

О.А. Анисимов¹, Д.А. Стрелецкий²

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ ПРИ ТАЯНИИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

GEOCRYOLOGICAL HAZARDS OF THAWING PERMAFROST

Климатообусловленные изменения многолетнемерзлых грунтов ведут к уменьшению их несущей способности и способствуют развитию ряда деструктивных геоморфологических процессов. Это увеличивает геокриологические риски для инженерной инфраструктуры и экосистем криолитозоны. В статье рассматриваются современная динамика факторов, влияющих на устойчивость городской инфраструктуры в криолитозоне, и дается прогноз геокриологических рисков на середину XXI века. Прогноз основан на количественном индексе, расчет которого осуществляется с помощью вероятностно-стохастической модели многолетнемерзлых грунтов по оптимальной климатической проекции. Индекс используется для построения прогностических карт геокриологических рисков в Арктической зоне России. Оценивается количество городов и поселков, а также численность населения на территориях, характеризующихся различным уровнем геокриологических рисков. Предлагаются принципы адаптации инфраструктуры к ожидаемым изменениям климата и многолетнемерзлых грунтов.

Ключевые слова: изменение климата, криолитозона, геокриологические риски, моделирование, прогноз.

Climate-induced changes of permafrost lead to the decrease of the bearing capacity of the frozen ground and are associated with several destructive geomorphological processes. Such changes increase the permafrost risks for the infrastructure and ecosystems. The paper addresses the modern dynamics of the factors governing the safety conditions of the urban infrastructure in permafrost regions, and projected for the mid-21st century permafrost risks. Permafrost risks are evaluated using the numerical index, which is calculated by means of probabilistic model forced by optimal climatic projection. Results are used for constructing predictive maps of permafrost hazards in the Russian Arctic. We identify the cities and settlements in the high risk zone and evaluate the amount of the population affected by permafrost hazards in different regions of the Russian Arctic. Ultimately, we suggest the

1 Анисимов Олег Александрович - заведующий отделом исследований изменений климата Государственного гидрологического института, доктор географических наук, г. Санкт-Петербург. E-mail: oleg@oa7661.spb.edu

2 Стрелецкий Дмитрий Андреевич - профессор Географического факультета Университета Дж. Вашингтона, PhD, г. Вашингтон, Округ Колумбия. E-mail: strelets@gwu.edu

Streletskiy D.A. - Professor in the Geography department at George Washington University, PhD, Washington DC.

principles of the adaptation strategy that accounts for the economical effect of the projected climate and permafrost changes.

Keywords: *climate change, permafrost regions, permafrost risks, modeling, projection.*

Изменение климата вызывает увеличение температуры многолетнемерзлых грунтов (ММГ), уменьшение их прочностных свойств и интенсификацию ряда деструктивных геокриологических процессов, таких как термокараст, солифлюкция, неравномерные просадки почвы и т.п. Прогнозы указывают на то, что эти изменения будут усиливаться в последующие несколько десятилетий, в результате чего возникают и со временем увеличиваются риски повреждения и разрушения сооружений и транспортных коммуникаций в криолитозоне [6, 7]. В научной литературе приведены многочисленные примеры того, что эти процессы уже имеют место, обзор публикаций дан в работе [19]. В инженерной геокриологии разработаны эффективные методы стабилизации фундаментов и дорожных покрытий при деградации ММГ, прежде всего, термосифоны и вентиляционные устройства, применение которых позволяет в течение некоторого времени, часто сопоставимого со сроком эксплуатации сооружений, компенсировать воздействие изменения климата [9]. Стабилизирующие технологии сопряжены со значительными расходами, и их повсеместное применение экономически нецелесообразно. По этой причине сопоставительные оценки несущей способности фундаментов и оснований инженерных сооружений в различных регионах Крайнего Севера в условиях современных и ожидаемых в будущем изменений климата имеют высокую актуальность.

В контексте ресурсоориентированного развития экономики Арктических регионов России особенно важен вопрос об устойчивости инфраструктуры топливно-энергетического комплекса, которая включает в себя разветвленную сеть трубопроводов. Проведенные в США исследования показали, что для поддержания нормативной работоспособности существующей на Аляске инфраструктуры в период до 2030 г. потребуется от 3,6 до 6,1 млрд. долларов, и около 7,6 млрд. в период до 2080 г. [15]. Хотя подобные перспективные оценки для России отсутствуют, можно предположить, что с учетом значительно большего числа инфраструктурных объектов в криолитозоне расходы на их поддержание также будут более высокими. Уже сейчас только лишь на обслуживание трубопроводов в районах распространения ММГ в России ежегодно расходуется около 55 миллиардов рублей [20].

Устойчивость сооружений в криолитозоне зависит, главным образом, от того, находится ли температура грунта в пределах диапазона, заложенного при их проектировании. Согласно строительным нормам и правилам (СНиП), он рассчитывается по средним многолетним значениям климатических параметров. В расчет закладывается коэффициент запаса, который для большинства сооружений в России и ранее в СССР не превышает 30-40 %. С ростом температуры грунта его несущая способность неминуемо уменьшается, и задача состоит в том, чтобы определить, когда теплеение достигнет предела, за которым он не в состоянии будет выдержать вес стоящих на нем сооружений.

Особую группу транспортных сооружений составляют зимние дороги (зимники) и ледовые переправы, период эксплуатации которых сокращается с развитием кли-

матического потепления. Притом, что таяние ММГ непосредственно не влияет на эти сооружения, состояние и температура грунтов определяют возможность и стоимость их замены круглогодичными дорогами и стационарными мостами. Принято считать, что такие сооружения обслуживают, главным образом, небольшие удаленные арктические поселки, однако в действительности это не так. Якутск, интенсивно развивающийся город с населением более 300 тысяч человек, расположен на левом берегу реки Лены, и из-за отсутствия постоянно действующего моста несколько месяцев в году изолирован от железнодорожных узлов в Нерюнгри и Алдане. Большую часть года снабжение города осуществляется, помимо крайне дорогостоящего авиационного, автомобильным транспортом с использованием ледовой или паромной переправы (Рис. 1). Таким образом, проблема зимников и ледовых переправ напрямую затрагивает устойчивое развитие городов Арктики.



Рис. 1. Различие транспортных условий в зимний (А) и летний (Б) периоды в районах с использованием зимних дорог и ледовых/паромных переправ.

На фотографиях показаны зимняя дорога и переправы через р. Лена в районе Якутска, а также фрагмент трассы «Лена» в летний период

Таяние ММГ сопряжено с экологическими рисками, такими, как гибель леса, заболачивание и другие виды деградации земель. Притом, что все перечисленные процессы в криолитозоне определяются комбинацией многих факторов, увеличение температуры ММГ и мощности сезонно-талого слоя (СТС) играют важную регулирующую роль и часто являются пусковым механизмом деструктивных изменений. В данной статье рассматриваются современная динамика факторов, влияющих на устойчивость инфраструктуры городов в криолитозоне и метод прогноза геокриологических рисков, связанных с климатообусловленной деградацией ММГ. На основе этого метода получены прогностические карты для криолитозоны России. Их главной отличительной чертой является вероятностно-стохастическое описание всех влияющих факторов. Оценивается количество городов и поселков, а также численность населения на территориях, характеризующихся различным уровнем гео-

криологических рисков. В заключительной части обсуждаются принципы экономически обоснованной адаптации инфраструктуры к ожидаемым изменениям климата и многолетнемерзлых грунтов.

Современная динамика геокриологических рисков для инфраструктуры

Выборочные исследования, проведенные в отдельных арктических городах России, выявили многочисленные примеры повреждения зданий и сооружений на ММГ [1, 10, 11, 12, 14, 21]. Данные указывают на то, что в настоящее время число сооружений в криолитозоне, основания которых испытывают деструктивное воздействие, значительно увеличилось. Так, в Норильске количество зданий, получивших повреждения в последние 10 лет, оказалось выше, чем за предшествующие 50 лет [14]. Эти изменения можно сопоставить с имевшими место изменениями температуры воздуха в криолитозоне России, региональные особенности которых рассмотрены в работах [5, 8, 13]. Анализ данных о среднегодовой температуре воздуха (рис. 2а), используемой при расчете нормативной нагрузки свайных фундаментов, позволяет оценить изменение их несущей способности за время, прошедшее после постройки сооружений (Рис. 2б).

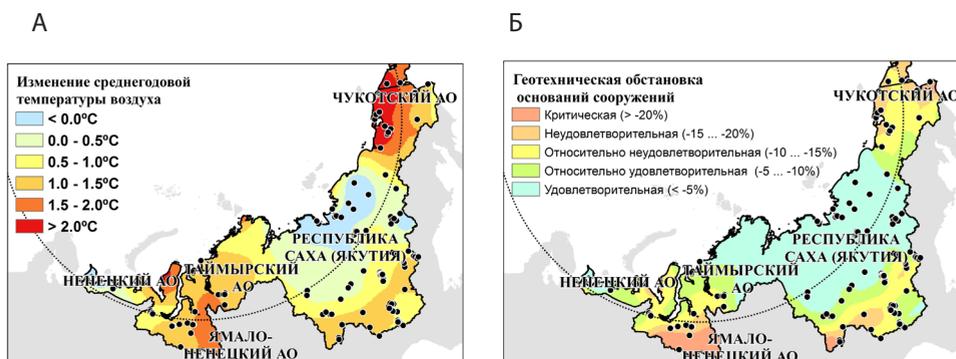


Рис. 2. Изменения среднегодовой температуры воздуха (А) и расчетной несущей способности свайных фундаментов (Б) в период между 1960-1970 гг. и 2000-2010 гг.

Точками обозначены основные города и населенные пункты криолитозоны

В таблице 1 приведены расчетные данные о динамике климатообусловленного изменения несущей способности свайных фундаментов для ряда городов Российской Арктики по десятилетиям, начиная с 1960-х гг. В таблице 2 приведены сводные данные о суммарном уменьшении (в %) расчетной несущей способности свайных фундаментов с момента строительства по настоящее время для регионов Арктической зоны России. Там же указана численность населения городов, инфраструктура которых подверглась климатообусловленным деструктивным изменениям.

Таблица 1

**Климатообусловленные изменения несущей способности свайных фундаментов
в ряде городов Российской Арктики за период эксплуатации сооружений, %**

Регион	Город	Несущая способность ММГ, %				
		1960-1970	1970-1980	1980-1990	1990-2000	2000-2010
Западная Сибирь	Салехард	100	91-103	72-86	81-82	68-70
	Надым	100	96-101	77-91	78-100	64-95
	Новый Уренгой	-	-	100	97-116	91-96
	Новый Порт	100	105-114	86-93	87-92	63-76
Центральная Сибирь	Норильск	100	102-105	88-93	84-92	85-94
	Дудинка	100	103-110	93-94	90-94	74-82
Якутия	Якутск	100	91-98	80-92	59-84	54-80
	Тикси	100	99-100	96-98	95-97	93-96
	Черский	100	100-101	97-98	96	76-84
Чукотка	Анадырь	100	101-104	92-100	75-94	52-84

Таблица 2

**Количество городов и поселков/численность проживающего в них населения
(тыс. человек по состоянию на 2002 г.) в регионах Российской Арктики с различным
уменьшением несущей способности фундаментов сооружений на ММГ
за период эксплуатации по настоящее время**

Изменения, %	ЯНО	Таймырский АО	Якутия	Чукотский АО	Всего
>20	3/151,5	0/0	2/9,3	2/5,2	7/166,0
15-20	6/164,7	0/0	2/10,3	9/32,6	17/207,6
10-15	4/70,4	2/51,8	13/86,2	3/8,3	22/216,7
5-10	0/0	2/199,5	29/428,2	0/0	31/627,7
<5	0/0	1/1,1	21/89,2	0/0	22/90,3
Всего	13/386,6	5/252,4	67/623,2	14/46,1	99/1308,3

Изменение климата повлияло на продолжительность эксплуатационного периода зимников и их несущую способность (рис. 3). Следует отметить неоднородность этих изменений в пределах криолитозоны. Так, с середины 1960-х годов почти повсеместно в Якутии и в некоторых районах Центральной Сибири ежегодная продолжительность эксплуатации зимников увеличилась местами более чем на 10 дней. В то же время она значительно сократилась во многих районах нефте- и газодобычи в Западной Сибири, в долине р. Енисей к северу от Игарки до Диксона, в районе города Черский на северо-востоке Якутии, вблизи городов Певек и Анадырь на Чукотке [20]. Согласно прогнозу [18], к середине XXI века в России на 13 % сократится досягаемость удаленных поселков, в настоящее время обслуживаемых зимниками, при этом территория, на которой экономически целесообразно эксплуатировать зимники, уменьшится примерно на 1 млн км². На оставшихся зимниках сократится период

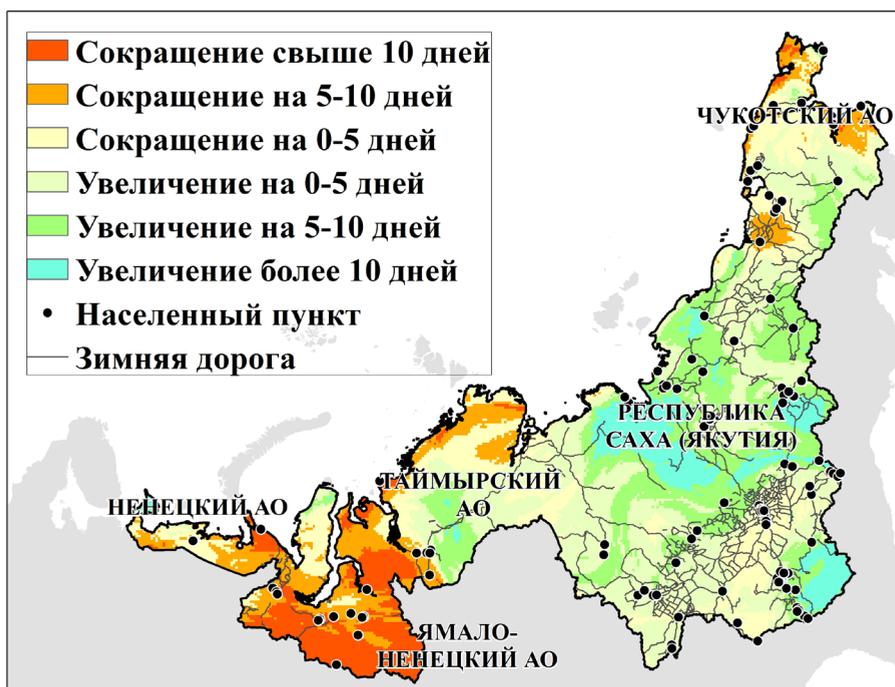


Рис. 3. Изменения расчетной продолжительности эксплуатации зимних дорог в период между 1965-1975 гг. и 1995-2005 гг.

эксплуатации, главным образом изменения затронут ноябрь и апрель. Притом, что с аналогичными транспортными проблемами сталкиваются все Арктические страны, в России они могут иметь наиболее сильные негативные последствия, поскольку, в отличие от Аляски и Северной Канады, у нас мало развит местный воздушный транспорт.

Метод прогноза геокриологических рисков

Для количественной оценки геокриологических рисков была разработана методология на основе модели ММГ нового типа [2]. Основное и принципиальное отличие модели состоит в том, что она является вероятностно-стохастической, в то время как все предшествующие основаны на детерминированном подходе. Это означает, что в расчетах принимается во внимание стохастическая изменчивость свойств почвы, растительности, снежного покрова и иных влияющих факторов, учесть которую при детерминистическом подходе невозможно. В рамках этого метода макромасштабные изменения влияющих параметров в пространстве и времени задаются явно, а их случайные флуктуации, которые приводят к ансамблю различных состояний ММГ, описываются статистически. Под ансамблем в данном случае понимается наличие близких, но несколько различных температур ММГ и значений мощности СТС на относительно небольших по величине макрооднородных участках. Отметим,

что этот подход во многом аналогичен ансамблевому методу расчета состояний климатической системы с использованием одной модели с различными начальными условиями.

Алгоритмически ансамблевый метод состоит в том, что в каждой ячейке пространственной сетки проводятся несколько расчетов с различными комбинациями варьируемых вокруг средних значений параметров, описывающих свойства снежного покрова, растительности и почвы. В случае если известны погрешности климатических характеристик в узлах сетки, их также можно включить в число варьируемых параметров. В результате получают выборки значений исследуемых величин (например, температуры ММГ или же максимальной мощности СТС), по которым можно оценить их функции распределения (плотность вероятности). Собственно модель при этом является детерминистической, стохастичность же методу придает описанный выше алгоритм формирования статистического ансамбля (выборки) решений.

Результаты расчетов по вероятностно-стохастической модели ММГ далее используются для оценки геокриологических рисков. В публикациях [3, 4, 16, 17] были предложены расчетные индексы, которые позволяют количественно оценить уязвимость природных систем и инженерных сооружений при таянии ММГ. Не повторяя этих работ, приведем лишь описание двух таких индексов. Первый из них характеризует риски для экосистем, обусловленные возможными деструктивными ландшафтными изменениями, которые приводят к гибели леса, заболачиванию и аналогичным опасным явлениям. Эти процессы в первую очередь определяются увеличением мощности сезонно-талого слоя DZ при деградации многолетнемерзлых грунтов и льдистостью грунта W . Просадка грунта при оттаивании в первом приближении пропорциональна произведению этих двух параметров. В случае если грунты засолены, они содержат так называемые криопэги, которые представляют собой переохлажденный незамерзший соляной раствор. При наличии криопэгов оттаивание начинается уже при слабонегативных температурах и осадка грунтов увеличивается. Этот эффект можно учесть в расчетах, используя коэффициент засоленности почвенной влаги, S . Таким образом, геокриологические риски для экосистем можно характеризовать индексом I_e , равным произведению трех вышеуказанных параметров, т.е.

$$I_e = \Delta Z \times W \times S \quad (1)$$

Второй индекс характеризует риск повреждения и разрушения объектов инженерной инфраструктуры. В нем учтено, что существующая инфраструктура изначально была адаптирована к мерзлотно-климатическим условиям, имевшим место во время проектирования и строительства сооружений. Таким образом, главным фактором риска для инженерных объектов является относительное изменение несущей способности ММГ по сравнению с заложенной при проектировании. Притом, что уравнение расчета индекса геокриологического риска для инфраструктуры, обозначаемого I_r , имеет тот же вид, что и (1), в нем используется относительное изменение мощности СТС, DZ_r , равное разности значений, рассчитанных для прогнозируемых на будущее и современных условий, деленной на их сумму.

Прогноз геокриологических рисков

По разработанной вероятностно-стохастической модели ММГ были проведены расчеты с использованием оптимальной климатической проекции на первую четверть и середину 21 века. На рисунке 4 приведены результаты для прогнозируемого на середину 21 века климата. Представленные на нем карты максимальной мощности СТС принципиально отличаются от традиционных тем, что вместо «среднего» для данной точки значения на них показана вероятность того, что она находится в заданном интервале. Эта вероятность рассчитывается на основе частотного анализа выборки, полученной при помощи ансамблевого моделирования, при этом границы и число классов устанавливаются произвольно. В данном случае выделены 4 класса с неравномерным разбиением по глубине для того, чтобы обеспечить достаточное заполнение каждого из них.

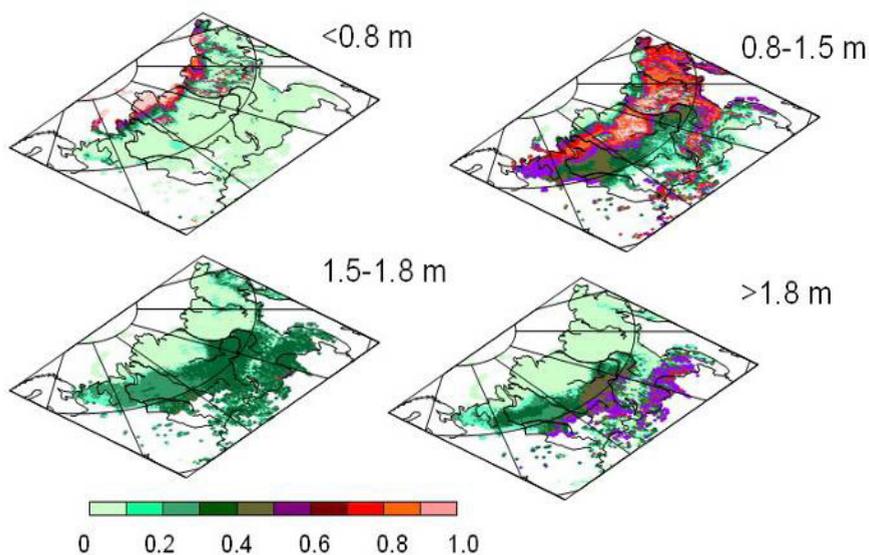


Рис. 4. Вероятностный прогноз изменения глубины сезонного таяния вечной мерзлоты к середине 21 века.

По формуле (1), используя результаты расчетов состояния ММГ для климатических условий, прогнозируемых на середину 21 века, были рассчитаны индексы I_a и I_r для криолитозоны Евразии. Значения индексов были нормированы так, чтобы они укладывались в диапазон от 0 до 100. Отметим, что значение индекса не является вероятностью возникновения экологического риска, а лишь характеризует ее относительные различия в разных районах. После этого при помощи средств ГИС ИДРИ-СИ были построены цифровые карты индексов, которые имеют разрешение 1° по широте и долготе. Границы категорий на картах были выбраны таким образом, чтобы категории были заполнены равномерно, притом, что их количество было нами задано равным 12. В результате в первую категорию попали все ячейки со значением индекса менее 10, в последнюю – все ячейки со значением индекса больше 72. Такой

подход позволяет строить наиболее информативные электронные карты, и для его реализации в ИДРИСИ предусмотрены стандартные средства обработки картографических данных. На рисунке 5 показаны цифровые карты индексов геоэкологических рисков для экосистем I_a и для инфраструктуры I_r , рассчитанные с использованием оптимизированной климатической проекции на середину XXI века.

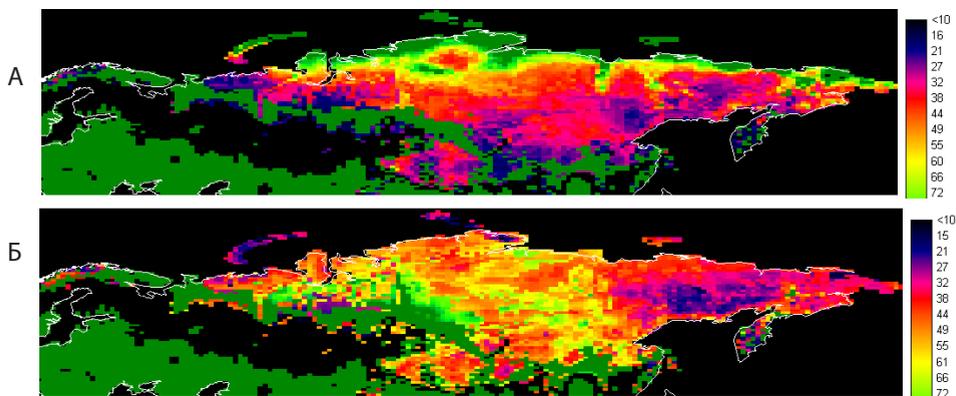


Рис. 5. Индексы геоэкологических рисков для экосистем, I_a (А) и для инфраструктуры I_r (Б), рассчитанные с использованием оптимальной климатической проекции на середину XXI в.

Распределение индекса геоэкологических рисков для экосистем на рисунке 5А в значительной степени подчиняется широтной зональности. Его значения минимальны в области сплошного распространения ММГ вдоль Арктического побережья, увеличиваясь по мере продвижения к южной границе криолитозоны. Эти общие пространственные закономерности нарушаются лишь в горных районах, где значения индекса в среднем ниже, чем на окружающих территориях.

Индекс геоэкологических рисков для инфраструктуры на рис. 5Б имеет более сложное пространственное распределение. В области наибольших значений I_r попадают Чукотка, бассейны верхнего течения Индигирки и Колымы, юго-восточная часть Якутии, значительная часть Западно-Сибирской равнины, побережье Карского моря, Новая Земля, а также часть криолитозоны с островным распространением ММГ на севере ЕТР. В этих районах имеется развитая инфраструктура, в частности газо- и нефтедобывающие комплексы, система трубопроводов Надым-Пур-Таз на северо-западе Сибири, Билибинская атомная станция и связанные с ней линии электропередач от Черского на Колыме до Певека на побережье Восточно-Сибирского моря. Деградация ММГ на побережье Карского моря может привести к значительному усилению береговой эрозии, за счет которой в настоящее время берег отступает ежегодно на 2-4 метра. Особую опасность представляет ослабление ММГ на Новой Земле в зонах расположения хранилищ радиоактивных отходов.

На рисунке 6 приведено частотное распределение прогнозируемых на середину XXI в. значений индексов геоэкологических рисков для экосистем (А) и для инфраструктуры (Б). Эти распределения были получены обработкой цифровых карт при

помощи стандартных процедур геоинформационного анализа ГИС ИДРИСИ. Видно, что распределение рисков для экосистем близко к нормальному, в то время как риски разрушения инфраструктуры имеют отчетливо асимметричное распределение, при котором более вероятно отклонения от среднего в сторону меньших значений индекса, притом, что сохраняется небольшая вероятность значительных превышений среднего.

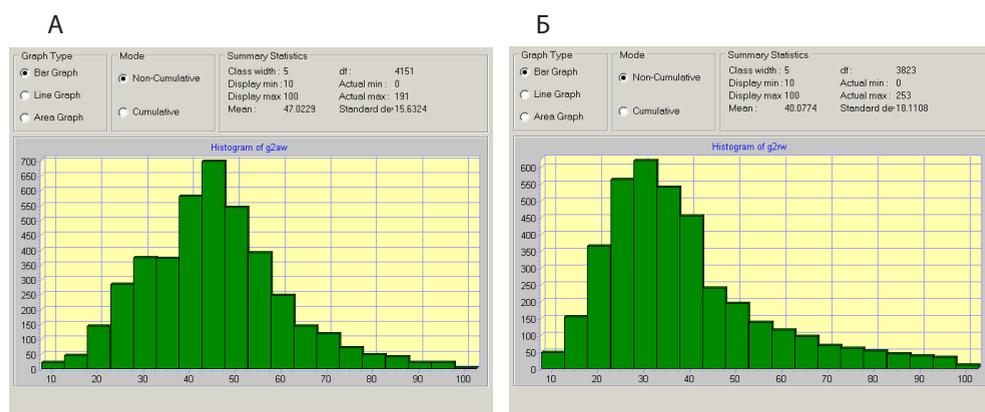


Рис. 6. Частотное распределение значений индексов геокриологических рисков для экосистем (А) и для инфраструктуры (Б), рассчитанных с использованием оптимальной климатической проекции на середину XXI в.

Стратегии адаптации на основе экономических оценок геокриологических рисков

При общем понимании проблемы геокриологических рисков вопросы связанно-го с ними экономического ущерба и адаптации остаются открытыми. В России это обусловлено двумя главными причинами.

Во-первых, наиболее значительные изменения климата в Арктических регионах произошли в конце 1980х и в 1990х годах. Они совпали с периодом распада экономики, хозяйственной системы и смены форм собственности на многих предприятиях. Большинство новых собственников были заинтересованы лишь в быстром получении прибыли, и вопрос о разработке долгосрочных стратегий адаптации инфраструктуры к изменениям климата в реалиях того времени был неуместен.

Во-вторых, российские специалисты по инженерной геокриологии, за редким исключением, не рассматривают климат в качестве фактора, способного вызвать масштабные изменения вечной мерзлоты. В инженерных расчетах используется традиционная концепция, согласно которой в XXI веке климат будет тем же, что и в предшествующее столетие с учетом лишь естественной изменчивости. Эта же концепция отражена в СНиП, которые не учитывают изменения климата.

Ряд методических принципов для разработки экономически обоснованной стратегии адаптации можно сформулировать, анализируя полученные оценки геокриологических рисков. Схему анализа экономической составляющей иллюстрирует ри-

сунок 7. На нем показаны основные элементы, которые необходимо принимать во внимание при планировании мер адаптации. Элементы, заключенные в закругленные фигуры, содержат неопределенности. К таковым относятся:

- климатические проекции, большие неопределенности которых связаны с ограниченной точностью используемых для их построения климатических моделей и отсутствием реалистичных сценариев эмиссии парниковых газов;
- ранжирование криолитозоны по степени уязвимости при таянии ММГ, поскольку нет единого критерия для оценки такого рода рисков;
- проектируемая (еще не построенная) инфраструктура, поскольку конкретные решения зависят от меняющихся условий.

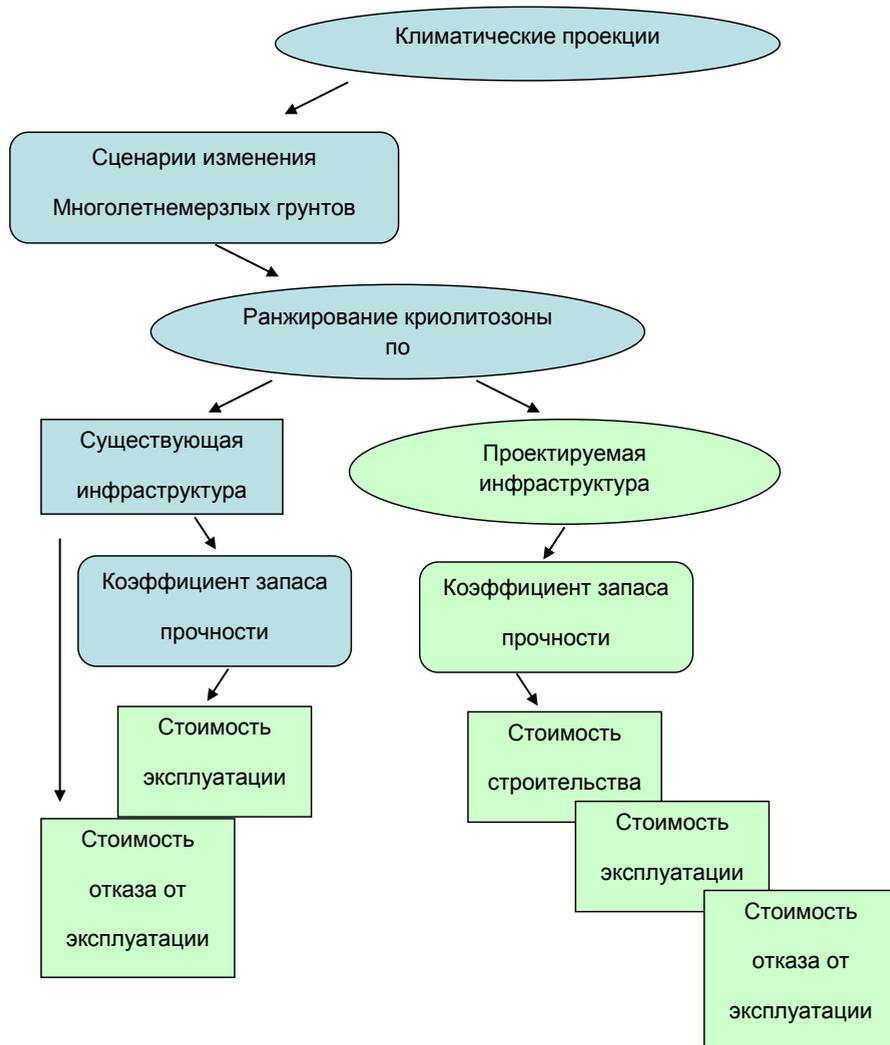


Рис. 7. Схема оценки экономического ущерба от таяния ММГ

Остальные элементы, заключенные в прямоугольники, полностью предсказуемы и их параметры могут быть определены расчетами по существующим методикам.

На рисунке 7 салатным цветом обозначены элементы, на которые изменение ММГ оказывает непосредственное влияние и которые могут быть модифицированы, в том числе и с учетом величины этого влияния. Все остальные элементы либо не испытывают такого влияния, либо не могут быть изменены, и по этой причине их можно исключить из анализа. Следует пояснить, что элементы «Существующая инфраструктура» и заложенный в ней «коэффициент запаса прочности» исключены, поскольку все их свойства уже predeterminedены, а возможность их модификации с целью адаптации к изменениям ММГ неявно учтена в элементе схемы «Стоимость эксплуатации».

Таким образом, для оценки экономического ущерба или выгод, обусловленных таянием вечной мерзлоты, формируются две независимые линии. Одна из них связана с существующей инфраструктурой и содержит лишь два элемента:

- стоимость эксплуатации конкретного объекта, которая включает также и цену его преобразования, например, усиления фундамента сооружения с тем, чтобы он мог выдержать вес объекта при ослаблении несущей способности ММГ;
- стоимость отказа от эксплуатации объекта, т.е. совокупные потери, которые возникнут в случае, если данный объект перестанет существовать и выполнять свои функции.

Вторая линия связана с еще не построенной инфраструктурой и, кроме вышеуказанных, содержит еще два элемента:

- коэффициент запаса прочности, увеличивая который можно строить объекты, которые будут сохранять стабильность даже в районах с относительно «слабыми» ММГ. Например, увеличение числа свай фундаментов или удлинение их части, погруженной в мерзлоту, при том же расчетном весе конструкции уменьшает нагрузку на каждую из них, в результате фундамент сможет выполнять свои функции при более высоких температурах грунта;
- стоимость строительства объекта, которая помимо прочих факторов определяется также и величиной коэффициента запаса прочности.

Представленную на рисунке 7 схему можно применять как к отдельным элементам инфраструктуры, так и к локализованным группам функционально связанных объектов, таким, как городской микрорайон или населенный пункт. В анализе важно принимать во внимание, что помимо принятия решения о строительстве нового объекта (или реконструкции существующего), всегда имеется альтернативная возможность отказа от строительства (ликвидации существующего) объекта, притом, что выполняемые им функции либо прекращаются, либо передаются другим аналогичным объектам. Обоснованный выбор состоит в сравнении стоимости реализации прямого и альтернативного решения. Более подробно логика принятия такого рода решений и математические методы расчета стоимостных показателей для строительства в различных климатических условиях на Крайнем Севере изложена в публикации [11, 12].

Особую группу составляют сооружения, выполняющие уникальные функции, наличие которых необходимо, невзирая на экономическую сторону вопроса. К сооружениям такого рода можно отнести Билибинскую атомную электростанцию, Вилюйский, Усть-Хантайский, Усть-Среднеканский, Колымский, Курейский (вблизи Туруханска), Зейский, Эвенкийский (Нижняя Тунгуска) и Мамаканский (первый, построенный на ММГ) гидротехнические узлы, а также построенный в 2009 году в крайне сложных геокриологических условиях мост через реку Юрибей. По гидротехническим сооружениям имеется обширная литература, обзор которой показывает, что при относительно малом их количестве в районах распространения ММГ, на них приходится 48 % всех аварий. Основной причиной аварий является неучет криогенных процессов в теле плотин, их основаниях и в районах примыкания. Указанные сооружения уникальны, заведомо сложны в эксплуатации, с одной стороны, а с другой – несмотря на все это отдача от них превышает и еще долго будет превышать затраты на их содержание.

К этой группе относятся и проекты нового строительства с безальтернативным использованием высокотемпературных ММГ, часто с высоким содержанием льда, засоленностью грунтов и наличием криопэгов, несущая способность которых минимальна. Так обстоит дело со многими сооружениями нефтегазовой отрасли. В частности, это относится к инженерным сооружениям вдоль строящегося газопровода «Бованенково-Ухта», при проектировании которых принималась во внимание не только крайне низкая несущая способность ММГ вдоль многих участков трассы, но и прогнозируемые изменения климата. Проект, разработка которого была закончена коллективом ОАО «ВНИПИГаздобыча» в 2008 г., предусматривал различные варианты строительства, в том числе с применением термосифонов [9]. Была рассчитана стоимость нулевого цикла с учетом термостабилизации грунтов и установки термосифонов для гипотетического сценария изменения климата, предусматривающего увеличение температуры воздуха во все месяцы года на 2°C за 40 лет. По этим расчетам удельные затраты для стандартных свайных фундаментов с проветриваемым подпольем в расчете на 1 м² застройки дополнительно возрастают на 3 – 20 тыс. рублей (в ценах 2008 г.) в зависимости от числа устанавливаемых термосифонов.

Главный вывод этого заключительного раздела состоит в том, что разработать стратегию адаптации инфраструктуры в условиях изменения климата и ММГ можно при условии, что имеются экономическая мотивация и методы для количественного прогноза геокриологических рисков. Результаты расчетов, представленные в статье, способствуют решению этой задачи.

Данная работа поддерживается грантом Российского Научного Фонда (проект 14-17-00037).

Литература:

1. Алексеева, О.И. О проблемах градостроительства в криолитозоне (на примере Якутска) / О.И. Алексеева, В.Т. Балобаев, М.Н. Григорьев и др. // Криосфера Земли. – 2007. – № 2. – С. 76-83.
2. Анисимов, О.А. Вероятностно-статистическое моделирование мощности сезонно-талого слоя в условиях современного и будущего климата / О.А. Анисимов // Криосфера Земли. – 2009. – Т. 8. – № 3. – С. 36-44.
3. Анисимов О.А. Оценка влияния изменения климата и деградации вечной мерзлоты на инфраструктуру в северных регионах России / О.А. Анисимов, М.А. Белолуцкая // Метеорология и гидрология. – 2002. – №6. – С. 15-22.
4. Анисимов, О.А. Глобальное потепление и таяние вечной мерзлоты: оценка рисков для производственных объектов ТЭК / О.А. Анисимов, С.А. Лавров // Технологии ТЭК. – 2004. – № 3. – С. 78-83.
5. Анисимов, О.А. Об оценках изменений климата регионов России в 20 и начале 21 веков по данным наблюдений / О.А. Анисимов, Е.Л. Жильцова // Метеорология и гидрология. – 2012. – № 6. – С.95-107.
6. Гарагуля, Л.С. Геокриологические опасности. Природные опасности России / Л.С. Гарагуля, Э.Д. Ершов; ред. В.И. Осипов, С.К. Шойгу. – Москва : Крук, 2000. – Т. 1. – 315 с.
7. Гребенец, В.И. Снижение геотехнической надежности при ухудшении мерзлотных условий оснований / В.И. Гребенец, Ю.А. Ухова // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2008. – № 5. – С. 24-28.
8. Кокорев, В.А. О метеорологических данных для изучения современных и будущих изменений климата на территории России / В.А. Кокорев, А.Б. Шерстюков // Арктика XXI век. Естественные науки. – 2015. – № 2. – С. 5–29.
9. Попов, А.П. К вопросу о типовых технических решениях по основаниям и фундаментам для криолитозоны / А.П. Попов, В.И. Милованов, В.В. Жмулин и др. // Инженерная геология. – 2008. – № 3. – С. 22-40.
10. Стрелецкий, Д.А., Шикломанов, Н.И., Гребенец, В.И. Изменение несущей способности мерзлых грунтов в связи с потеплением климата на севере Западной Сибири / Д.А. Стрелецкий, Н.И. Шикломанов, В.И. Гребенец // Криосфера Земли. – 2012. – Т. XVI. – № 1. – С. 22-32
11. Хрусталева Л.Н. Прогноз потепления климата и его учет при оценке надежности оснований зданий на вечномерзлых грунтах / Л.Н. Хрусталева, И.В. Давыдова // Криосфера Земли. – 2007. – Т. XI. – № 2. – С. 68–75.
12. Хрусталева, Л.Н. Надежность северной инфраструктуры в условиях меняющегося климата : монография. – Москва : Университетская книга, 2011. – 260 с.
13. Anisimov, O.A., Kokorev, V.A., Ziltcova E.L. Temporal and Spatial Patterns of Modern Climatic Warming: Case Study of Northern Eurasia / O.A. Anisimov, V.A. Kokorev, E.L. Ziltcova // Climatic Change. – 2013. – Vol.118. – No 3. – P. 871-883.
14. Grebenets, V.I., Streletskiy, D.A. and Shiklomanov, N.I. Geotechnical safety issues in the cities of Polar Regions / V.I. Grebenets, D.A. Streletskiy, N.I. Shiklomanov // Geography, Environment, Sustainability. – 2012. – No 5(3). – P. 104-119.

15. Larsen, P.H., Goldsmith, S., Smith, O., Wilson, M.L., Strzepek, K., Chinowsky, P., and Saylor, B. Estimating future costs for Alaska public infrastructure at risk from climate change / P.H. Larsen, S. Goldsmith, O. Smith et al. // *Global Environmental Change*. – 2008 – No 18(3). – P. 442-457.
16. Nelson, F.E., Anisimov, O.A., Shiklomanov, N.I. Subsidence risk from thawing permafrost / F.E. Nelson, O.A. Anisimov, N.I. Shiklomanov // *Nature*. – 2001. – No 410. – P. 889-890.
17. Nelson, F.E., Anisimov, O.A., Shiklomanov, N.I. Climate change and hazard zonation in the circum-Arctic permafrost regions / F.E. Nelson, O.A. Anisimov, N.I. Shiklomanov // *Natural Hazards*. – 2002. – Vol.26. – No 3. – P. 203-225.
18. Stephenson, S.R., Smith, L.C., and Agnew, J.A. Divergent long-term trajectories of human access to the Arctic / S.R. Stephenson, L.C. Smith, J.A. Agnew // *Nature Climate Change*. – 2011. – No 1(3). – P.156-160.
19. Streletskiy, D.A., Anisimov, O.A. Vasiliev, A.A. Permafrost degradation. In: Haeberli W. and Whiteman C. (ed.). *Snow and Ice-Related Risks, Hazards and Disasters*. – Oxford : Elsevier, 2014. – P. 303-344.
20. Streletskiy, D.A., Shiklomanov, N.I. and Hatleberg, E. Infrastructure and a Changing Climate in the Russian Arctic: A Geographic Impact Assessment / D.A. Streletskiy, N.I. Shiklomanov, E. Hatleberg // *Proceedings of the 10th International Conference on Permafrost*. – 2012. – Vol. 1. – P. 407-412.
21. Streletskiy, D A., Shiklomanov, N.I. and Nelson, F.E. Permafrost, infrastructure, and climate change: a GIS-based landscape approach to geotechnical modeling / D.A. Streletskiy, N.I. Shiklomanov, F.E. Nelson // *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. – 2012. – No 44(3). – P. 368-380.