 %).

Производительность системы газопроводов Тюменской области составляет 290 млрд м³/год. Среднегодовая вероятность аварийной остановки системы из-за усиления опасных природных процессов в результате потепления составляет 45–50 %. Следовательно, недоподача газа (включая

Таблица 4

 Районирование трассы магистральных газопроводов
 СРТО — ТОРЖОК и СРТО — НЕЧЕРНОЗЕМЬЕ

№	Природная характеристика района	Протяженность участка, км	Пределы изменения			
			Заозеренности, %	Глубины СТС, м		
				Болота площадь, %	Водоразделы площадь, %	Склоны южной экспозиции площадь, %
1	Тазовская южнотундровая провинция морских равнин с преимущественно ерниковыми тундрами на тундровых глеевых и болотно-тундровых почвах	0–100 (Ямбург)	8–10	<u>0,4–0,7</u> 43–83	<u>0,8–2,1</u> 83–26	<u>1–2,2</u> 7–69
2	Северо-Надымско-Пуровская лесотундровая провинция расчленения морских равнин с лишайниковыми рединами на тундровых элювиально-глеевых почвах. В центральных частях междуречий — обилие озер и мерзлых плоскобугристых болот	100–200	8–10	<u>0,4–0,7</u> 43–83	<u>0,8–2,1</u> 83–26	<u>1–2,2</u> 7–69
3	Южно-Надымско-Пуровская северотаежная провинция морских равнин, сильно заозеренных и заболоченных, с сосновыми и березо-сосново-лишайниковыми зеленомошными лесами на подзолисто-элювиально-глееватых почвах. Большие площади заняты плоскобугристыми торфяниками и грядово-мочажинными болотами	200–277,5 (Соединение с трассой Уренгой-Петровск)	8–10	<u>0,4–0,7</u> 43–83	<u>0,8–2,1</u> 83–26	<u>1–2,2</u> 7–69

Продолжение таблицы 4

№	Природная характеристика района	Протяженность участка, км	Пределы изменения			
			Заозеренности, %	Глубины СТС, м		
				Болота площадь, %	Водоразделы площадь, %	Склоны южной экспозиции площадь, %
4	Надымская северотаежная провинция низменных сильно заболоченных бассейнов рек Надым и Казым с комплексом крупнобугристых мерзлых торфяников и осоково-пушицево-моховых болот, с фрагментами малопродуктивных темнохвойных лесов с примесью березы и лиственницы по берегам рек	200–250	6–17	$\frac{0,5-0,7}{50-77}$	$\frac{1-2,4}{26-83}$	$\frac{1-2,3}{7-69}$
5	Полуйская северотаежная провинция возвышенных холмистых равнин с темнохвойными и смешанными зеленомошными лесами на аллювиально-железистых подзолах. На пониженных участках — массивы крупнобугристых торфяников	250–350	6–17	$\frac{0,5-0,7}{50-77}$	$\frac{1-2,4}{26-83}$	$\frac{1-2,3}{7-69}$
6	Надымская северо-таежная провинция (см. выше)	400–600	5–40	$\frac{0,8-1,0}{19-49}$	$\frac{1-2,4}{26-83}$	$\frac{1-2,3}{7-69}$
7	Белогорская среднетаежная провинция хорошо дренированной холмистой возвышенности с лиственнично-сосновыми и кедрово-лишайниковыми лесами на аллювиально-гумусовых подзолах и подзолисто-аллювиально-глеевых почвах	650–700	—	$\frac{0,9-1,8}{0-25}$	—	—

Окончание таблицы 4

№	Природная характеристика района	Протяженность участка, км	Пределы изменения			
			Заозеренности, %	Глубины СТС, м		
				Болота площадь, %	Водоразделы площадь, %	Склоны южной экспозиции площадь, %
8	Обская таежная провинция пойм с обилием протоков, островов, стариц, занятая ивняками и разнотравно-злаковыми лугами	700–750	–	$\frac{0,9-1,8}{0-25}$		
9	Северо-Сосьвинская среднетаежная провинция куполовидной возвышенности с лиственнично-кедровыми и еловыми лесами на подзолисто-аллювиальных гумусовых глееватых почвах	750–900	–	$\frac{0,9-1,8}{0-25}$		
10	Уральская горная и предгорная провинция о среднетаежной, горно-таежной и фрагментами горно-тундровой растительности	950–1006	–	–	$\frac{0,7-1,3}{50-85}$	$\frac{0,9-2,1}{0-66}$

Таблица 5

Вероятности проявления неблагоприятных природных процессов в различных ландшафтах СРТО

№	Природные характеристики	Вероятность Pn, %
1	Тундры на многолетнемерзлых песках и супесях, суглинках и глинах	60–70
2	Лесотундры на многолетнемерзлых суглинках и глинах	50–55
3	Тундровые многолетнемерзлые торфяники	10
4	Долины рек с многолетней мерзлотой	70
5	Горные тундры	80
6	Верховые болота	40

Окончание таблицы 5

№	Природные характеристики	Вероятность Рп, %
7	Низменные болота	20
8	Лесные долины малых рек лесной зоны	80
9	Луговые долины больших рек лесной зоны	50
10	Тайга на склонах, сложенных песками	15

его потери) составит в случае несвоевременного проведения инженерных защитных мероприятий 130–140 млрд м³/год.

Подобные оценки являются максимальными и будут характеризовать ситуацию только в том случае, если все опасные природные процессы с упомянутой вероятностью реализуются, а предварительные упреждающие мероприятия не будут проведены.

Стоит еще раз подчеркнуть, что игнорирование или недооценка влияния глобального потепления на работу газовой отрасли в северных районах Тюменской области в самом неблагоприятном случае может привести к потере почти половины добываемого в регионе газа.

5. Выводы

1. Влияние глобального потепления на функционирование газовой отрасли, несомненно, имеет место, и это влияние негативное. Оно обусловлено деградацией мерзлоты при потеплении климата и соответствующей активизацией геодинамических процессов, осложняющих работу, прежде всего, газопроводов.
2. Влияние деградация мерзлоты на работу газопроводов в основном опосредованное, через активизацию боковой эрозии при переполнении долинной сети материалом, вызванной быстрой солифлюкцией, в первую очередь, на участках переходов газопроводов через реки.
3. Деградация мерзлоты влияет и на линейные части газопроводов. Однако, в целом рост аварийности на линейных участках на начальных этапах потепления меньше, чем рост аварийности на переходных участках.
4. Потепление климата не вызовет катастрофических последствий для уже работающих объектов газовой отрасли. Только полное игнорирование глобального потепления и неприятие никаких компенсационных мероприятий вплоть до 2010 г. может создать реальные проблемы для газовой отрасли и снизить подачу газа из Западной Сибири в 2 раза после 2011 года.

Литература

1. *Левин С. И.* Подводные трубопроводы. М.: Недра, 1970. 288 с.
2. *Мальцев В. С.* Ремонт подводных трубопроводов // Материалы совещания «Создание, модификация технических средств для приборного обследования подводных переходов, рассмотрение и выбор прогрессивных технологий ремонта и реконструкции подводных переходов» (Самара, февраль, 1994). ИРЦ «Газпром». 1994. С. 60–68.
3. *Медведев С. С., Хороших А. Б., Щербаков А. О.* и др. Способ выправления русла реки с защитой его от размыва. Авторское свидетельство. (19) R4 (11) 2108424 (13) C1.
4. *Нефедова Н. Ф., Махартова Н. П.* Некоторые вопросы состояния эксплуатационной надежности подводных переходов // Сб. материалов «Обмен опытом при производстве подводно-технических работ, связанных с ремонтом и эксплуатацией подводных переходов магистральных газопроводов». ВНИЖ Газпром. 1989. С. 22–25.
5. Оценки экологических и социально-экономических последствий изменения климата. Доклад Рабочей группы II МГИЭК. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 250 с.
6. Оценки экологических и социально-экономических последствий изменения климата. Дополнение к докладу Рабочей группы II МГИЭК. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 127 с.
7. Стратегия развития газовой промышленности России / Под ред. Р. И. Вяхирева и А. А. Макарова. М.: Энергоатомиздат, 1997. 343 с.
8. *Хомяков П. М., Коницев В. Н., Пегов С. А., Смолина С. Г., Хомяков Д. М.* Моделирование динамики геосистем регионального уровня. М.: Изд-во МГУ, 2000. 382 с.
9. *Хомяков П. М., Смолина С. Г.* и др. Влияние глобальных изменений климата на функционирование экономики и здоровье населения России. М.: URSS, 2005. 424 с.
10. *Хомяков П. М., Смолина С. Г.* и др. Геоэкологическое моделирование для целей управления природопользованием в условиях изменений природной среды и климата. М.: URSS, 2002. 400 с.
11. *Черняев К. В., Черняев Б. Д., Бойков И. Р.* и др. Диагностирование технического состояния линейной части магистральных нефтепроводов на основе внутритрубной дефектоскопии. М.: Изд-во АО «Диаскан», 1996. 66 с.