

Ретроспективный анализ несущей способности многолетнемерзлых грунтов в период интенсивного освоения Арктики в 1950—2022 гг.

О. А. Анисимов*

Модель многолетнемерзлых грунтов адаптирована для расчета несущей способности оснований свайных фундаментов зданий по методике, принятой в инженерной геокриологии. С помощью ретроспективных расчетов за период 1950—2022 гг. выделены территории, где в экстремальные годы заложенный при проектировании зданий запас устойчивости был исчерпан, и подсчитано число таких лет на рассмотренном интервале времени. Результаты показали, что прогнозируемые условия утраты запаса устойчивости зданий для многих районов и городов российской Арктики не являются беспрецедентными. В 22 из рассмотренных 27 городов и населенных пунктов они возникали в отдельные экстремальные годы. В 11 городах, расположенных в области сплошного и прерывистого распространения мерзлоты, число экстремальных лет на интервале 1950—2022 гг. изменялось от 12—17 (Салехард, Новый Уренгой, Ленск, Анадырь, Магадан) до 21—25 (Тарко-Сале, Алдан, Олекминск). Полученные оценки можно использовать для уточнения мер адаптации инфраструктуры арктических регионов к изменению климата.

Ключевые слова: изменение климата, Арктика, многолетняя мерзлота, риски для инфраструктуры, адаптация.

DOI: 10.52002/0130-2906-2025-1-59-69

Введение

Изменение климата и его последствия наиболее сильно проявляются в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ). К регионам, частично или полностью расположенным в АЗРФ, относятся Мурманская и Архангельская области, Республика Карелия, Республика Коми, Ненецкий и Ямало-Ненецкий автономные округа, Красноярский край, Республика Саха (Якутия) и Чукотский автономный округ. В отличие от зарубежной Арктики, это индустриально развитые и урбанизированные территории. В среднем по АЗРФ 88% населения из более чем 2 млн проживают в городах с современной инфраструктурой [1]. Инфраструктура является главным реципиентом геокриологических рисков, обусловленных изменением климата и деградацией многолетнемерзлых грунтов (ММГ). В городах АЗРФ были зафиксированы повреждения и частичные разрушения зданий из-за

* Государственный гидрологический институт; e-mail: anisimov.travel@gmail.com (Анисимов Олег Александрович).

просадки свайных фундаментов. Многие здания были превентивно разобраны, например, в Норильске таких случаев было более 300 за последние 20 лет [8].

В ряде работ даны количественные прогнозы риска разрушения инфраструктуры и оценки сопутствующего многомиллиардного ущерба [3, 4, 7, 8, 10, 11]. При том, что эти прогнозы имеют серьезное научное обоснование, многие инженеры-геокриологи и, что более важно, представители административно-хозяйственных органов, ответственных за выполнение принятых Правительством Российской Федерации региональных планов адаптации к изменению климата, воспринимают их скептически. Это можно объяснить тремя причинами. Первая — климатический нигилизм, который широко распространен в среде отечественных геологов и мерзлотоведов. Вторая — наличие технических средств термостабилизации ММГ, таких как термосифоны, обустройство вентилируемых подполий, расчистка снега и т. п. С их помощью можно понижать среднегодовую температуру ММГ на несколько градусов. Многим это кажется достаточным для компенсации воздействия изменения климата, поскольку, согласно Парижскому соглашению, укоренилось представление об ограничении потепления уровнем $1,5^{\circ}\text{C}$, а дифференциация глобальных и региональных величин в общественном сознании часто отсутствует. Третья причина в том, что на когнитивном уровне вне исторического контекста трудно осмыслить грядущие изменения ММГ и апокалиптическую картину массового разрушения инфраструктуры, которую дают прогнозы.

Целью работы является анализ данных о том, насколько беспрецедентны с точки зрения инженерной геокриологии прогнозируемые изменения ММГ и как сильно они отличаются от геокриологических условий отдельных экстремальных лет в недавнем прошлом. Для этого были проведены ретроспективные расчеты мощности сезонно-талого слоя, среднегодовой температуры и несущей способности ММГ за период 1950—2022 гг. Были выделены территории, где в экстремальные годы заложенный при проектировании зданий запас несущей способности свайных фундаментов был исчерпан, и было подсчитано число таких лет на рассмотренном интервале времени. Для 17 городов в АЗРФ с населением более 10 тыс. человек, в том числе для 4 городов с населением свыше 100 тыс. человек, и для 10 крупных населенных пунктов с развитой жилой инфраструктурой были рассчитаны изменения во времени несущей способности свайных фундаментов зданий разных лет застройки и определены годы, когда она находилась ниже критической отметки.

Методика и данные

Для проведения ретроспективных расчетов использован метод геокриологического реанализа. В работе [2] описаны математическая постановка задачи, модель ММГ и результаты ее проверки по данным наблюдений. Показано, что этот метод дает хорошие результаты и его можно использовать для воспроизведения изменений температуры ММГ и мощности сезонно-талого слоя как для отдельных территорий, так и для всей криолитозоны при условии, что есть данные о влияющих параметрах. В числе таких параметров метеоданные (как минимум температура воздуха и коли-

чество осадков в месячной дискретности); данные о высоте снежного покрова; параметры, описывающие свойства почвы, такие как мощность верхнего органического слоя, гранулометрический состав или тип почвы с условным делением на пески, супеси, суглинки и глины; данные о наличии, виде и высоте растительности, а также топографические характеристики, в первую очередь данные о наличии склонов и их экспозиции. Отсутствие полного набора этих данных затрудняет применение реанализа для ретроспективной оценки динамики ММГ в различных ландшафтно-климатических, почвенных и гидрологических условиях. В случае инженерных расчетов ситуация иная. Требуется меньшее число входных параметров, поскольку при строительстве удаляются растительность и верхний органический слой почвы, проводятся выравнивание и подсыпка грунта-основания.

Модель ММГ была адаптирована для расчета несущей способности многолетнемерзлых оснований свайных фундаментов зданий. Было принято во внимание, что здание экранирует подполье от атмосферных осадков и зимой снежный покров под ним практически отсутствует, а влагосодержание грунта близко к наименьшей влагоемкости во все сезоны года. В соответствии с этим расчеты проводились для сухого (содержание влаги 150 мм/м) песчаного и супесчаного грунта плотностью 1400 кг/м³, непосредственно контактирующего с приземным воздухом в вентилируемом подполье и защищенного от приходящего солнечного излучения. Коэффициент теплопроводности грунта рассчитывался по полуэмпирическим формулам, предложенным в работе [6], и принимался равным 1,25 и 1,05 Вт/(м °С) для мерзлого и талого грунта соответственно.

Расчеты проводились с использованием данных метеоархива CRUTS4.07 о среднемесячных значениях температуры воздуха и суммы атмосферных осадков в узлах пространственной сетки с шагом 0,5° по широте и долготе, с запасом покрывающей всю территорию АЗРФ. По данным за период 1950—2022 гг. были рассчитаны ежегодные величины среднегодовой температуры ММГ и мощности сезонно-талого слоя для заданных выше значений влияющих почвенных параметров.

Модель ММГ была дополнена инженерным блоком, в котором рассчитывалась несущая способность свайных фундаментов. Она определяется главным образом тем, насколько прочно боковая поверхность свай смерзается с вмещающим их мерзлым грунтом ниже слоя сезонного оттаивания. С повышением температуры грунта несущая способность уменьшается, соответствующие зависимости, полученные опытным путем для разных типов грунтов и стандартных свай, приведены в строительных нормах и правилах (СНиП) в виде таблиц [9]. В работе [4] они параметризованы в виде линейных зависимостей, которые и были использованы в расчетах.

При строительном проектировании с использованием табличных данных СНиП рассчитывается несущая способность стандартной сваи F_0 для климатической нормы за многолетний период, предшествующий строительству, затем подбирается такое количество свай n , чтобы выполнялось условие

$$M \leq \frac{nF_0}{\gamma}, \quad (1)$$

где M — расчетная нагрузка на фундамент (вес здания); n — коэффициент запаса, обычно равный 1,2 для зданий и 1,4—1,75 для мостов и иных конструкций, требующих повышенной надежности.

Климатообусловленное увеличение значений температуры грунта и мощности сезонно-талого слоя приводит к тому, что несущая способность каждой сваи $F(t)$ со временем уменьшается и в какой-то момент t_{cr} может достичь критического значения $F_{cr} = M/n$, ниже которого фундамент не выдержит веса стоящего на нем сооружения. Из условия (1) следует, что эта величина связана с F_0 следующим уравнением:

$$F_0 = F_{cr}. \quad (2)$$

Поскольку сваи погружены в грунт не более чем на несколько метров, они целиком находятся в слое годовых теплооборотов. В первом приближении можно не учитывать “память” о термических условиях предшествующих лет и пренебречь обусловленным ею кумулятивным эффектом многолетнего накопления тепла или холода. Это обосновывает допущение, что несущая способность свай изменяется безынерционно и определяется исключительно условиями текущего года.

В соответствии с принятым допущением, по полученным ранее ежегодным значениям среднегодовой температуры ММГ и мощности сезонно-талого слоя по методике, изложенной в СНиП [9], был рассчитан временной ряд значений несущей способности стандартной сваи $F(t)$ на интервале 1950—2022 гг. По полученной выборке $F(t)$ был рассчитан коэффициент линейного тренда b , описывающий изменение во времени ее скользящей среднемноголетней величины $\bar{F}(t)$:

$$\bar{F}(t) = F_0 + b(t - t_0). \quad (3)$$

В уравнении (3) t_0 обозначает время (десятилетие) строительства, для которого рассчитывались все нормативные характеристики. Данные, представленные на портале <https://dom.mingkh.ru>, свидетельствуют о том, что более 80% жилых зданий в АЗРФ были построены в 40-летний период 1960—1999 гг. На начало этого периода приходится интенсивное строительство в Красноярском крае (Норильск, Талнах, Дудинка) и в Республике Коми (Воркута), на его окончание — строительство в Ямало-Ненецком автономном округе (Салехард, Лабытнанги).

Были воспроизведены расчеты проектных значений F_0 для зданий, построенных в 1960-х, 1970-х, 1980-х и 1990-х годах, по методике, изложенной в СНиП [9], и по уравнению (2) определены соответствующие критические значения F_{cr} для стандартного значения $n = 1,2$. При этом предполагалось, что в каждое из рассматриваемых десятилетий застройки проектный расчет F_0 осуществлялся на основе метеоданных, осредненных за два предшествующих десятилетия. Очень вероятно, что в действительности при проектировании учитывались данные за более длительный период, сведения об этом отсутствуют. Поскольку нормативный период при этом мог расширяться только “снизу”, это, как правило, добавляло “холодные” годы, предшествующие периоду с выраженным потеплением. В результате расчетные нормативные значения F_0 для всех десятилетий, в которые осуществлялась застройка, могли быть только несколько больше рассчитан-

ных. Иными словами, оценки F_0 являются консервативными. Они соответствуют заведомо наиболее благоприятным для сохранения запаса устойчивости условиям, когда в фундамент из-за чуть более “теплых” расчетных климатических норм могло закладываться несколько большее количество свай n .

Была получена эмпирическая оценка ожидаемого “времени жизни” L для сооружений разных лет застройки, обусловленного изменением несущей способности ММГ. Оно определяется линейным трендом скользящей среднегодовой (в данном случае осредненной за два десятилетия) величины $F(t)$, которая должна оставаться больше, чем F_{cr} . Задавая в уравнении (3) $\bar{F}(t_{cr}) = F_{cr}$, подставляя F_0 из уравнения (2) и решая получившееся уравнение относительно “времени жизни” $L = t_{cr} - t_0$, получаем:

$$L = (1 -)F_{cr}/b. \quad (4)$$

Величина L отражает изменение во времени среднегодовых климатических и геокриологических условий. Она основана исключительно на данных наблюдений и никак не учитывает современные модельные прогнозы изменения климата, которые, бесспорно, вносят коррективы в ожидаемое время существования сооружений. Однако на период застройки такие прогнозы отсутствовали и эмпирический подход был единственно возможным. Полученные с его помощью результаты были актуальны в период интенсивного строительства в АЗРФ. Они приводятся лишь для иллюстрации имевших место в то время представлений о перспективах сохранения устойчивости инфраструктуры.

Как показывает практика, условия отдельных экстремальных лет часто играют более важную роль, чем длительные тренды. С учетом этого был проведен анализ рассчитанного временного ряда ежегодных величин $F(t)$. Для каждого из рассматриваемых четырех десятилетий строительства подсчитывалось число лет с нулевым запасом несущей способности, когда $F(t) < F_{cr}$. Были построены цифровые карты для всей криолитозоны, на основе которых был проведен ретроспективный анализ инженерно-геокриологических условий в 28 городах и населенных пунктах АЗРФ.

Результаты исследования

Расчетные нормативные значения несущей способности F_0 для идентичных зданий, отличающихся временем постройки, неодинаковы, поскольку при проектировании были использованы климатические условия разных предшествующих десятилетий. Из-за положительного тренда температуры воздуха температура многолетнемерзлых грунтов повышается и расчетная величина F_0 в среднем уменьшается от 1960—1970-х к 1990-м годам. Соответственно, со временем в конструкцию фундаментов, изначально рассчитанных на одинаковую нагрузку, при проектировании закладывается большее количество свай. Из этого следует, что в настоящее время при прочих равных условиях наименьший запас несущей способности — у старых зданий. Ниже рассмотрены результаты, относящиеся к этой категории застройки — зданиям, построенным в 1960—1970-х годах. Расчетные нормативные значения F_0 в эти два десятилетия различаются незначительно.

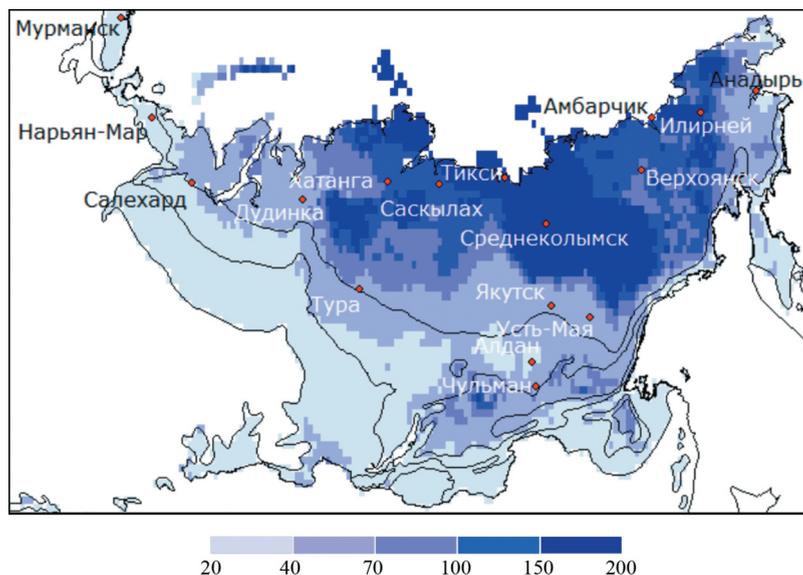


Рис. 1. Эмпирическая оценка времени существования сооружений на ММГ (годы от момента постройки до исчерпания запаса несущей способности свайных фундаментов, обусловленного линейным трендом).

Карта на рис. 1 показывает эмпирическую оценку ожидаемой продолжительности существования сооружений на ММГ. Контурами обозначены границы сплошной, прерывистой и островной мерзлоты. Видно, что в районах расположения арктических городов она достаточно велика. В области сплошного распространения ММГ эмпирически ожидаемый период сохранности сооружений составляет 40—70 лет в южной, западной частях и на Чукотке. В Сибири — 100 лет и более, достигая максимума свыше 150 лет в Северной и Центральной Якутии. В области островного распространения ММГ эта величина не превышает 40 лет.

Значительно больший интерес представляет анализ межгодовой изменчивости $F(t)$. На рис. 2 показано число экстремальных по инженерно-геокриологическим условиям лет в период 1960—2022 гг. с нулевым остаточным запасом несущей способности свайных фундаментов зданий постройки 1960—1970-х годов. Видно, что даже в области сплошного распространения ММГ на большой территории такие годы случались хотя бы однажды, а вблизи ее южной границы это происходило неоднократно. В зоне прерывистого распространения ММГ число экстремальных лет могло достигать 20 при медианном значении 8. Во всей области островного распространения ММГ число экстремальных лет было более 20. При том, что в этой области отсутствуют крупные населенные пункты, это могло быть причиной аварий на линейных сооружениях, таких как трубопроводы, линии электропередач и транспортные магистрали. Вдоль траекторий таких протяженных объектов могут чередоваться участки с сезонно- и многолетнемерзлым грунтом, по-разному реагирующие на климатические изменения. Это значительно осложняет строительство и снижает надежность сооружений. В качестве примера можно привести Северную железную доро-

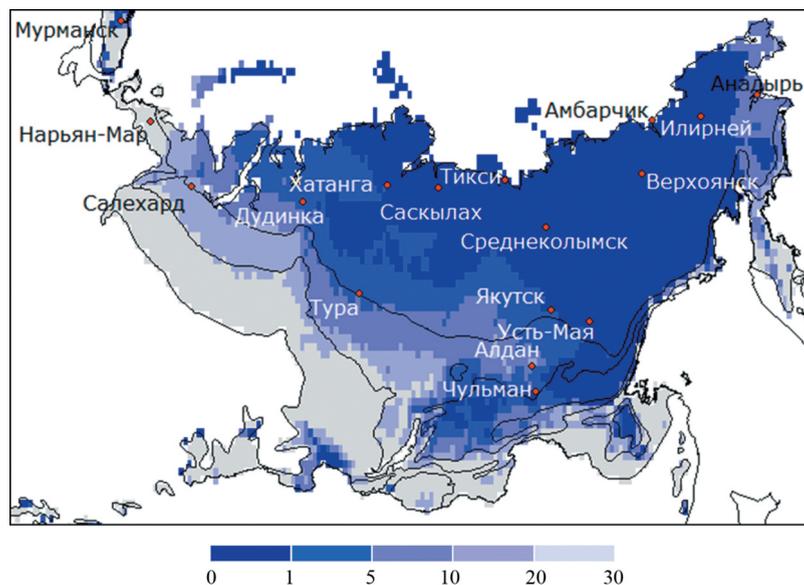


Рис. 2. Число лет в период 1960—2022 гг. с нулевым остаточным запасом несущей способности свайных фундаментов зданий на ММГ постройки 1960-х годов.

Контурами показаны границы сплошной, прерывистой и островной мерзлоты.

гу Сейда — Воркута. За 3 года в период значительного потепления на рубеже двух столетий намного увеличилась ежегодная термокарстовая просадка полотна дороги и в 1,5 раза (с 10 до 15 км) — суммарная протяженность участков с такими деформациями [5].

В наиболее концентрированном виде геокриологические риски проявляются в арктических городах. На рис. 3 показаны ежегодные расчетные значения несущей способности свайных фундаментов $F(t)$ и ее линейный тренд за период 1950—2022 гг. для выборки из 15 городов АЗРФ, расположенных в разных мерзлотных и климатических зонах. Горизонтальными пунктирными линиями представлены критические значения F_{cr} для сооружений, построенных в 1960—1970-х годах. Годы, соответствующие точкам их пересечения с линейными трендами, указывают верхний предел эмпирической оценки продолжительности существования сооружений этого периода застройки.

В таблице приведены результаты расчетов для 17 городов и 10 населенных пунктов АЗРФ, расположенных в области сплошного (С), прерывистого (П) и островного (О) распространения ММГ. Показаны среднегодовые величины температуры воздуха для двух десятилетий в начале (1951—1960 гг.) и в конце (2013—2022 гг.) рассматриваемого периода, а также ее линейный тренд. N_{cr} обозначает число экстремальных по геотехническим условиям лет на интервале 1950—2022 гг., когда несущая способность фундаментов опускалась ниже критического уровня ($F(t) < F_{cr}$). В последних двух столбцах приведены среднемноголетняя скорость убывания запаса надежности dF/dt и эмпирическая оценка времени достиже-

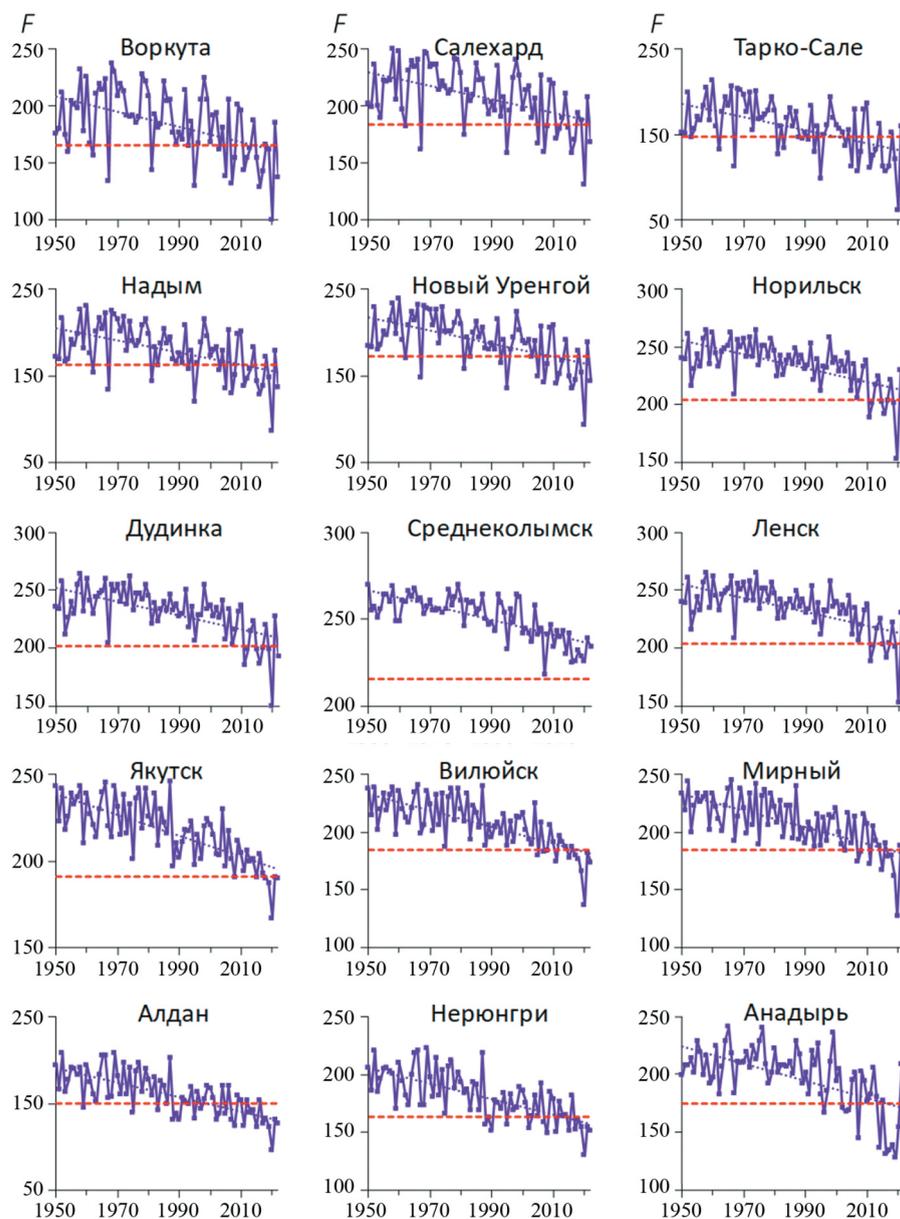


Рис. 3. Ежегодные расчетные значения несущей способности свайных фундаментов и линейный тренд за период 1950—2022 гг. в городах АЗРФ. Горизонтальными пунктирными линиями показаны критические значения F_{cr} для сооружений, построенных в 1960—1970-х годах.

ния критического уровня t_{cr} , рассчитанная по линейному тренду $F(t)$ для сооружений, построенных в 1960—1970-х годах.

Обсуждение и выводы

Работа выполнена в рамках научно-технических исследований Росгидромета. С 2020 г. в Росгидромете начали создавать государственную сеть

**Изменения температуры воздуха и несущей способности ММГ
в период 1950—2022 гг. в городах и поселках АЗРФ**

Город, поселок	Население, тыс. чел.	Тип ММГ	Температура воздуха, °С			Несущая способность		
			1951—1960	2013—2022	dT/dt , °C/10 лет	N_{cr}	dF/dt , %/10 лет	t_{cr}
Нарьян-Мар	29	О	-3,2	-1,5	0,30	34	7,5	1991
Воркута	68	С	-6,8	-4,9	0,33	18	4,0	2014
Салехард	49	П	-6,1	-4,2	0,34	14	3,3	2026
Надым	45	П	-6,3	-4,4	0,34	18	4,3	2010
Новый Уренгой	107	П	-7,2	-5,1	0,36	17	4,4	2009
Ноябрьск	101	О	-4,5	-2,6	0,34	29	6,7	1992
Тарко-Сале	20	П	-6,3	-4,2	0,36	21	5,3	2000
Норильск	174	С	-11,0	-8,4	0,41	7	2,9	2036
Дудинка	20	С	-10,1	-7,6	0,41	8	3,0	2035
Мирный	34	С	-9,5	-6,6	0,41	10	3,9	2017
Ленск	21	П	-8,5	-6,0	0,37	17	4,4	2009
Вилуйск	10	С	-9,6	-6,7	0,44	11	3,9	2017
Якутск	361	С	-10,4	-7,6	0,43	4	3,2	2028
Нерюнгри	54	О	-8,6	-6,7	0,33	15	4,1	2011
Алдан	21	П	-9,1	-6,8	0,39	24	5,5	1999
Магадан	90	П	-4,1	-2,1	0,30	17	4,2	2010
Анадырь	13	П	-7,5	-5,1	0,34	12	4,3	2016
Саскылах	2,3	С	-13,8	-10,8	0,46	1	1,5	2105
Тикси	4,4	С	-15,6	-13,0	0,42	0	0,9	2195
Верхоянск	0,76	С	-16,6	-13,9	0,43	0	0,2	2780
Среднеколымск	3,1	С	-12,7	-10,3	0,38	0	2,0	2068
Черский	2,6	С	-12,4	-10,1	0,36	0	1,8	2080
Певек	4,2	С	-12,5	-10,0	0,37	0	1,6	2091
Усть-Мая	2,5	С	-9,0	-6,6	0,39	10	3,7	2017
Олекминск	8,4	П	-7,1	-4,5	0,40	25	5,4	2001
Хатанга	2,6	С	-13,6	-10,4	0,50	2	1,9	2073
Тура	4,4	С	-10,3	-7,6	0,40	7	3,1	2030

Примечание. Пояснения приведены в тексте.

мониторинга ММГ на основе уже существующих метеостанций. К 2025 г. планируется оборудовать 140 термометрических скважин, в настоящее время их создано уже более 40 на арктических островах, в Восточной Сибири и в Горном Алтае. Этот новый для Росгидромета вид деятельности требует методического сопровождения, в том числе развития системы усвоения получаемых термометрических данных математическими моделями, совершенствования самих моделей ММГ и разработки алгоритмов их применения для решения актуальных аналитических и прогностических задач. Это создаст новое геокриологическое направление в системе климатического обслуживания населения, бизнеса, заинтересованных министерств и ведомств.

Такое направление является необходимым дополнением утвержденных Правительством Российской Федерации региональных планов адаптации к изменению климата, разработанных территориальными органами управления в соответствии с рекомендациями Минэкономразвития Российской Федерации. Анализ этих документов для регионов АЗРФ показал, что изменения ММГ рассматриваются административными органами как один из главных факторов риска для социально-экономической стабильности, в

первую очередь из-за негативного воздействия на инфраструктуру. Это в полной мере относится и к крупным компаниям топливно-энергетического и добывающего сектора, которым необходимо обеспечить устойчивое функционирование производственной инфраструктуры. Отсутствие количественной информационной базы о соотношении имевших место в исторический период и прогнозируемых на будущее изменений ММГ затрудняет разработку общей стратегии и конкретных мер адаптации. Полученные результаты позволяют отчасти восполнить этот пробел.

Главный вывод работы состоит в том, что прогнозируемые изменения ММГ для многих регионов и городов АЗРФ нельзя считать беспрецедентными. В Третьем оценочном докладе Росгидромета об изменениях климата [1] приведены прогнозные оценки расчетного индекса геокриологического риска, характеризующего в том числе и изменение несущей способности ММГ. Согласно этим данным, к середине XXI в. более 40% инфраструктурных объектов могут утратить запас устойчивости из-за деградации ММГ. Между тем, в 22 из рассмотренных 27 городов и населенных пунктов такие условия уже возникали в отдельные экстремальные годы. В 11 городах, расположенных в области сплошного и прерывистого распространения ММГ, число экстремальных лет N_{cr} за период 1950—2022 гг. изменялось от 12—17 (Салехард, Новый Уренгой, Ленск, Анадырь, Магадан) до 21—25 (Тарко-Сале, Алдан, Олекминск).

Еще один вывод состоит в том, что нужны новые критерии оценки климатических рисков, сочетающие информацию о прогнозируемых и ретроспективных величинах. В публикациях последних лет часто используют монетарные оценки, основанные на стоимости подверженной геокриологическому риску инфраструктуры. Не менее важной метрикой является социальный импакт-фактор. В нем нужно учитывать частоту неблагоприятных воздействий (N_{cr}), численность уязвимого населения и его адаптационный потенциал, зависящий от скорости происходящих изменений (dF/dt) и остаточного времени сохранения условий, достаточных для поддержания устойчивости инфраструктуры ($t - t_{cr}$).

В таблице впервые представлены оценки комплекса этих параметров. Они имеют справочный характер, поскольку отражают лишь фоновые климатообусловленные изменения устойчивости инфраструктуры. На практике при строительстве учитываются локальные геокриологические условия. При низкой сомкнутости ММГ в области их островного распространения преимущественно используется второй принцип строительства, когда здания возводятся на обычных фундаментах на участках, где мерзлота отсутствует. На слабых мерзлых грунтах часто применяют термостабилизирующие устройства (паро-жидкостные термосифоны), термоизолирующие технические покрытия и т. п. Такие технологии помогают изменить оценки времени существования сооружений. Это не снимает вопрос об их адаптации к изменению климата, а лишь дает дополнительное время на его решение.

Работа выполнена в Государственном гидрологическом институте в рамках целевой научно-технической программы исследований Росгидромета, направление 3 “Изучение изменения климата и его последствий”.

Литература

1. Анисимов О. А., Багина С. В. Инфраструктура в зоне многолетней мерзлоты. /В кн.: Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Под ред. В. М. Катцова. — СПб, Научное издание, 2022.
2. Анисимов О. А., Лавров С. А., Жирков А. Ф., Каверин Д. А. Модельная ассимиляция и реанализ геокриологических данных: постановка задачи и валидация модели для Европейского Севера и Восточной Сибири. — Метеорология и гидрология, 2020, № 4, с. 85—94.
3. Мельников В. П., Осипов В. И., Брушков А. В. и др. Адаптация инфраструктуры Арктики и Субарктики к изменениям температуры мерзлых грунтов. — Криосфера Земли, 2021, № 6 (25), с. 3—15.
4. Мельников В. П., Осипов В. И., Брушков А. В. и др. Оценка ущерба жилым и промышленным зданиям и сооружениям при изменении температур и оттаивании многолетнемерзлых грунтов в Арктической зоне Российской Федерации к середине XXI века. — Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2021, № 1, с. 14—31.
5. Оберман Н. Г., Шеслер И. Г. Прогнозирование деградации многолетнемерзлых пород (на примере Европейского Северо-Востока страны). — Разведка и охрана недр, 2009, № 7, с. 20—30.
6. Павлов А. В. Теплофизика ландшафтов. — Новосибирск, Наука, 1979, 282 с.
7. Порфирьев Б. Н., Елисеев Д. О., Стрелецкий Д. А. Экономическая оценка последствий деградации вечной мерзлоты под влиянием изменения климата для дорожной инфраструктуры в Российской Арктике. — Вестник Российской академии наук, 2019, № 12 (89), с. 1228—1239.
8. Порфирьев Б. Н., Елисеев Д. О., Стрелецкий Д. А. Экономическая оценка последствий деградации вечной мерзлоты для жилищного сектора российской Арктики. — Вестник Российской академии наук, 2021, № 2 (91), с. 105—114.
9. Свод правил СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88. — М., Министерство регионального развития Российской Федерации, 2012, 12 с.
10. Streletskiy D. A., Suter L., Shiklomanov N. I., et al. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost. — Environ. Res. Lett., 2019, vol. 14, No. 2; doi: 10.1088/1748-9326/aaf5e6.
11. Suter L., Streletskiy D., and Shiklomanov N. Assessment of the cost of climate change impacts on critical infrastructure in the circumpolar Arctic. — Polar Geography, 2019, vol. 42, No. 4, pp. 267—286; doi: 10.1080/1088937X.2019.1686082.

Поступила в редакцию 15 IV 2023 г., после доработки 19 VI 2024 г., принята к публикации 24 VI 2024 г.

RETROSPECTIVE ANALYSIS OF PERMAFROST BEARING CAPACITY DURING THE PERIOD OF INTENSIVE ARCTIC DEVELOPMENT (1950–2022)

O. A. Anisimov

The permafrost model is adapted to calculate the bearing capacity of the pile foundations of buildings according to the methodology adopted in engineering geocryology. Using retrospective calculations for 1950–2022, territories were identified where the bearing capacity incorporated in the design of the buildings was exhausted in extreme years, and the number of such years during the analyzed period was counted. The results showed that the predicted loss of the bearing capacity of foundations are not unprecedented for many regions and cities in the Russian Arctic. In 22 of the analyzed 27 cities and settlements, they occurred in selected extreme years. In 11 cities located in the continuous and discontinuous permafrost zones, the number of extreme years during 1950–2022 ranged from 12–17 (Salekhard, Novy Urengoy, Lensk, Anadyr, Magadan) to 21–25 (Tarko-Sale, Aidan, Olekminsk). Results of the study can be used to refine measures on the adaptation of infrastructure in the Arctic regions to climate change.