

Прикладные проблемы

УДК 624.139:551.578.468

doi: 10.31857/S2076673421030101

Влияние специфического режима снежных отложений на вечномёрзлые основания в городах криолитозоны (на примере Норильского региона)

© 2021 г. В.И. Гребенец*, В.А. Толманов

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*vgreb@inbox.ru

Influence of the specific regime of snow deposits on permafrost basements in the cities of the cryolithozone (by the example of the Norilsk industrial region)

V.I. Grebenets*, V.A. Tolmanov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

*vgreb@inbox.ru

Received January 30, 2021 / Revised May 6, 2021 / Accepted June 25, 2021

Keywords: *basements, foundations, deformations of constructions, mechanical redistribution of snow, properties of snow cover, permafrost, thermal insulation, sustainability.*

Summary

With increasing snowfalls and rising winter temperatures in the Arctic regions of Russia (against the background of almost the same summer values), the role of solid precipitation in the formation of the temperature and humidity regimes of seasonally thawed and upper horizons of permafrost grounds becomes extremely important. No regular observations of snow accumulation in built-up areas were conducted in the Arctic settlements. This article presents for the first time the results of snow measurements in urbanized areas of the Norilsk region, and assesses the warming effect of snow cover on the permafrost grounds and foundations. The problems that arise during the mechanical redistribution of snow are identified. In some areas the thickness of the snow cover (near the city of Norilsk) by the end of March can reach 200 cm; in February, the average monthly value for the last 15 years amounts 69 cm, and in the city the height of snow dumps ranges from 2 to 5 m. The warming effect of snow cover on the permafrost layer enhances as the snow height increases from 0 to 2–2.5 m, and then remains unchanged. Large masses of snow existing for many decades in almost the same places (together with the snow drifts of the air from the ventilated subfields) result in the development of degradation tendencies within the permafrost. A slight temperature rise was noted in grounds under 30–40% of the operated objects (as compared with the design values), which causes deformation of the structures.

Citation: Grebenets V.I., Tolmanov V.A. Influence of the specific regime of snow deposits on permafrost basements in the cities of the cryolithozone (by the example of the Norilsk industrial region). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2021. 61 (3): 457–470. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673421030101.

Поступила 30 января 2021 г. / После доработки 6 мая 2021 г. / Принята к печати 25 июня 2021 г.

Ключевые слова: *фундаменты, деформации конструкций, механическое перемещение снега, свойства снежного покрова, вечная мерзлота, теплоизолирующие свойства, устойчивость.*

Впервые проведены масштабные съёмки снегоотвалов на застроенных территориях в Норильске – крупнейшем городе в криолитозоне. Исследованы характер снегоотложения около объектов различной этажности, заносимость продухов холодных проветриваемых подполий в городской среде, оценено влияние снега в урбанизированной среде на температурный режим и несущую способность вмерзших фундаментов. 30–35% объектов инфраструктуры в районах города деформированы, одна из причин этого – условия снегонакопления в городах.

Введение

Сезонный снежный покров занимает около 80 млн км² поверхности суши Земли и распространяется практически на всю территорию России [1]. Во многом именно он определяет динамику ландшафтно-мерзлотных условий. На урбанизированных территориях криолитозоны формируется «новая реальность» мерзлотной обстановки, для которой характерно: коренное преобразование ландшафтов и соответственно изменение условий тепло- и массообмена в системе «вечная мерзлота».

На урбанизированных территориях криолитозоны формируется «новая реальность» мерзлотной обстановки, для которой характерно: коренное преобразование ландшафтов и соответственно изменение условий тепло- и массообмена в системе «вечная мерзлота».

та—атмосфера» через поверхность грунтов; повышение температуры пород в зоне их инженерного освоения; активизация опасных криогенных процессов [2]. Устойчивость инженерной инфраструктуры во многом определяется температурой вечномёрзлых оснований. Снежный покров и характер его отложений в городской среде — один из важнейших факторов, влияющих на термический режим грунтов [3]. Цель настоящей работы — исследование влияния специфического режима снежных отложений в пределах застроенных территорий на устойчивость объектов инфраструктуры, активизацию опасных криогенных процессов и динамику вечной мерзлоты с учётом климатических изменений в высоких широтах.

Сведения об особенностях снегоотложений в городах криолитозоны России приведены в ряде исследований [4–6]. Отметим, что даже вне распространения вечномёрзлых пород при длительном складировании снега на специальном полигоне образуются участки мёрзлых пород, существующие постоянно [7]. Это может способствовать развитию опасных экзогенных, в том числе и криогенных процессов. Настоящая работа основана на использовании комплексных (полевых, дистанционных, количественных) методов, что позволило достаточно хорошо изучить дифференциацию снега в различных природных и техногенно-модифицированных ландшафтах, получить характеристики снежной толщи, выявить воздействие снега на вечномёрзлые грунты (которые служат основаниями для строительства объектов инфраструктуры и в основном рассматриваются в настоящей работе в этом качестве) и активизацию криогенных процессов.

Исследования выполнены для Норильского региона. Выбор района связан с рядом значимых факторов: 1) район относится к одним из наиболее снежных в Арктике; 2) здесь случаются сильные ветры, особенно в зимнее время; 3) здесь проходит граница тундровой и лесотундровой зон, заметны мерзлотно-фациальная изменчивость, расчленённость рельефа; 4) для урбанизированной среды характерны разнотипность инфраструктуры, различная этажность объектов и плотность застройки (по нашей оценке — от 5–7 до 32–35%); 5) в криолитозоне отмечается максимальное механизированное перераспределение снега на застроенных территориях; 6) здесь достаточно хорошо изучены мерзлотные условия в основаниях объектов, а также

существует весьма полная сеть скважин для измерения теплового режима грунтов.

Исторический очерк

Проблемы, связанные со снегонакоплением на хозяйственно освоенных территориях, с особой остротой встали в период индустриального освоения («времена ГУЛАГа») Арктических регионов — с начала 1930-х годов. По свидетельству бывших заключённых Воркуты и «Норильлага» часто после тяжёлых смен в шахтах, на заводах, на так называемых «общих работах» тысячи заключённых отправлялись сверхурочно очищать дороги и стройплощадки от снега. Как вспоминают очевидцы, в очередную «чёрную пургу» в конце апреля 1940 г. на железной дороге «Норильск — Дудинка» протяжённостью около 70 км «...рвались провода. В воздухе летали крыши домов. Поезда встали. Составы занесло, станции тоже. Во мгле ржали кони, ревели моторы. Вдоль трассы потянулись колонны людей с лопатами. С ночи 28-е работали без отдыха, ночь, день и вторую ночь подряд... 29 апреля из Дудинки в Норильск пошли поезда» [8]. По архивным данным Норильского комбината в зиму 1953/54 г. только на железнодорожных путях региона было вручную убрано 6,4 млн м³ снега.

В 1940 г. заключённый «Норильлага» инженер Г.М. Потапов — его называли «Дед Снегодуй» — предложил устройства для снегозащиты железной дороги «Норильск—Дудинка» с помощью щитов (решётчатых наклонных заборов, приподнятых над землей), усиливающих снегоперенос в месте прокладки пути и обеспечивающих при метелях основное его накопление за пределами дороги [8]. Эта система стала широко применяться на разных трассах промрайона [9], однако до середины 1950-х годов не была известна в других северных регионах. В 1955 г. в Норильске было создано специализированное управление по снегоборьбе, которое начало оснащаться техникой (бульдозеры, самосвалы и др.) и вывозить снег с промышленных зон и частично из селитебных территорий на специально отведённые полигоны.

Первые снегомерные съёмки на промплощадках Норильского региона были выполнены в 1938–1940 гг. Эти измерения периодически повторяли. Так, для зимы 1954/55 г. было намече-

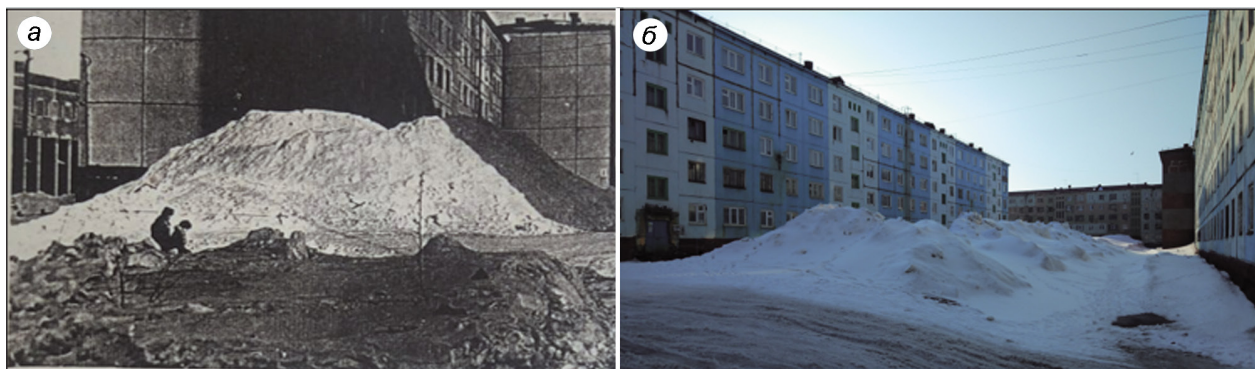


Рис. 1. Типичные снегоотвалы после механизированного перемещения.

Отвалы лежат в одном из микрорайонов г. Норильск (район ул. Ленинградская): а – 27 апреля 1986 г.; б – 3 мая 2019 г.

Fig. 1. Typical snow dumps after mechanized movement.

Norilsk microdistricts, Leningradskaya street: а – April 27, 1986; б – May 3, 2019

но 15,55 млн м³ объёма, подлежащего уборке [9]. В последующие десятилетия по мере расширения производства и роста поселений (Надеждинский металлургический завод, микрорайоны Талнах, Оганер и др.) объёмы вывозимого снега значительно выросли.

В Арктических регионах снег сильно влияет на условия строительства и эксплуатации различных объектов. Например, в среднем для Диксона на типичной стройплощадке из-за низких отрицательных значений температуры наружного воздуха актируются (прекращаются работы) 30 рабочих дней в году, а из-за снегозаносов и необходимой снегоуборки после пурги – 32 рабочих дня [10]. В Норильске под руководством лауреата Ленинской премии М.В. Кима впервые в мире были внедрены индустриальные методы устройства свай в вечной мерзлоте. При этом были разработаны методы расчёта и проектирования устройства этих фундаментов, которые с 1966 г. легли в основу национальных стандартов. Усовершенствованные версии этих нормативов действуют до настоящего времени [11]. В стандартах учтены состав и различные свойства грунтов, а также зависимость физико-механических параметров от температуры, однако не учтено влияние снежного покрова на устойчивость объектов в криолитозоне.

Методика исследований

Мы вели натурные наблюдения за режимом снегоотложений на урбанизированных территориях в Норильском регионе в 1980-е годы и в 2019 г.,

а также оценили влияние искусственно перемещённого снега на изменение мерзлотных условий.

В процессе полевых наблюдений регистрировался режим снегоотложений около зданий и сооружений в городах Дудинка и Норильск, проводились замеры температуры грунтов оснований зданий, отмечались зоны развития опасных криогенных процессов на примыкающих к объектам территориях, оценивался характер деформаций конструкций. По окончании зимних сезонов (начало снеготаяния приходится на конец апреля – начало мая, 1987 и 2019 г.) в селитебной части Норильска вели поквартальную снегомерную съёмку поверхности лавинным шупом и картографирование снегоотвалов (рис. 1) на застроенных территориях, по разрезу измеряли плотность и температуру снежной толщи через каждые 30 см.

Высоту снежного отвала измеряли в центральных частях, на склонах и у подножия снегоотвалов. Затем полученные данные осредняли с точностью до 0,5 м. Такая точность обусловлена тем, что в труднодоступных местах высоту отвалов определяли по отношению к деталям домов типовой застройки г. Норильск. Например, высота первого этажа дома серии К-69 составляет 3 м с учётом перекрытия, а цокольного ограждения холодных проветриваемых подполий – 1,8–2 м. Участки, занятые отвалами, наносились на планы кварталов с точностью до 0,5 м. Для анализа влияния урбанизированной среды на режим снегонакопления была определена плотность застройки как отношение площади, занятой стационарными зданиями (промышленными, жилыми и объектами соци-

ального назначения), к общей площади микро-района, квартала, поселения в целом.

В трёх опорных точках, две из которых расположены в г. Норильск, а одна — в тундре в 6 км от Талнаха, были проведены более детальные исследования снежного покрова. Плотность измерялась для снегоотвалов при помощи весового интегрального плотномера ВС-43, а по толще шурфов — с помощью «boxdensitycutter» — послойного плотномера. Температура наружного воздуха и снежной толщи по глубине измерялась с точностью до 0,1 °С. За весь период наблюдений (1938–2020 гг.) анализировалась метеорологическая информация в Норильске.

Для оценки влияния снегоотвалов на вечно-мёрзлые основания использованы результаты натурных наблюдений; выполнено также количественное моделирование — решение нестационарной тепловой одномерной задачи в программе Qfrost [12]. Расчёт проводился для суглинистого грунта (типичного для региона) при различных условиях снегоотложений — естественном (полученном по данным снегомерной съёмки) и при его увеличении до 1,5, 3 и 6 м. Входные исходные данные следующие: 1) физические и теплофизические свойства грунтов (состав, плотность, влажность, коэффициент теплопроводности, объёмная теплоёмкость, величина фазовых переходов); 2) глубина сезонного оттаивания на опытной площадке R-32 (Талнах) по результатам наших многолетних измерений; 3) среднемноголетняя температура наружного воздуха по месяцам и параметры изменения снежного покрова в течение зимнего периода по данным Норильской метеорологической обсерватории.

В первую очередь были заданы грунтовые условия и теплофизические характеристики отложений. В нашем случае использованы данные описания разрезов скважин из архивных данных НПО «Фундамент» (г. Норильск), из них выбирали характеристики грунта: литологический состав, суммарную влажность W_{tot} , плотность скелета ρ (суглинок тяжёлый, $W_{tot} = 0,2$, $\rho = 1,6 \text{ т/м}^3$). На основании этих параметров с использованием Свода правил [11] были вычислены: теплопроводность талого (1,33 Вт/(м·°С)) и мёрзлого (1,51 Вт/(м·°С)) грунтов; теплоёмкость талого (2,83 Дж/(м³·°С)·10⁻⁶) и мёрзлого (2,26 Дж/(м³·°С)·10⁻⁶) грунтов; величина фазовых переходов и температура начала замерзания $T_{bf} = 0,2$ °С. Первоначально модель калибро-

валась таким образом, чтобы при шаге расчётов в один день температура мёрзлой толщи и глубина сезонного оттаивания не изменялась бы более чем на величину, обусловленную изменением теплопроводности снега при известной плотности. Теплопроводность пересчитывалась по зависимости, предложенной Н.И. Осокиным и коллегами, которые обработали 20 эмпирических зависимостей из архивных и литературных источников [13]. Настройка модели проводилась следующим образом: температурный режим толщи рассчитывался на срок 100 лет; температура на уровне нулевых годовых амплитуд не менялась более чем на 0,1 °С; глубина сезонного оттаивания совпадала со средней по нашим многолетним наблюдениям на опытной площадке (район Талнаха) в рамках Международной программы мониторинга деятельного слоя (CALM). Расчёт воздействия снежного покрова разной высоты на вечно-мёрзлые грунты проводился на 30 лет вперёд.

Снегонакопление в Норильском регионе

Западная часть Таймыра относится к регионам повышенного снегонакопления. Этому способствует, во-первых, длительный (около девяти месяцев) холодный период; во-вторых, ослабление («остановка») циклонов, идущих с Атлантики, перед своеобразным барьером — Сибирским антициклоном. За последние 30 лет на заполярных территориях Сибири отмечаются положительные, статистически значимые изменения средней сезонной температуры воздуха за зимний период (октябрь—апрель) [14], что негативно сказывается на вечно-мёрзлых основаниях, так как повышается температура грунтов, увеличивается глубина сезонного оттаивания, снижается площадь смерзания ранее установленных фундаментов с мерзлотой.

В Норильском регионе средние многолетние значения из наибольших декадных высот снежного покрова изменяются от 80 до 150 см [15]. В природных условиях он устанавливается в конце сентября и залегает около 250 дней [16, 17]. При этом за счёт метелевого переноса и геоморфологических особенностей высота снежного покрова колеблется от 0,4–0,8 м (на плоских вершинах плато Путорана) до 10 м и более в ущельях и у подножий гор. Характерна даже для естественных условий относительно высокая плотность снега

(0,4–0,6 г/см³), что связано с мелкой структурой здешних снежинок и сильными ветрами. Особая роль – у процессов метелевого переноса и уплотнения. Так, среднее многолетнее число дней с метелями в Дудинке составляет 103, в Хатанге – 42, в Воркуте – 67, в Якутске – 11 и т.п. [18]. Большая часть региона относится к лавиноопасным; во врезанных долинах небольших рек, в теневых частях термоцирков часто залегают снежники-перелетки. По нашим наблюдениям, подобные снежники (и активизация нивации) начали формироваться после строительства в конце 1980-х годов автодороги «Норильск – аэропорт Алыкель» за счёт снегоочистки трассы. Они приурочены к ветровой тени на низкогорном участке Кайерканского тектонического вала; подобные образования отмечены в последние 20 лет вдоль автодороги «Дудинка – Норильск» при переходе через Дудинский вал. Согласно прогнозам, сделанным по ансамблю моделей, ожидается увеличение осадков в период до 2065 г. (прежде всего, твёрдых) на 10–15 мм, что, несомненно, вместе с ростом средних годовых температур в регионе, увеличит проблемы с режимом снегонакопления на застроенных территориях [19, 20].

Большая дифференциация снегонакопления наблюдается и в природных ландшафтах обширных долин. Так, высота снежного покрова (район Норильска) к концу марта на лесных участках может достигать 200 см, на закустаренных территориях – 60–80 см, на тундровых пространствах – 20–30 см [21]. К подобной сложной природной обстановке на застроенных площадках присоединяются проблемы, связанные с особенностями снегонакопления, его уборки и складирования. Температура вечномерзлых грунтов преимущественно супесчано-суглинистого состава, имеющих сплошное распространение (сквозные талики под наиболее крупными реками и озёрами, а также на территориях складирования отходов горно-металлургической промышленности), колеблется в широком диапазоне – от 0 до –6,5 °C [22].

Изменение условий снегоотложения на застроенных территориях

Застройка – искусственная преграда для метелевого переноса, она подвержена большой снегозаносимости: по данным В.М. Горбаче-

вой [4], снегомерные съёмки в Воркутинском районе, выполненные в разные годы, показали, что в черте города снега на 40–50% больше, чем в открытой тундре, а его высота изменяется от 0,1–0,3 м на площадях и мостовых до 3 м и более во дворах. Эти выводы, по нашей оценке, сделаны для небольших пришахтных посёлков, здания в которых выступают своеобразной «ловушкой» при метелевом переносе в тундре.

По результатам аэродинамических измерений в Воркуте у стен зданий с подветренной стороны («ветровая тень») скорость ветра составляет 20–25% её величины вне застройки, а на магистральных улицах, направление которых совпадает с направлением ветра, она возрастает на 20–30% [4]. На снегонакопление в городах сильно влияют плотность и тип (этажность, взаиморасположение объектов, разрывы между ними) застройки. Так, в Норильске в разрывах периметральной застройки шириной более 1,5 м и в раскрытых с наветренной стороны улицах скорость ветра (метелевый перенос) возрастает на 25–30%. При обтекании снеговетровых потоков кровли зданий они теряют 70–80% своей скорости, а по мере удаления от объектов (при отсутствии других препятствий) восстанавливают свою полевою скорость на расстоянии, в 14–18 раз большем, чем составляла высота самих объектов [5]. В то же время при малоэтажной (преимущественно одноэтажной, отдельные здания – двухэтажные) и редкой застройке на окраинах г. Якутск по результатам полевых исследований Г.В. Порхаева [23] фактически не отмечено отличий в направлении и скорости ветра от стандартных измерений в это же время на метеостанции.

Наши исследования распределения снегоотложений вокруг 19 различных объектов в г. Дудинка показали, что у 83% зданий основные скопления снега и занос продухов подполий наблюдаются с теневой (по отношению к ветрам юго-восточного направления в зимний период) стороны (рис. 2). При средней плотности застройки в Дудинке, равной 9% (в пределах 1-й и 2-й террас – 15%; I группа), в кварталах, где она выше, характер снегоотложений более хаотичный. Хорошо видно, что основное скопление снега приходится на подветренную сторону зданий. Весьма крупные сугробы формируются в тыловой части террасы (II группа), куда метелями сносится снег

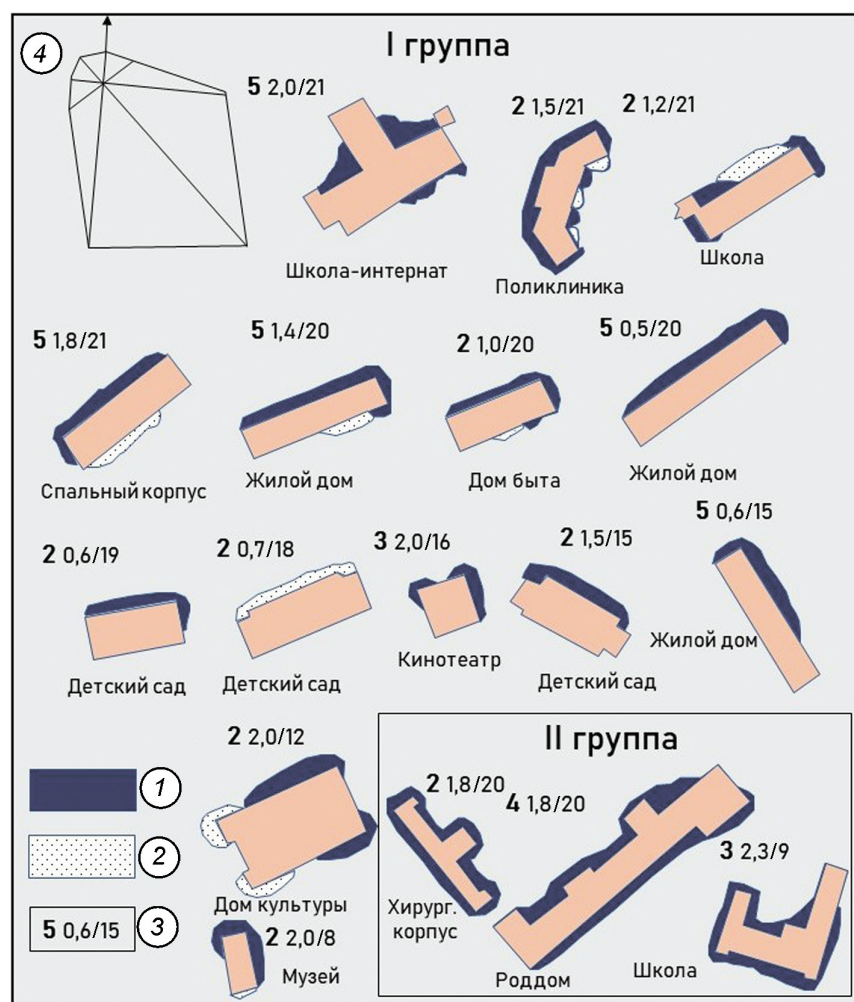


Рис. 2. Снегозаносимость участков вокруг зданий разной конфигурации и этажности.

① – зона постоянного снегозаноса; ② – зона периодической снегоочистки; ③ – этажность; максимальная высота снежного покрова, м; плотность застройки квартала, в пределах которого расположен объект, %; ④ – роза ветров в зимнее время, Дудинка;

I группа – участки 1-й и 2-й надпойменных террас, расположенные на более высоких отметках; II группа – тыловая (нижняя) часть террас, куда метелями сносится снег с весьма крутого уступа

Fig. 2. Snow accumulation of areas around buildings of different geometry and number of storeys.

① – zone of constant snow drifts; ② – zone of periodic snow removal; ③ – number of storeys; maximum snow thickness, m; building density of the quarter within which object is located, %; ④ – wind rose in winter, Dudinka;

Group 1 – areas of I and 2 terraces located at higher elevations; II group – the rear (lower) part of the terraces, where snow is blown away from a steep scarp by blizzards

с весьма крутого уступа к следующему уровню. Наблюдения показали, что снегоочистка весьма нерегулярна, выполняется преимущественно со стороны уличных тротуаров и частично – возле подъездов. Скопление снега в ветровой тени зданий существенно повышает температуру вечно-мёрзлых грунтов, способствует переувлажнению периферийных фундаментов, активизирует морозную деструкцию их материала.

При механизированном перемещении снега на застроенных территориях нарушается выявленная С.А. Сократовым и Р. Барри [24] пятитадийность влияния снежного покрова на подстилающие мёрзлые грунты: начало промерзания сезонно-талого слоя; процесс промерзания; стабильность в мёрзлом состоянии; период таяния снега при сохранении мёрзлого состояния; начало таяния грунтов с сохранением редких фрагментов снежных отложений. На городской территории под снегоотвалами в

Норильском регионе промерзание может продолжаться весь холодный период (в природных территориях – до начала декабря). Перераспределение снежных отложений изменяет условия теплообмена на различных участках населённого пункта, а температурный режим грунтов на всей его территории становится ещё более дифференцированным по сравнению с природными условиями. Характерно повышение среднеинтегральной (средневзвешенной по площади застройки) средней годовой температуры поверхности грунтов. Например, в селитебной части Норильска по нашим наблюдениям к концу XX в. она составляла $-2,6^{\circ}\text{C}$, тогда как в 1940 г. (до застройки) этот показатель оценивался равным -3°C [21]. т.е. город как бы переместился в более южные широты.

Исследованиями в начале мая 2019 г. на селитебной территории Норильска установлено, что около 600 отвалов (рис. 3) имеют высоту от

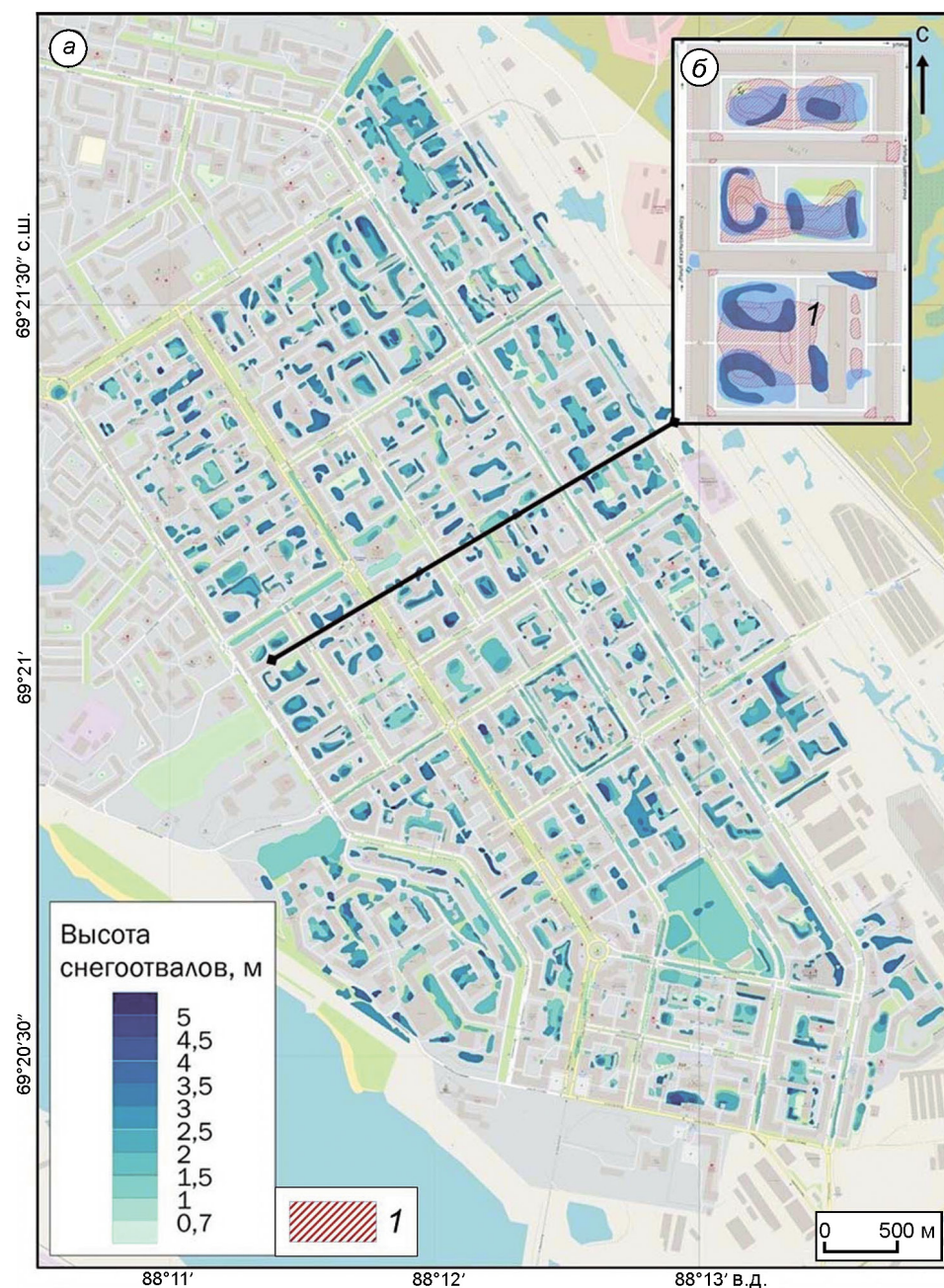


Рис. 3. Картограмма механизированных снегоотвалов на территории г. Норильск:

a – карта снегоотвалов для основной жилой части, 2019 г.; *б* – квартал, район улиц Комсомольская и Завенягина, где отвалы существуют долгое время на одном месте. *1* – съёмка, апрель 1987 г., изолинии проведены через 1,5 м

Fig. 3. Schematic map of mechanized snow dumps on the territory of Norilsk:

a – a map of snow dumps for the main residential part, 2019; *б* – a block, the area of Komsomolskaya and Zavenyagina streets, where the dumps have been in one place every winter for a long time. *1* – investigations conducted in April, 1987, isolines drawn every 1.5 m

2,5 м и более. Они занимают большие площади. Их расположение и высота в пределах жилой зоны Норильска весьма хаотичны и определяются в основном схемами снегоуборки, наличием свободных пространств во дворах и их размерами. Снегоотвалы в городской среде к

концу апреля 2019 г. достигали часто 3–5 м, а на коллекторах, проложенных посередине улиц, – 2–2,5 м. В естественных условиях по данным Норильской гидрометобсерватории высота снега в это время составляла 70 см. Подобное изменение режима снежных отложений на застроенной

территории сильно снижает зимнее охлаждение этих участков, негативно воздействует на температурный режим грунтов и существенно уменьшает несущую способность замороженных свай. Теплообмен происходит не только через поверхность, но и за счёт притока тепла от участков, где фактически всю зиму лежит снег, к вечномерзлым основаниям под зданиями с холодными проветриваемыми подпольями.

По нашим расчётам, количество снега, необходимого для вывоза только с селитебной территории Норильска (без учёта обширных промзон, а также отдельных микрорайонов — Оганёр, Кайеркан, Талнах), в настоящее время колеблется от 3 до 5 млн м³ в зависимости от снежности года. Число «КАМАЗов» (расчёт проводился для кузова вместимостью 10 м³), необходимых для вывоза снега с селитебной части Норильска (площадь — 4 км²), составляет от 230 до 530 тыс. за зимний сезон. Естественно, что подобные объёмы чрезвычайно велики, поэтому основная масса снега складывается во дворах, на поверхностях коллекторов для подземных коммуникаций, на обочинах автодорог; кроме того, создают огромные снегоотвалы. Периодически сходящие с кровель зданий обвалы снега, а также эпизодические снегочистки крыш вызывают избыточное его накопление по периметру объектов, что существенно способствует отеплению мерзлоты и снижению несущей способности периферийных (как правило, наиболее нагруженных) замороженных свай.

Сравнительный анализ результатов 1987 и 2019 г. показывает, что в соответствии с особенностями планировки и технологическими приёмами снегоочистки мощные отвалы существуют практически каждую зиму фактически на одних и тех же местах (см. рис. 3, б). Наши наблюдения показали, что в условиях планировки закрытых и защищённых от ветра дворов происходит повышенное (по сравнению с улицами) снегонакопление, которое свойственно также и участкам в ветровой тени зданий.

Особенности снежного покрова

Характер зимнего охлаждения мерзлых грунтов во многом зависит от высоты и плотности снежных отложений. Плотность измеряли в трёх точках: 1) на участке складирования снега после

очистки мостовых (сквер у Дворца культуры в Норильске); 2) в естественных условиях тундры (район Талнаха); 3) на площадках с механизированным переуплотнением и формированием наиболее крупных снегоотвалов (двор по улице Талнахская в Норильске). Для последнего случая характерно многократное силовое воздействие тяжёлой техники на снежный отвал; точечные измерения интегральной плотности плотнометром ВС-43 показали, что её значения в таких условиях могут достигать 350–380 кг/м³. Результаты исследования снежного покрова в центре Норильска и в тундре приведены на рис. 4, из которого видно, что часто в нижних горизонтах техногенно-перемещённого снега формируются горизонты аномального разрыхления, а на контакте с поверхностью — ледяная корка; визуально отмечены фрагменты консолидированных ледяных и переуплотнённых снежных включений — результат очистки мостовой. В нижней части разреза плотность снега в период снеготаяния достигает 500 кг/м³. Это объясняется наличием большого количества включений шлака (отходы плавильных цехов с большим содержанием железа и тяжёлых металлов), который применяется в регионе для борьбы с гололёдом на тротуарах и дорогах. При снегоочистке большое количество шлака попадает в отвалы; на рис. 4 этим горизонтам соответствуют тёмные прослойки.

Измерения температуры в толще снега в естественных условиях показали, что к концу зимнего периода происходит определённое уменьшение её градиента. Например, на поверхности снега температура составляет –2,8 °С, на глубине 60 см она равна –3,4 °С, а на контакте с грунтом — на глубине 0 см — увеличивается до –2,4 °С. Проникновение «волн» холода или тепла и теплоизолирующие свойства снега во многом связаны с альбедо поверхности. Особенно заметно уменьшение альбедо поверхности снега в промышленных районах. Так, непосредственно рядом с г. Воркута альбедо составляло 0,38, а на достаточном удалении от города и шахт, в тундре в это же время — 0,75 [3]. Сход снега в городе происходит на несколько дней раньше, чем в окрестностях. Выбросы загрязнителей, прежде всего пыли в атмосферу, могут способствовать изменению не только альбедо, но и физико-химических свойств снега. Заводами Норильска ежегодно в атмосферу выбрасывалось около 2 млн т

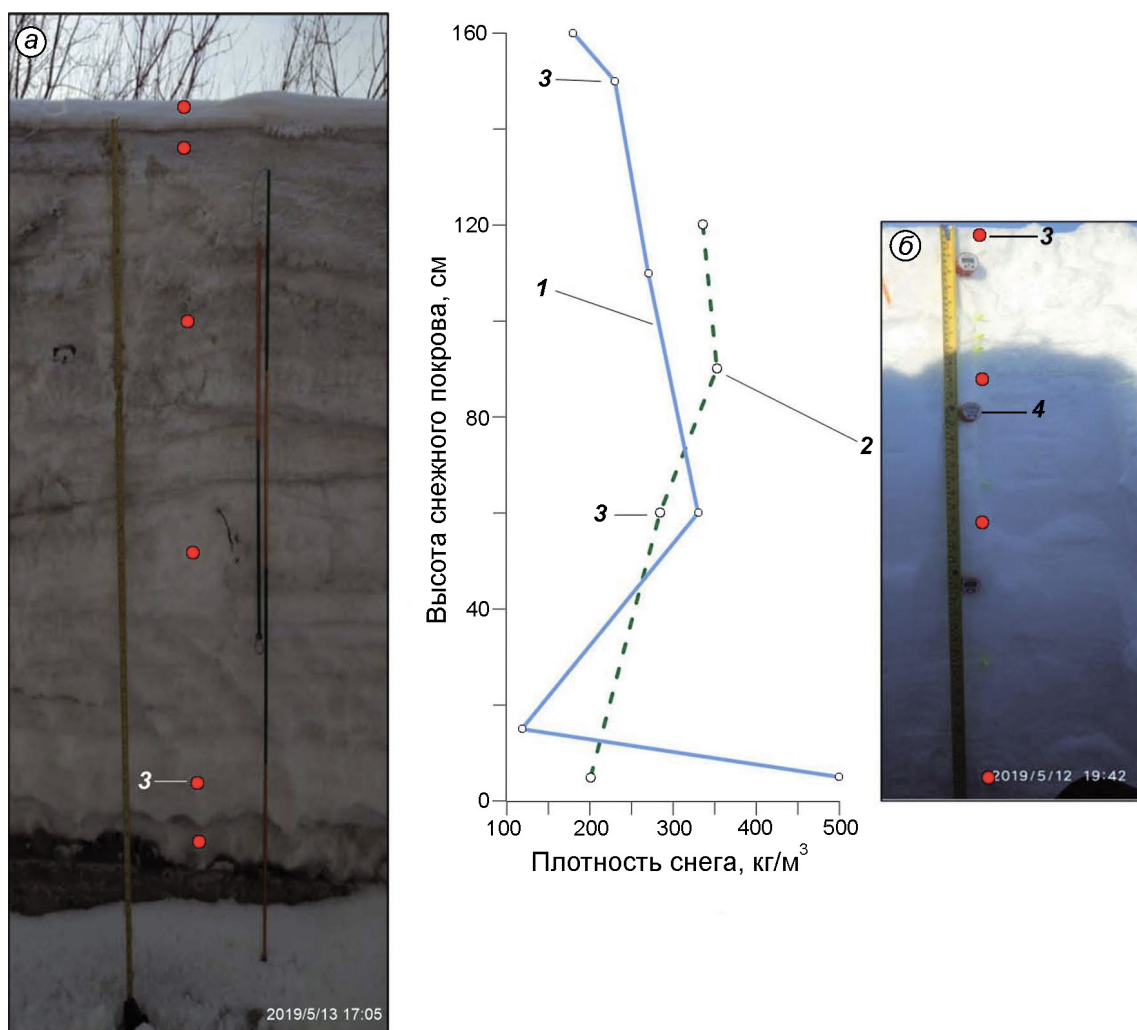


Рис. 4. Результаты исследования снежного покрова:

a – отвал, перемещённый на газон при очистке мостовой, Комсомольская площадь, центр Норильска; *б* – естественные условия накопления, тундровое пространство, район Талнаха. 1 – плотность снега при механическом перераспределении; 2 – то же, в естественных условиях тундры; 3 – точки отбора проб снега; 4 – термометрические датчики

Fig. 4. Results of the study of the snow cover:

a – a dump on the lawn (the result of cleaning of the pavement), Komsomolskaya Square, the center of Norilsk; *б* – natural conditions of accumulation, tundra space, Talnakh region. 1 – snow density during mechanical redistribution; 2 – the same, in natural conditions of the tundra; 3 – points of sampling of snow; 4 – thermometric sensors

диоксида серы, а также более 100 кг/км² в сутки пыли на территории городов и промышленных объектов региона [15]. Более раннее снеготаяние на застроенных территориях, в том числе на очищенных от снега участках, вызывает отепление и протаивание сезонно-талого слоя, глубина которого согласно нашим измерениям часто на 20–50% больше, чем в природных условиях данного региона [25]. Увеличение глубины деятельного слоя иногда вызывает развитие термокарста и фактически повсеместно усиливает негативное воздействие на фундаменты и асфальтобетонные

покрытия морозного пучения при промерзании сезонно-оттаивающих грунтов.

Подтопление поверхности грунтов и переувлажнение сезонно-талого слоя

На урбанизированных территориях снеготаяние вызывает серьёзные проблемы с подтоплением, так как при наличии вечной мерзлоты устройство так называемой «ливневой» канализации способно вызвать развитие термокар-

ста и термоэрозии. Подобную роль в пределах селитебных частей поселений играют подземные коллекторы для инженерных коммуникаций, переобводнение которых активизирует ряд опасных криогенных процессов, а также вызывает преждевременный их износ. Часто на месте мощных снегоотвалов, где близко к поверхности залегают подземные льды или сильно льдистые грунты, в течение 3–5 лет могут формироваться просадки грунтов за счёт термокарста, при этом провалы асфальто-бетонных покрытий за 2–3 года могут достигать глубины 1 м, что требует постоянных ремонтов. Отметим, что переувлажнение грунтов сезонно-талого слоя за счёт больших затрат на фазовые переходы с началом зимы способствует их очень медленному промерзанию или сохранению непромёрзших зон под мощными снегоотвалами. Подтопление в период паводков нарушает нормальную эксплуатацию карьеров по добыче руды, угля, инертных материалов, а затраты на откачку нередко сопоставимы со стоимостью устройства подъездных путей к карьерам или превышают их.

Изменение температурного режима грунтов и несущей способности вмороженных фундаментов

Известно, что безопасность объектов в криолитозоне связана с устойчивостью вмороженных фундаментов, несущая способность которых зависит главным образом от температуры [11]. Полевые наблюдения показали, что удаление снежного покрова приводит к быстрому снижению температуры мёрзлых грунтов. Так, в первый же год после начала эксперимента температура на глубине 1 м в Воркуте понизилась на 2 °С, а в Игарке — на 5 °С (здесь бóльшая высота снега, меньше его плотность в связи с более слабыми ветрами, ниже температура наружного воздуха) [23]. Наши натурные наблюдения показали, что одни из самых неблагоприятных факторов — нарушение условий аэрирования подполий за счёт полных или частичных снегозаносов продухов для вентилирования, а также недостаточное число последних. Установлено, что у 40% обследованных зданий в г. Дудинка площадь продухов меньше требуемой на 6–47%, что способствует развитию деградационных тенденций в мёрзлых тол-

щах. Так, в центре подполья Дома культуры в Дудинке (площадь продухов составляет всего 53% от требуемой) температура имеет отрицательные значения только, когда снаружи –27, –30 °С. В среднем, по 30 обследованным объектам Дудинки в центре подполий температура на 40%, а на периферии на 30% выше, чем температура наружного воздуха. Как правило, на обследованных объектах 45% площади продухов занесены снегом уже к началу декабря, а 60% — к началу марта. Негативную роль играет инееобразование на решетках продухов, существенно снижающее эффективность вентилирования.

Недостаточное число продухов для вентилирования и их снегозаносимость существенно снижают эффективность действия холодных проветриваемых подполий, которые не обеспечивают при этом охлаждающее воздействия на основания объектов. Полевые исследования в регионе выявили существенное количество подобных ситуаций, а примером может служить обстановка в вечномерзлых грунтах основания школы-интерната г. Дудинка (рис. 5). Скопление снега в ветровой тени зданий существенно повышает температуру вечномерзлых пород. На этом участке за восемь лет существования здания температура пород в мёрзлом суглинке слоистой текстуры, повысилась вдвое (см. рис. 5). Мы использовали значения температуры, измеренные на уровне нулевых годовых амплитуд, куда не доходят сезонные колебания. Это означает, что при неизменных условиях значение данной температуры постоянное, поэтому её изменение отражает изменения, происходящие в мёрзлой толще. Для площадки здания был выполнен расчёт несущей способности вмороженных свай с помощью методики СП [11] (табл. 1). Он показал, что на территории снегозаноса наблюдается уменьшение зоны смерзания боковой поверхности свай с вечномерзлыми грунтами, повышение температуры на глубине 7 м (максимум заложения свай) на 3 °С по сравнению с проектными расчётными значениями, что привело к уменьшению несущей способности более чем вдвое. Нагрузка на фундаменты от пятиэтажного кирпичного здания осталась прежней (от 100–110 до 120–140 т на сваю), что вызвало заметную деформацию стен и перекрытий.

Численное моделирование влияния снега на температуру вечномерзлых грунтов на глубине

Таблица 1. Расчёт изменения несущей способности вмо-
роженной сваи в основании здания школы-интерната
г. Дудинка за восемь лет функционирования объекта

Характеристики	10.10.1978 г.	13.09.1986 г.
Глубина заложения сваи, см, сечением 30×30 см; площадь торца $A = 900 \text{ см}^2$	700	700
Глубина сезонного оттаивания $d_{\text{от}}$, см	140	190
Площадь смерзания боковой поверхности $A_{\text{бф}}$, см^2	67 200	61 200
Эквивалентная температура по глубине заложения T_e , $^{\circ}\text{C}$	-2,4	-0,9
Температура под подошвой фундамента T_m , $^{\circ}\text{C}$	-4,8	-1,8
Сопротивление сдвигу по поверхности смерзания $R_{\text{бф}}$, кг/см^2	2,75	1,4
Расчётное давление под торцом сваи R , кг/см^2	18,5	12,5
Несущая способность F_u , кг	201 450	96 930

10 м (уровень нулевых годовых сезонных колебаний) проводилось на 30-летний срок. Расчитанные теплофизические характеристики снега приведены в табл. 2; теплофизические пара-

Таблица 2. Рассчитанные теплофизические характеристики для разреза, расположенного в природных условиях

Месяц	Толщина снежного покрова, см	Плотность P , г/см^3	Теплопроводность снега λ , $\text{Вт/(м}^2\cdot^{\circ}\text{C)}$	Термическое сопротивление снега R_s , $\text{м}^2\cdot\text{K/Вт}$
Октябрь	10	0,1	0,12	0,86
Ноябрь	21	0,2	0,15	1,39
Декабрь	40	0,2	0,15	2,64
Январь	56	0,3	0,36	1,56
Февраль	69	0,36	0,4	1,72
Март	71	0,35	0,4	1,77
Апрель	72	0,34	0,4	1,82
Май	69	0,31	0,4	2,22

метры вечномерзлых грунтов – в разделе «Методика». В качестве начального значения высоты снега принята величина 0,7 м (результаты измерений Норильской метеорологической обсерватории 30.04.2019 г. в естественных условиях). На этом этапе моделирования показатели плотности снега с увеличением его высоты приняты равными таким показателям в природных условиях (см. рис. 4). Согласно результатам расчё-

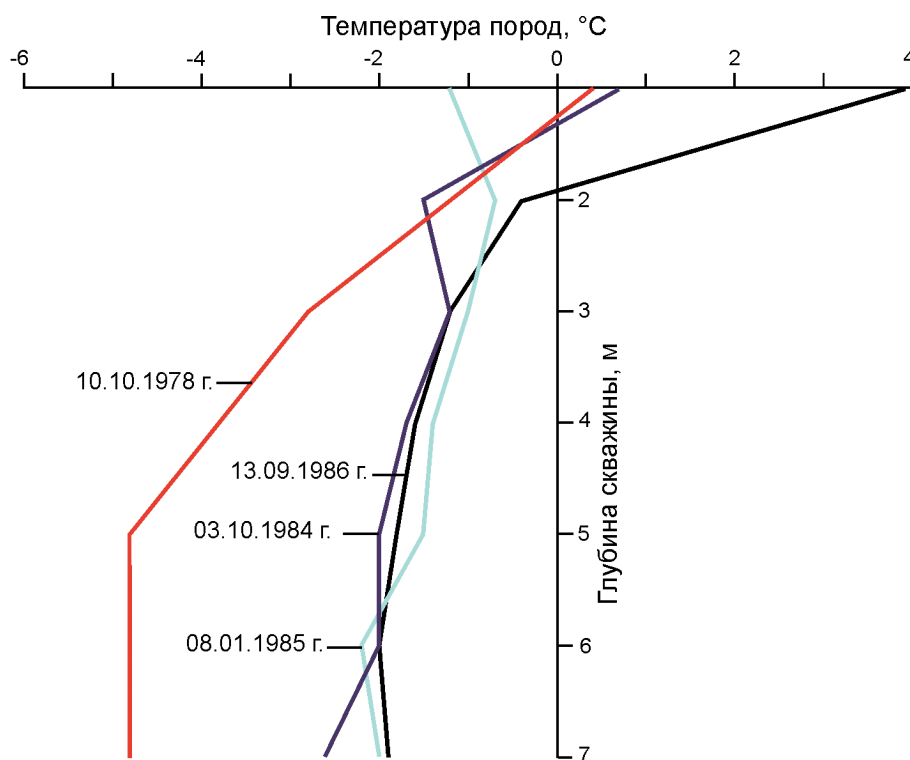


Рис. 5. Изменение температуры в грунтовом основании здания школы-интерната г. Дудинка в течение восьми лет эксплуатации на участке снеготаноса

Fig. 5. Changes in thermal state of the permafrost basement. School in Dudinka during 8 years of operation in the area of snowdrift.

тов температуры грунтов, установлено, что меняется она практически экспоненциально: при увеличении высоты снега с 0,7 до 1,5 м температура грунтов повышается на 2,5 °С; при увеличении её до 2 м — на 2,75 °С, а при увеличении до 4 м и более практически остаётся неизменной. У 1/3 обследованных зданий в Дудинке, Талнахе и Норильске за счёт повышения температуры вечномёрзлых оснований и увеличения глубины сезонного протаивания несущая способность снизилась в среднем на 25–30%, что вызвало существенное развитие деформаций.

Таким образом, именно влияние снеготаносов на температурный режим вечномёрзлых пород на застроенных территориях Норильского промышленного района можно оценить как один из основных факторов, вызывающих деградиационные тенденции в основаниях инженерных объектов.

Заключение

Существенную роль в свойствах вечномёрзлых грунтов оснований объектов, а также в состоянии подземных и надземных конструкций играет модифицированный (по сравнению с природными условиями) режим снежных отложений: механизированное перераспределение; создание при застройке особых участков повышенного снеготаноса в ветровой тени объектов; физико-химические воздействия за счёт накопления загрязняющих веществ и пыли; изменение альбедо. Повышенное снеготаносение способствует значительному подтоплению различных элементов городской структуры, переобводнению холодных проветриваемых подполий, усилению морозной деструкции (криогенному выветриванию) материалов подземных и надземных конструкций.

Установлены основные особенности снеготаносения на застроенных территориях в населённых пунктах Норильского региона. В большинстве случаев зоны снеготаносов располагаются в теневой (по отношению к господствующим ветрам) стороне зданий. Механизированно-перемещённые снеготаносы могут достигать в высоту 4–5 м; в течение многих лет они располагаются на одних и тех же местах, в основном во дворах внутри кварталов. Фор-

мирование таких снежных массивов оказывает отепляющую роль как на локальном уровне (повышение температуры соседних зданий и сооружений), так и в целом на тепловой режим основания северного города.

Для городской среды Норильска режим существующего снеготаносения, прежде всего, создание искусственных снеготаносов рядом со зданиями и сооружениями, а также снижение эффективности действия холодных проветриваемых подполий при снеготаносах продухов, способствует повышению температуры вечномёрзлых оснований и уменьшает несущую способность замороженных фундаментов, которая часто изменяется в негативную сторону в 1,5–2 раза от проектных значений. Всё это вызывает деформации конструкций, что характерно для трети объектов в регионе. Повышенное снеготаносение на застроенных территориях активизирует опасные криогенные процессы, прежде всего, развитие термокарста, термоэрозии и морозного пучения в увеличивающемся по глубине сезоннотаносе. Выполненное численное моделирование показало, что для Норильского региона отепляющее влияние снежного покрова на вечномёрзлые грунты возрастает при увеличении его высоты от 0 до 2 м, после 2–2,5 м теплоизоляционный эффект не изменяется.

Снеготаносы, их зависимость от господствующих зимой ветров, а также особенности складирования снега на застроенных площадках необходимо учитывать при геофизиологических прогнозах на осваиваемых территориях, расчётах эффективности холодных проветриваемых подполий, проектировании расположения зданий и назначении высоты отверстий (продухов) для аэрирования. Безусловно, активная снегоуборка в максимально холодные периоды (ноябрь–февраль) будет способствовать понижению температуры вечной мерзлоты и снижению негативных деградиационных тенденций в северных городах.

Благодарности. Исследования поддержаны грантом РФФИ № 18-05-60080 «Опасные нивально-гляциальные и криогенные процессы и их влияние на инфраструктуру в Арктике». Авторы выражают благодарность руководству и сотрудникам Норильской метеобсерватории за любезно предоставленные данные о климатических характеристиках региона.

Acknowledgments. Supported by RFBR grant № 18-05-60080 «Dangerous nival-glacial and cryogenic processes and its influence on the infrastructure of the Arctic. Au-

thors are grateful to the management and staff of the Norilsk meteorological observatory for the kindly provided data on the climatic characteristics of the region.

Литература

References

1. Котляков В.М. Мир снега и льда. М.: Наука, 1994. 286 с.
2. Grebenets V.I. Geocryological-geoecological problems occurring in urbanised territories in Northern Russia and methods for improvement of foundations // Proc. of the Eight Intern. Conf. on Permafrost, Zurich, Switzerland, July 21–25. 2003. № 1. P. 303–307.
3. Хрусталева Л.С. Температурный режим вечномёрзлых грунтов на застроенной территории. М.: Наука, 1971. 168 с.
4. Горбачева В.М. Город в Заполярье и окружающая среда. Л.: Стройиздат, Ленингр. отделение, 1984. 100 с.
5. Назарова Л.Г., Полуэктова В.Е. Опыт проектирования и строительства городов Крайнего Севера (на примере Норильска). М.: Стройиздат, 1972. 176 с.
6. Нутевекет М.А., Трегунов О.Д. Экзогенные процессы в городской среде как индикаторы состояния оснований фундаментов в криолитозоне // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации. Материалы XV Общероссийской науч.-практич. конф., М.: Геомаркетинг, 2019. С. 239–243.
7. Лобкина В.А., Генсировский Ю.В., Ухова Н.Н. Геоэкологические проблемы участков, занятых снежными полигонами в городах // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2016. № 6. С. 510–520.
8. Колпаков М.Л., Лебединский В.Н. Формула Завенягина. Тула: Приокское книжн. изд-во, 1985. 207 с.
9. Колобаев А.Ф. Снегозащита и снегоборьба на территории Норильского комбината // Сб. докл. науч.-технич. конф., посвящ. 20-летию проектной конторы Норильского комбината / Под ред. Г.А. Борисова и др. Норильск: Типография Норильского комбината, 1958. С. 135–147.
10. Березовский Б.И. Строительное производство в условиях Крайнего Севера. Л.: Стройиздат. Ленингр. отделение, 1982. 183 с.
11. СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04–88. Москва, 2012. 117 с.
12. Электронный ресурс: <http://qfrost.net>.
13. Осокин Н.И., Сосновский А.В. Пространственное распределение термического сопротивления снежного покрова на территории России и его влияние на промерзание и протаивание грунтов // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. № 1. С. 52–60. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-1-52-60>.
1. Kotlyakov V.M. *Mir snega i l'da*. World of snow and ice. Moscow: Nauka, 1994: 286 p. [In Russian].
2. Grebenets V.I. Geocryological-geoecological problems occurring in urbanised territories in Northern Russia and methods for improvement of foundations. Proc. of the Eight Intern. Conf. on Permafrost, Zurich, Switzerland, July 21–25. 2003, 1: 303–307. [In Russian].
3. Hrustalev L.S. *Temperaturnyj rezhim vechnomerzlykh gruntov na zastroennoj territorii*. Thermal regime of permafrost in the built-up area. Moscow: Nauka, 1971: 168 p. [In Russian].
4. Gorbacheva V.M. *Gorod v Zapolyar'e i okruzhayushchaya sreda*. City in the Arctic and the environment. Leningrad: Strojizdat. Leningr. otделение, 1984: 100 p. [In Russian].
5. Nazarova L.G., Poluektov V.E. *Opyt proektirovaniya i stroitel'stva gorodov Krajnego Severa (na primere Noril'ska)*. Experience in the design and construction of cities in the Far North (by the example of Norilsk). Moscow: Strojizdat, 1972: 176 p. [In Russian].
6. Nuteveket M.A., Tregubov O.D. Exogenous processes in the urban environment as indicators of the state of the foundations in the permafrost zone. *Materialy XV Obshcherossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Perspektivy razvitiya inzhenernykh izyskanij v stroitel'stve v Rossijskoj Federacii»*. Materials of All-Russian scientific and practical conference «Perspectives of the development of Engineering surveys in the construction in Russia». Moscow: Geomarketing, 2019: 239–243. [In Russian].
7. Lobkina V.A., Gensirovskij YU.V., Uhova N.N. Geocological problems of areas occupied by snow polygons in cities. *Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*. Engineering Geology, Hydrogeology, Geocryology. 2016, 6: 510–520. [In Russian].
8. Kolpakov M., Lebedinskij V. *Formula Zavenyagina*. Zavenyagin Formula. Tula: Priokskoe knizhnoe izdatelstvo, 1985: 207 p. [In Russian].
9. Kolobaev A.F. Snow protection and mitigation methods from snow on the territory of the Norilsk Combine. *Sb. dokl. Nauchn.-tekhnich. konferencii, posvyashchen. 20-letiyu proektn. kontory Noril'sk.kombinata*. Collection of reports of the scientific and technical conf. dedicated to the 20th anniversary of the design office of the Norilsk Combine. Eds.: G.A. Borisova et al. Noril'sk: Tipograf. Noril. kom-ta, 1958: 135–147. [In Russian].
10. Berezovskij B.I. *Stroitel'noe proizvodstvo v usloviyah Krajnego Severa*. Construction production in the Far North. L.: Strojizdat. Leningr. otделение, 1982: 183 p. [In Russian].
11. *SP 25.13330.2012 Osnovaniya i fundamenti na vechnomerzlykh gruntah. Aktualizirovannaya redakciya SNiP 2.02.04-88*. Basements and foundations on permafrost soils. Updated edition of SNiP 2.02.04-88. Moscow, 2012: 117 p. [In Russian].
12. <http://qfrost.net>.
13. Osokin N.I., Sosnovskij A.V. Spatial distribution of the snow thermal resistance on the Russian territory and its impact on the ground freezing and thawing. *Led i*

14. Максютова Е.В., Башалханова Л.Б. Суровость современного климата в Сибирском Заполярье // Лёд и Снег. 2019. Т. 59. № 2. С. 258–266. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-2-402>.
15. Заболотник С.И. Причины широкого распространения таликов в Приенисейском Заполярье // Наука и техника в Якутии. 2019. № 2 (37). С. 3–7.
16. Савченко В.А. Экологические проблемы Таймыра. М.: СИП РИА, 1998. 194 с.
17. Электронный ресурс: <https://rp5.ru/>. Метеорологический архив RP5.
18. Справочник по строительству на вечномёрзлых грунтах / Под ред. Ю.Я. Велли, В.В. Докучаева и Н.Ф. Федорова. Л.: Стройиздат, Ленингр. отделение, 1977. 552 с.
19. Кислов А.В., Гребенец В.И., Евстигнеев В.М., Конисhev В.М., Сидорова М.В., Суркова Г.В., Тумель Н.В. Последствия возможного потепления климата в XXI веке на севере Евразии // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 2011. № 3. С. 3–8.
20. Суркова Г.С. Климатические ресурсы Европейской России и Западной Сибири в первой половине XXI века // Климатические ресурсы Европейской России и Западной Сибири в первой половине XXI века / Под ред. Н.С. Касимова и А.В. Кислова. М.: МАКС Пресс, 2011. С. 118–157.
21. Шевелева Н.С., Хомичевская Л.С. Геокриологические условия Енисейского севера. М: Наука, 1967. 127 с.
22. Гребенец В.И. Формирование специфических природно-техногенных комплексов в Норильском промышленном районе // Материалы Второй конф. геокриологов России. 6–8 июня 2001 г. Т. 4. Инженерная геокриология. М.: Изд-во МГУ, 2001. С. 59–65.
23. Порхаев Г.В., Щелоков В.К. Прогнозирование температурного режима вечномёрзлых грунтов на застраиваемых территориях. Л.: Стройиздат, 1980. 112 с.
24. Sokratov S.A., Barry R.G. Intraseasonal variation in the thermoinsulation effect of snow cover on soil temperatures and energy balance // Journ. of Geophys. Research. 2002. V. 107 (D10). P. 1–6. <https://doi.org/10.1029/2001JD000489>.
25. Демидюк Л.М. Распространение, мощность и температурный режим мерзлых и талых пород. Геокриологические условия Енисей-Путоранского региона // Геокриология СССР. Средняя Сибирь / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1989. С. 173–176.
- Sneg. Ice and Snow. 2016, 56 (1): 52–60. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-1-52-60>. [In Russian].
14. Maksyutova E.V., Bashalkhanova L.B. Severity of the present-day climate in the Polar regions of Siberia. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2019, 59 (2): 258–266. [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-2-402>.
15. Zabolotnik S.I. Reasons for the widespread distribution of taliks in the Yenisei Arctic. *Nauka i tehnika v Yakutii*. Science and technology in Yakutia. 2019, 2 (37): 3–7. [In Russian].
16. Savchenko V.A. *Ekologicheskie problemy Tajmyra*. Environmental problems of Taimyr. Moscow: SIP RIA, 1998: 194 p. [In Russian].
17. https://rp5.ru/Weather_archive_in_Norilsk. [In Russian].
18. *Spravochnik po stroitel'stvu na vechnomerzlyh gruntah*. Permafrost Construction Guide. Und. red. Velli Y.Ya., Dokuchaeva V.V., Fedorova N.F. L.: Strojizdat. Leningr. otdelenie, 1977: 552 p. [In Russian].
19. Kislov A.V. Grebenets V.I., Evstigneev V.M., Konishchev V.M., Sidorova M.V., Surkova G.V., Tumel' N.V. The consequences of a possible warming of the climate in the XXI century in the north of Eurasia. *Vestn. Mosk. Un-ta. Ser. 5. Geografiya*. Bulletin of Moscow State University. Series 5. Geography. 2011, 3: 3–8. [In Russian].
20. Surkova G.S. Climatic resources of European Russia and Western Siberia in the first half of the XXI century. *Klimaticheskie resursy Evropejskoj Rossii i Zapadnoj Sibiri v pervoj polovine XXI veka*. Climatic resources of European Russia and Western Siberia in the first half of the XXI century. Und. red. N.S. Kasimova i A.V. Kislova. Moscow: MAKs Press, 2011: 118–157. [In Russian].
21. Sheveleva N.S., Homichevskaya L.S. *Geokriologicheskie usloviya Enisejskogo severa*. Geocryological conditions of the Yeniseian North. Moscow: Nauka, 1967: 127 p. [In Russian].
22. Grebenets V.I. Formation of specific natural and technogenic complexes in the Norilsk industrial region *Materialy Vtoroj konf. geokriol. Rossii. 6–8 june 2001 g. T. 4. Inzhenernaya geokriologiya*. Materials of the Second Conference of Geocryologists of Russia. V. 4. Engineering geocryology. Moscow: MGU, 2001: 59–65. [In Russian].
23. Porhaev G.V., Shchelokov V.K. *Prognozirovanie temperaturnogo rezhima vechnomerzlyh gruntov na zastrai-vaemyh territoriyah*. Forecasting the thermal regime of permafrost in the urbanised areas. Leningrad: Strojizdat, 1980: 112 p. [In Russian].
24. Sokratov S.A., Barry R.G. Intraseasonal variation in the thermoinsulation effect of snow cover on soil temperatures and energy balance. *Journ. of Geophys. Research*. 2002, 107 (D10): 1–6. <https://doi.org/10.1029/2002JD001595>.
25. Demidyuk L.M. *Geokriologiya SSSR. Srednyaya Sibir'*. Geocryology of USSR. Srednyaya Sibir'. Und. red. E.D. Ershova. Moscow: Nedra, 1989: 173–176. [In Russian].