

УДК 551.345

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-5-105-116

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ПРИ ВОЗМОЖНОМ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ И ОТТАИВАНИИ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ К СЕРЕДИНЕ ХХI ВЕКА

**Арина Андреевна Фалалеева¹✉, Яков Юрьевич Шелков²,
Виктор Григорьевич Чеверев³, Анатолий Викторович Брушков⁴**

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; falaleeva@geol.msu.ru✉

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; s1h9e9l4kov@yandex.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; cheverev44@mail.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; brouchkov@geol.msu.ru

Аннотация. Рассмотрены изменения несущей способности мерзлых грунтов при различных сценариях потепления в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) к 2050 г. Деформации и разрушения зданий и инженерных сооружений в АЗРФ будут развиваться постепенно. Учитывая климатические сценарии (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5) в совокупности на 1/3 территории АЗРФ произойдет снижение несущей способности более 15% к середине столетия, в зоне опасности находятся арктическое побережье Европейского Севера России, Ямала и Гыданского полуострова.

Ключевые слова: несущая способность мерзлых грунтов, глобальное изменение климата, прогноз изменения температуры грунтов, многолетнемерзлые грунты, оттаивание мерзлоты, Арктическая зона РФ

Для цитирования: Фалалеева А.А., Шелков Я.Ю., Чеверев В.Г., Брушков А.В. Оценка изменения несущей способности мерзлых грунтов при возможном изменении температуры и оттаивании вечной мерзлоты в арктической зоне Российской Федерации к середине XXI века // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. № 5. С. 105–116.

DAMAGE ASSESSMENT FOR BEARING CAPACITY OF FROZEN GROUNDS DUE TO TEMPERATURES CHANGE AND PERMAFROST THAWING IN THE ARCTIC ZONE OF THE RUSSIAN FEDERATION BY THE MIDDLE OF THE 21ST CENTURY

Arina A. Falaleeva¹✉, Yakov Yu. Shelkov², Viktor G. Cheverev³, Anatoliy V. Brushkov⁴

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; falaleeva@geol.msu.ru✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; s1h9e9l4kov@yandex.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; cheverev44@mail.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; brouchkov@geol.msu.ru

Abstract. Changes in the bearing capacity of frozen soils under various scenarios of warming in the Arctic zone of the Russian Federation (AZRF) by 2050 are considered. Deformations and destruction of buildings and engineering structures in the Russian Arctic will develop gradually. Taking into account the climatic scenarios (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5), in aggregate, 1/3 of the AZRF territory will experience a decrease in bearing capacity by more than 15% by the middle of the century; the Arctic coast of the European North of Russia, Yamal and the Gydan Peninsula are in the danger zone.

Keywords: bearing capacity of frozen grounds, global climate change, forecast ground temperature, frozen grounds, permafrost thawing, Arctic zone of the Russian Federation

For citation: Falaleeva A.A., Shelkov Ya.Yu., Cheverev V.G., Brushkov A.V. Damage assessment for bearing capacity of frozen grounds due to temperatures change and permafrost thawing in the arctic zone of the Russian Federation by the middle of the 21st century. *Moscow University Geol. Bull.* 2023; 5: 105–116. (In Russ.).

Введение. Общая площадь криолитозоны Российской Федерации составляет около 65% территории, а добываемые в пределах Арктики полезные ископаемые составляют основную часть минерально-сырьевой базы страны. Мощность и строение криолитозоны имеют прямую зависимость от изменения климата, влияние которого проявляется прежде всего в повышении температуры многолет-

немерзлых пород и увеличении глубины сезонного протаивания.

Температура вечной мерзлоты повышается медленнее, чем температура воздуха в Арктике, однако освоение природных богатств, связанное с недропользованием, нарушает естественное состояние криолитозоны, усиливая воздействие меняющегося климата. В результате к концу века

может произойти пропаивание значительной части верхних горизонтов многолетнемерзлых пород. При оттаивании мерзлых грунтов изменяются их физико-механические характеристики, что, в свою очередь, уменьшает несущую способность фундаментов, приводя к повреждению построенных на них сооружений. Многие здания и сооружения построены на свайных фундаментах, используя многолетнемерзлый грунт в качестве оснований, и рассчитаны на эксплуатацию в определенных температурных условиях. Рост температуры мерзлых грунтов и, следовательно, уменьшение их несущей способности, приводящее к повреждениям объектов инфраструктуры, представляют серьезную угрозу для экономики страны. Считается, что в результате оттаивания многолетнемерзлых грунтов пострадает около трети инфраструктуры в Российской Арктике [Hjort и др., 2018], а уже сейчас, например, для криолитозоны севера Западной Сибири наблюдается снижение несущей способности грунтов на 5–30% [Дроздов и др., 2018].

Потеря несущей способности грунтов оценивалась в работе [Streletsyi и др., 2019], где авторы выбирали сценарий максимального потепления климата, опираясь в качестве методологической базы на результаты, основанные на авторских геотехнических моделях [Streletsyi и др., 2012]. В работе [Порфириев и др., 2019] рассматривается три сценария изменения устойчивости дорожной инфраструктуры под влиянием пропаивания и деградации вечномерзлых грунтов в девяти регионах Российской Арктики вследствие изменения климата. Для оценки последствий климатических изменений в этих регионах до середины текущего века в качестве физико-географической базы также приняты оценки мерзлотных условий, выполненные по шести климатическим моделям, причем опорным был выбран самый негативный сценарий (RCP8.5) как наиболее соответствующий условиям Российской Арктики. В настоящей работе оценивались изменения несущей способности мерзлых грунтов при различных сценариях потепления в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) к 2050 г.

Сценарии изменения температур воздуха. Возможные среднегодовые температуры воздуха в муниципальных образованиях АЗРФ определялись на основе прогнозных данных Климатического центра Росгидромета «Изменение климата России в 21-м веке» и сценариев изменения климата RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 [IPCC, 2014]. При этом учитывался диапазон изменений среднегодовых температур воздуха по различным сценариям (табл. 1).

RCP (Representative Concentration Pathway) или вариант изменения концентрации углекислого газа — это возможный сценарий экологического будущего планеты. Рассматривается, как правило, несколько сценариев, при которых концентрация парниковых газов к 2100 г. достигнет 421 ppm (RCP2.6), 538 ppm (RCP4.5) и 936 ppm (RCP 8.5).

Сценарий RCP2.6 подразумевает, что пик выбросов парниковых газов приходится на 2010–2020 гг., после чего произойдет спад. В сценарии RCP4.5 считается, что пик выбросов произойдет около 2040 г. Сценарий RCP8.5 предполагает, что выбросы продолжат расти в течение столетия.

Прогноз изменения температуры мерзлых грунтов. Среднегодовая температура грунтов отличается от среднегодовой температуры воздуха на величину общей сдвиги, которая складывается из влияния радиационной поправки, снега, растительности, водного покрова, температурной сдвиги и влияния атмосферных осадков. Общая сдвиги оценивалась двумя способами — расчетным с учетом возможных изменений климатических параметров и по фактическим данным об общей сдвиге, наблюдаемой в районах АЗРФ. При расчетах использовались модифицированные уравнения, разработанные В.А. Кудрявцевым [Основы..., 2016] на основе представлений о периодически устанавлившимся температурном режиме грунтов.

Так, для расчета глубины сезонного оттаивания слоя ξ необходимы следующие параметры: среднегодовая температура на земной поверхности t_0 и среднегодовая температура на подошве слоя сезонного оттаивания t_ξ , физическая амплитуда годовых температурных колебаний A_0 на поверхности оттаивающих пород и средняя амплитуда годовых температурных колебаний A_{CP} , теплоемкость мерзлой (и талой) породы С и ее коэффициент теплопроводности λ , а также затраты тепла на фазовые переходы воды в породе при промерзании Q_Φ . Выражение для определения глубины сезонного оттаивания грунта, в частности, при $\lambda_t = \lambda_m$ за период T представляется в следующем виде:

$$\xi = \frac{2(A_0 - t_\xi)\sqrt{\frac{\lambda TC}{\pi}} + \frac{(2A_{CP}C\xi_{2C} + \xi Q_\Phi)\sqrt{\frac{\lambda T}{\pi C}}}{2A_{CP}C\xi_{2C} + \xi Q_\Phi + \sqrt{\frac{\lambda T}{\pi C}}(2A_{CP}C + Q_\Phi)}}{2A_{CP}C + Q_\Phi},$$

где

$$\xi_{2C} = \frac{2(A_0 - t_\xi)\sqrt{\frac{\lambda TC}{\pi}}}{2A_{CP}C + Q_\Phi}.$$

По методике, изложенной в [Основы..., 2016], исходя из температуры воздуха t_B , определяются сдвиги [поправки] на температурный режим поверхности за счет радиационного баланса, которую мы считаем незначительной в подпольях зданий, влияние снежного покрова Δt_{CH} , а также растительного покрова Δt_{PACT} . После расчета указанных поправок определяется температурный режим поверхности почвы как:

$$t_0 = t_B + \Delta t_R + \Delta t_{CH} \pm \Delta t_{PACT}.$$

Таблица 1

Изменение среднегодовых температур воздуха на середину XXI века по различным сценариям изменения климата для муниципальных образований АЗРФ

Муниципальное образование	Среднегодовая температура воздуха $t_{\text{в.ср.}}$, °C в настоящее время и в соответствии со сценариями потепления к 2050 г.			
	настоящее время	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
Абыйский район	-13,2	-10,8	-10,1	-9,3
Аллаиховский муниципальный район	-13,4	-11,0	-10,3	-9,5
Анабарский национальный (долгано-эвенкийский)	-14,1	-11,7	-11,0	-10,2
Анадырский муниципальный район	-7,9	-5,0	-4,5	-3,5
Билибинский муниципальный район	-12,7	-9,8	-9,3	-8,3
Булунский муниципальный район	-11,9	-9,5	-8,8	-8,0
Верхнеколымский улус (район)	-10,5	-8,1	-7,4	-6,6
Верхоянский район	-14,5	-12,1	-11,4	-10,6
Воркута	-5,4	-2,5	-1,9	-1,0
ГО Анадырь	-6,9	-4,0	-3,5	-2,5
ГО Певек (до 2016г. — Чаунский)	-6,9	-4,0	-3,5	-2,5
ГО Провиденский [до 2016г. — Провиденский]	-6,9	-4,0	-3,5	-2,5
ГО Эгвекинот (до 2016г. — Иультинский)	-6,9	-4,0	-3,5	-2,5
Город Губкинский	-5,7	-2,8	-2,2	-1,3
Город Лабытнанги	-5,7	-2,8	-2,2	-1,3
Город Муравленко	-5,7	-2,8	-2,2	-1,3
Город Нарьян-Мар	-3,1	-0,2	0,4	1,3
Город Новый Уренгой	-5,4	-2,5	-1,9	-1,0
Город Норильск	-9,7	-7,0	-6,3	-5,4
Город Ноябрьск	-5,7	-2,8	-2,2	-1,3
Город Салехард	-5,7	-2,8	-2,2	-1,3
Жиганский национальный эвенкийский район	-11,1	-8,7	-8,0	-7,2
Заполярный район	-3,1	-0,2	0,4	1,3
Красноселькупский муниципальный район	-5,4	-2,5	-1,9	-1,0
Момский район	-13,2	-10,8	-10,1	-9,3
Надымский муниципальный район	-5,4	-2,5	-1,9	-1,0
Нижнеколымский муниципальный район	-13,4	-11,0	-10,3	-9,5
Новая Земля	-4,5	-0,4	0,3	1,5
Оленекский эвенкийский национальный район	-11,5	-9,1	-8,4	-7,6
Приуральский муниципальный район	-5,7	-2,8	-2,2	-1,3
Пуровский муниципальный район	-5,7	-2,8	-2,2	-1,3
Среднеколымский улус (район)	-13,4	-11,0	-10,3	-9,5
Тазовский муниципальный район	-5,4	-2,5	-1,9	-1,0
Таймырский Долгано-Ненецкий	-9,7	-7,0	-6,3	-5,4
Туруханский муниципальный район	-5,9	-3,2	-2,5	-1,6
Усть-Янский муниципальный район	-13,2	-10,8	-10,1	-9,3
Чукотский муниципальный район	-6,9	-4,0	-3,5	-2,5
Шурышкарский муниципальный район	-5,7	-2,8	-2,2	-1,3
Эвено-Бытантайский национальный улус (район)	-14,5	-12,1	-11,4	-10,6
Ямальский муниципальный район	-5,7	-2,8	-2,2	-1,3

Предполагается, что на строительных площадках под зданиями снежный и растительный покров отсутствует, что является типичным случаем для большинства зданий, поэтому в расчетах влияние снега и растительности в некоторых вариантах не учитывалось.

При этом по характеристикам грунтов, растительных покровов и других факторов, влияющих на температурный режим, выбирался реалистичный диапазон их изменения, и расчеты выполнялись для крайних значений выбранных диапазонов изменения характеристик (табл. 2). Минимальные (рис. 1) и максимальные (рис. 2) среднегодовые температуры по муниципальным образованиям АЗРФ проиллюстрированы на картах, составленных на основе данных Геокриологической карты СССР (1991), а также результаты расчетов прогнозной температуры пород при сценарии RCP 4.5 (рис. 3). Важно заметить, что далеко не для всех муниципальных образований характерны одинаковые среднегодовые температуры по всей протяженности. Наиболее отчетливо это видно на территориях, находящихся к западу от долины реки Лены. Но, учитывая, что характеристика температур дается единая для всего муниципального образования, нами было принято показывать на картах именно те температуры, которые характерны для освоенных человеком областей.

Оценка изменения несущей способности грунтов. Большинство зданий и инженерных сооружений в АЗРФ построено по I принципу, т.е. с использованием грунтов основания в мерзлом состоянии, сохраняемом в процессе строительства и в течение всего периода эксплуатации. Нагрузка от сооружения передается на грунты основания через боковую поверхность и нижний конец сваи. Удельные силы смерзания боковой поверхности сваи с заполнителем скважины меньше сопротивления мерзлого грунта нормальному давлению, но при многократном превышении площади рабочей части боковой поверхности сваи над площадью нижнего ее конца, суммарная нагрузка, передаваемая через нее на окружающие мерзлые грунты, как правило, значительно, по крайней мере, в несколько раз больше суммарной нагрузки, передаваемой через нижний конец сваи. В наших расчетах мы принимали, что несущая способность свайного фундамента в основном обеспечивается прочностью смерзания, не

учитывая прочность под нижним концом сваи, но стоит отметить, что рассматриваемая в данной работе зависимость изменения сопротивления сдвига грунтов по поверхности смерзания от температуры не во всех случаях является определяющей при расчете устойчивости инженерных сооружений на вечномерзлых грунтах.

При оценке несущей способности сваи предполагалось, что она должна соответствовать несущей способности, определенной в проекте. Затем проводились расчеты для возможных вариантов изменения температур грунтов. При этом учитываются заложенные в правилах допущения возможности повышения температур основания для песчаных и крупнообломочных грунтов на $0,5^{\circ}\text{C}$, а для глинистых 1°C без ущерба для несущей способности оснований. Передача на фундаменты проектных нагрузок допускается, как правило, при температуре грунтов в основании сооружения не выше установленных на эксплуатационный период расчетных значений. Величины несущей способности в настоящее время и при варианте прогноза сравнивались, и, если сокращение несущей способности в результате потепления грунтов основания составляет 15% и более, фундамент здания считается потерявшим несущую способность в соответствии с п. 7.2.1 СП 25.13330.2012. Расчет оснований фундаментов по несущей способности производится исходя из условия п. 7.2.1 СП 25.13330.2012:

$$F \leq F_u \gamma_n,$$

где F — расчетная нагрузка на основание; F_u — несущая способность основания, определяемая расчетом [7.2.2 СП 25.13330.2012]; γ_n — коэффициент надежности по ответственности сооружения, принимаемый в соответствии с требованиями СП 22.13330 в зависимости от вида и уровня ответственности сооружения. Расчетная температура грунтов T_e в соответствии с п. 7.2.6, определяется расчетом теплового взаимодействия сооружения с многолетнемерзлыми грунтами основания в периодически устанавлившемся тепловом режиме с учетом переменных в годовом периоде условий теплообмена на поверхности и других факторов. Значение Raf (прочности смерзания грунта с материалом сваи) принимались при средней (эквивалентной) температуре грунта T_e в соответствии с п. 7.2.7 СП 25.13330.2012.

Ввиду того, что под серединой сооружения температуры, как правило, выше, в расчет брались именно значения температур под серединой сооружения, и в этом случае коэффициент a_e по СП 25.13330.2012 оказывается близким к 0,5. Коэффициент k_1 теплового влияния сооружения изменяется в небольшом диапазоне и в среднем, по-видимому, может быть принят равным 0,5. Температура начала замерзания грунта, $T_{b\beta}^{\circ}\text{C}$, в целом находится в диапазоне от $-0,1$ до $-0,25^{\circ}\text{C}$ и незначительно влияет на результаты расчетов, поэтому мы принимали ее равной $-0,15^{\circ}\text{C}$.

Таблица 2

Диапазон максимальных и минимальных (max и min соответственно) теплофизических характеристик грунтов, принятых в расчетах

Q_{ϕ} min	Q_{ϕ} max	C_{vt} min	C_{vt} max	C_{vi} min	C_{vi} max	λ_t min	λ_t max	λ_i min	λ_i max
23244	40670	756	1046	697	930	1,1	1,3	1,2	1,7

Примечания: Q_{ϕ} (Вт·ч / m^3) — затраты тепла на фазовые переходы воды; объемная теплоемкость мерзлого — C_{vi} и талого — C_{vt} грунта (Вт·ч/ $\text{м}^3\cdot\text{K}$); теплопроводность мерзлого — λ_i и талого λ_t — грунта (Вт/ $\text{м}\cdot\text{K}$)

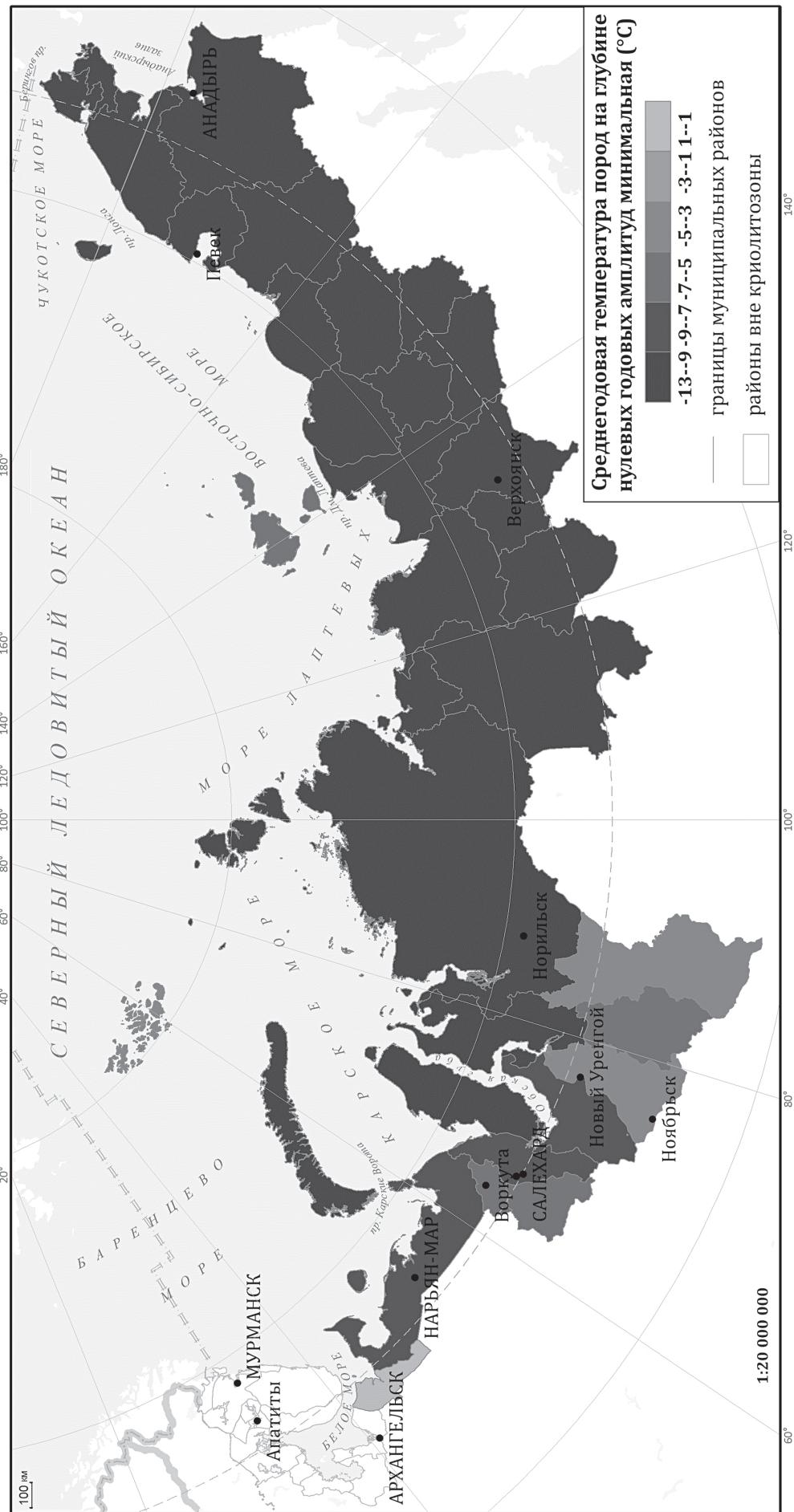


Рис. 1. Минимальные среднегодовые температуры горных пород на территории АЗРФ на основе данных Геоклиматической карты СССР, 1991

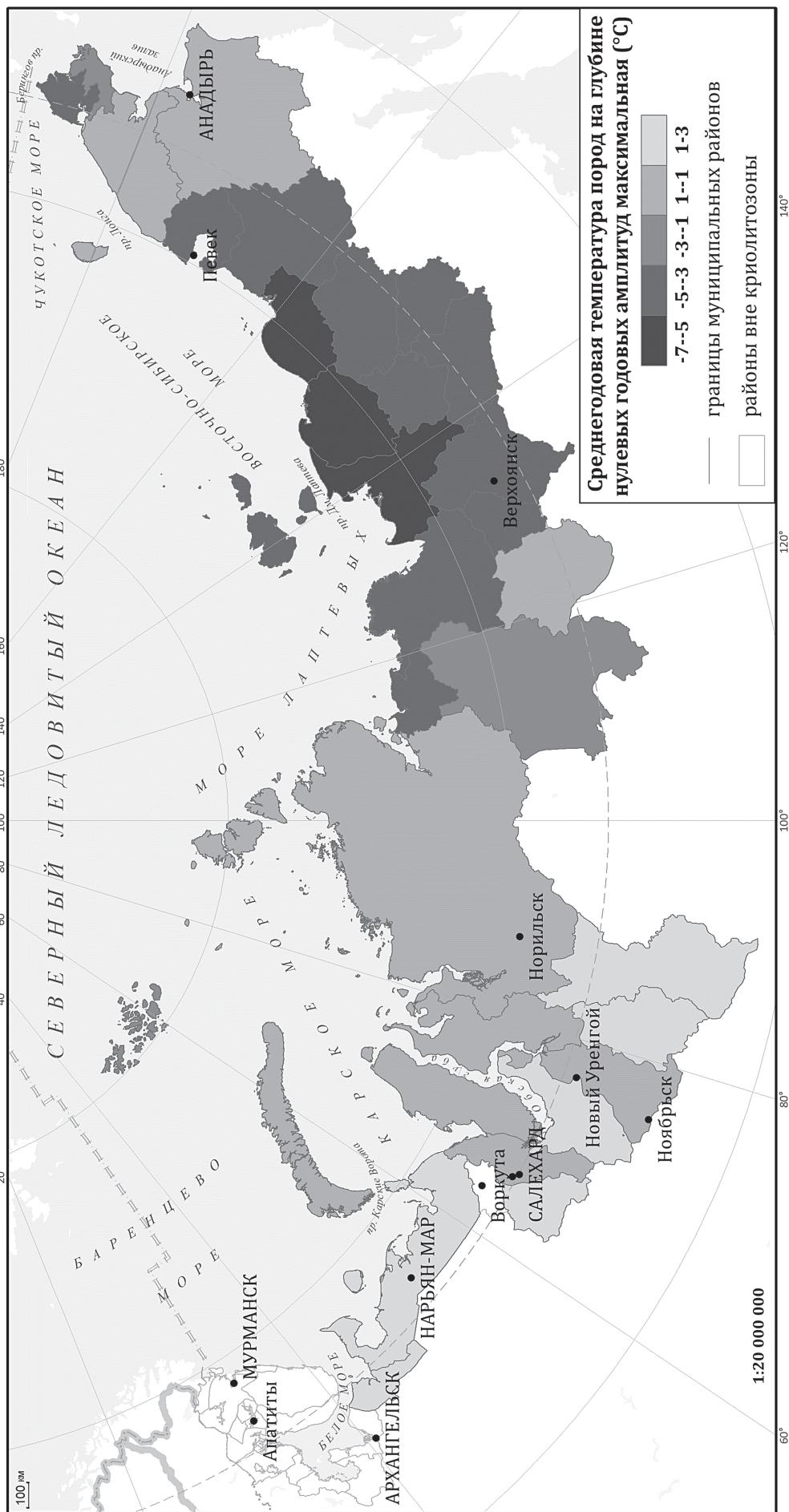


Рис. 2. Максимальные среднегодовые температуры горных пород на территории АЗРФ на основе данных Геокриологической карты СССР, 1991

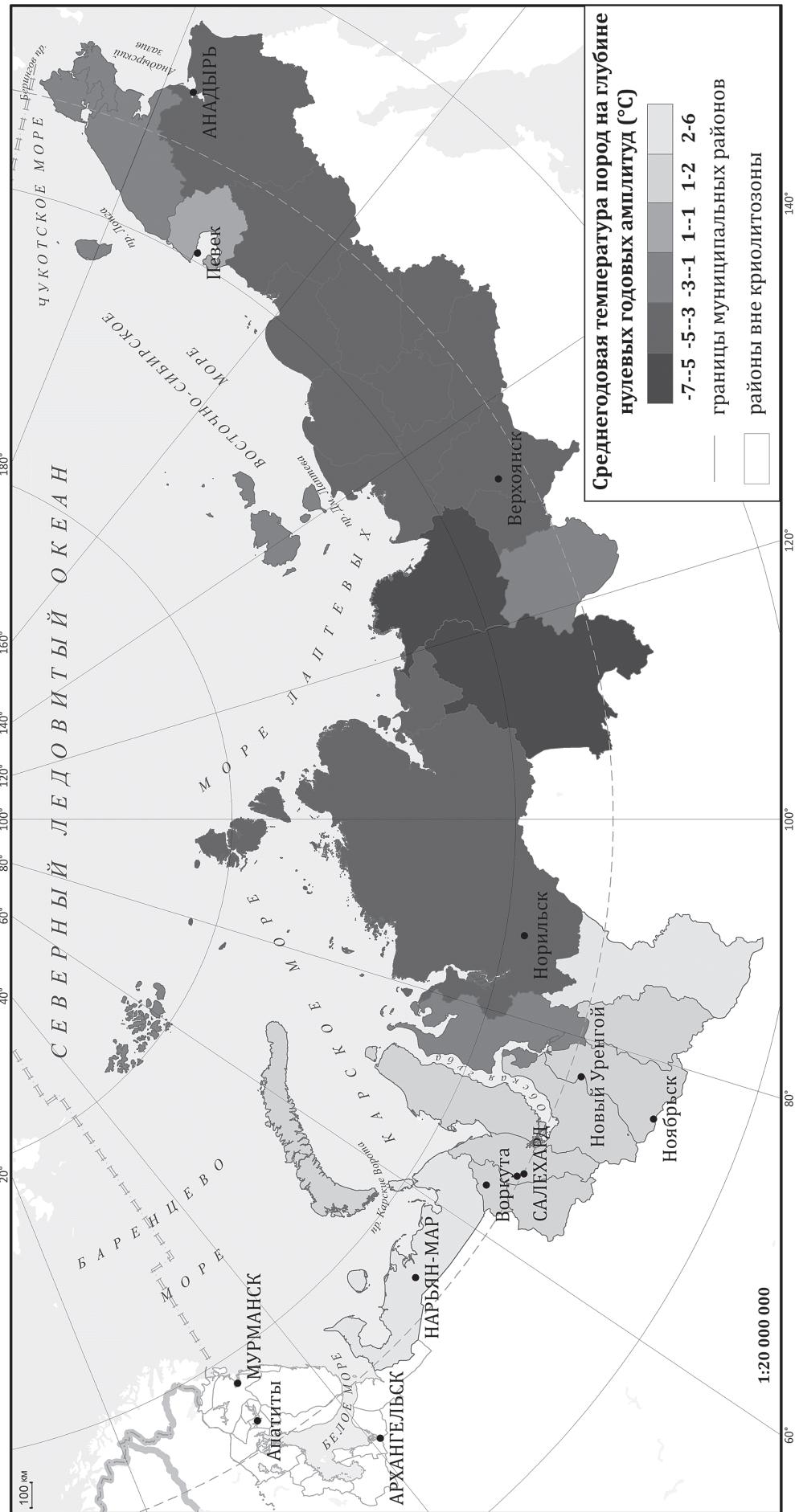


Рис. 3. Варианты расчета среднегодовой температуры грунтов на середину ХХI в.

В первом варианте наших расчетов мы исходили из следующего. Нормативное значение среднегодовой температуры многолетнемерзлого грунта T_{0n} определялось по данным полевых измерений температуры грунтов на опытных площадках с естественными условиями. Допускается значение T_{0n} принимать равным температуре грунта на глубине 10 м от поверхности. При оценке изменений температур на различных территориях нами были использованы следующие фактические данные по литературным и фондовым источникам последних десятилетий: разность среднегодовых температур мерзлых грунтов в естественных условиях и на территории застройки; разность среднегодовых температур воздуха и мерзлых грунтов на застройки в прошлом и в настоящее время, а также расчеты среднегодовых температур мерзлых грунтов в соответствии с методикой, изложенной в [Основы..., 2016].

В другом варианте расчетов температура в основании сооружения определялась по СП 25.13330.2012. Таким образом, наибольшие и наи-

меньшие изменения температур грунтов будут определяться сочетаниями грунтовых условий и изменениями глубин протаивания вместе с климатическими изменениями. Изменение мощности и плотности снега в связи с изменением климата в этом варианте расчета не учитывались, поскольку, снежный покров в подполье, как правило, не формируется (табл. 3).

Результаты расчетов изменения несущей способности мерзлых грунтов на середину XXI в. по различным сценариям изменения климата для муниципальных образований АЗРФ представлены в табл. 4, где показана минимальная оценка, так как, прогнозируемое максимальное снижение несущей способности составило 100% для всех муниципальных образований АЗРФ.

По СП 25.13330.2012 расчетные давления на мерзлые грунты R , расчетные сопротивления мерзлых грунтов и грунтовых растворов сдвига по поверхностям смерзания фундаментов R_{af} следует определять опытным путем. Однако при отсутствии

Таблица 3

Варианты расчета среднегодовой температуры грунтов на середину XXI в.

№ варианта	Исходные температуры воздуха и пород	Оценка изменения температуры воздуха	Учет влияния снега и растительности (нарушенные или естественные условия)	Методика расчета/оценки температур грунтов	
1	По данным метеостанций соответствующих регионов по среднегодовым температурам воздуха	По сценариям изменения климата RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5	Естественные условия. С учетом влияния снега и растительности	По расчетной методике В.А. Кудрявцева [Основы..., 2016]	
2		По наблюдающимся трендам изменения температуры воздуха [Второй..., 2014]			
3		По сценариям изменения климата RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5	Нарушенные условия. Без учета влияния снега и растительности		
4		По наблюдающимся трендам изменения температуры воздуха [Второй..., 2014]			
5	По среднегодовым температурам пород по [Геокриологическая карта, 1991]	По трендам изменения температур воздуха по RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5	Естественные условия. С учетом влияния снега и растительности	Приближенная оценка по наблюдающимся трендам [Второй доклад..., 2014] изменения температур воздуха и грунтов	
6		По наблюдающимся трендам изменения температуры воздуха [Второй..., 2014]			
7	По данным [Геокриологическая карта, 1991] с уточнениями по литературным и фондовым источникам	По трендам изменения температур воздуха по RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5	Естественные и нарушенные (при наличии) условия. С учетом влияния снега и растительности (при наличии)		
8		По наблюдающимся трендам изменения температуры воздуха [Второй..., 2014]			
9	По данным метеостанций соответствующих регионов по среднегодовым температурам воздуха	По сценариям изменения климата RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5	Нарушенные условия. Без учета влияния снега и растительности	Приближенная оценка, исходя из условия, что температуры грунтов в подпольях зданий выше на 0,2–3 °C по сравнению с температурой воздуха	
10		По наблюдающимся трендам изменения температуры воздуха [Второй..., 2014]			
11		По сценариям изменения климата RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5			
12		По наблюдающимся трендам изменения температуры воздуха [Второй..., 2014]			

Таблица 4

Минимальное изменение несущей способности мерзлых грунтов на середину XXI века по различным сценариям изменения климата для муниципальных образований АЗРФ

Муниципальное образование	Минимальное снижение несущей способности ММГ, %		
	RCP 2,6	RCP 4,5	RCP 8,5
Абыйский район	-2	-3	-5
Аллаиховский муниципальный район	-3	-4	-5
Анабарский национальный район	-2	-3	-4
Анадырский муниципальный район	-4	-5	-7
Билибинский муниципальный район	-4	-5	-7
Булунский муниципальный район	-2	-2	-3
Верхнеколымский район	-2	-3	-4
Верхоянский район	-2	-3	-5
Воркута	-8	-12	-100
ГО Анадырь	-5	-6	-10
ГО Певек [до 2016 г. — Чаунский]	-5	-6	-10
ГО Провиденский [до 2016 г. — Провиденский]	-5	-6	-10
ГО Этвекинот [до 2016 г. — Иультинский]	-5	-6	-10
Город Губкинский	-9	-14	-100
Город Лабытнанги	-9	-14	-100
Город Муравленко	-9	-14	-100
Город Нарьян-Мар	-100	-100	-100
Город Новый Уренгой	-7	-11	-100
Город Норильск	-3	-4	-6
Город Ноябрьск	-9	-14	-100
Город Салехард	-9	-14	-100
Жиганский национальный эвенкийский район	-4	-6	-8
Заполярный район	-100	-100	-100
Красноселькупский муниципальный район	-7	-11	-100
Момский район	-2	-3	-5
Надымский муниципальный район	-9	-13	-100
Нижнеколымский муниципальный район	-3	-4	-5
Новая Земля	-12	-100	-100
Оленекский эвенкийский национальный район	-2	-3	-4
Приуральский муниципальный район	-9	-14	-100
Пуровский муниципальный район	-9	-14	-100
Среднеколымский район	-3	-4	-5
Тазовский муниципальный район	-4	-6	-8
Таймырский Долгано-Ненецкий	-3	-4	-6
Туруханский муниципальный район	-100	-100	-100
Усть-Янский муниципальный район	-3	-4	-5
Чукотский муниципальный район	-5	-6	-10
Шурышкарский муниципальный район	-9	-14	-100
Эвено-Бытантайский национальный район	-2	-3	-5
Ямальский муниципальный район	-9	-14	-100

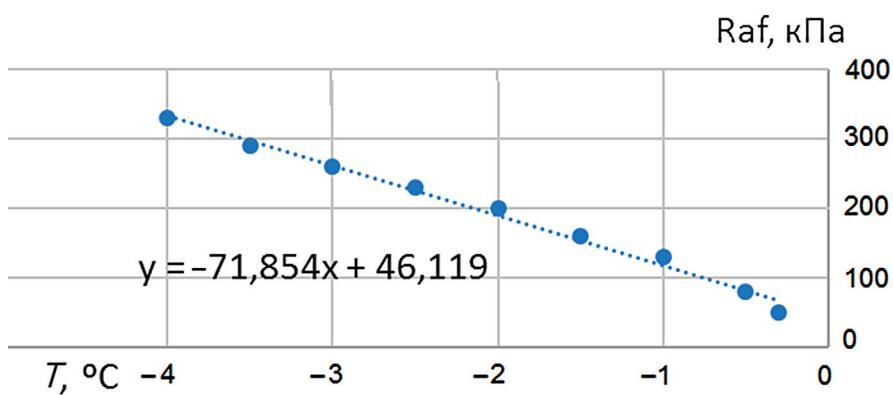


Рис. 4. Расчетные сопротивления сдвигу [Raf] по поверхности смерзания незасоленного глинистого грунта с материалом фундамента по СП 25.13330.2012

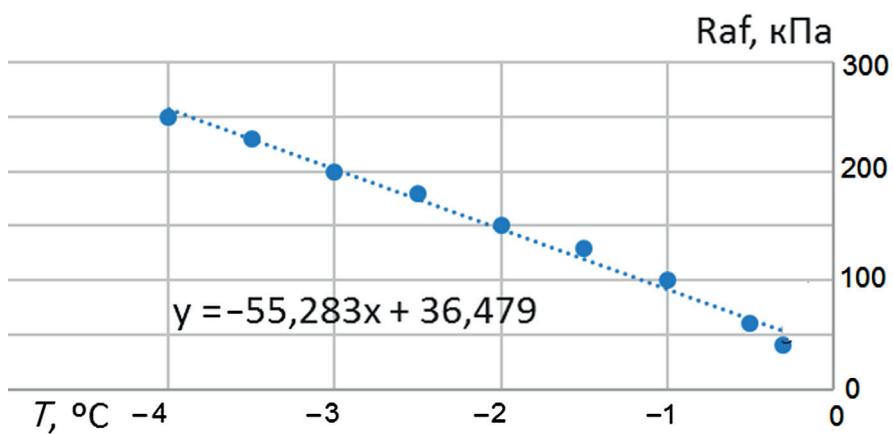


Рис. 5. Расчетные сопротивления сдвигу [Raf] по поверхности смерзания незасоленного песчаного грунта с материалом фундамента по СП 25.13330.2012

опытных данных допускается принимать значения R и R_{af} по таблицам В.1-В.11 СП 25.13330.2012. Как свидетельствует практика проектирования, так поступают достаточно часто, больше доверяя таблицам СП 25.13330.2012, чем лабораторным или полевым испытаниям грунтов, или сравнивая эти значения и выбирая наименее благоприятный вариант. Расчетные сопротивления мерзлых грунтов и грунто-вых растворов сдвигу по поверхностям смерзания с фундаментом принимаются по таблице В.3, для мерзлых засоленных грунтов с континентальным типом засоления — по таблице В.6, для мерзлых грунтов с морским типом засоления — по таблице В.9. Таблицы были преобразованы в графики, по которым были определены уравнения аппроксимации в диапазоне температур $0\text{--}-4^{\circ}\text{C}$, как наиболее характерном в практике строительства в АЗРФ (рис. 4; 5).

Обсуждение результатов. Если изменение несущей способности фундамента для выделенного района находилось в пределах 15%, считалось, что устойчивость зданий и сооружений не пострадает. По результатам расчетов была составлена схема (рис. 6). Если рассчитывать температуры грунтов без учета влияния снега и растительности, что характерно для территорий застройки и проветриваемых подпольй зданий, изменения являются максимальными. Следует иметь в виду, что деформации и разрушения зданий и инженерных сооружений в АЗРФ будут развиваться постепенно, и, вероятно, несколько отставать от изменений температурного режима грунтов. Кроме того, большие территории криоли-

тозоны, не входящие в АЗРФ, так же подвергаются риску изменения температур грунтов, и возможно, процессы изменения климата будут сопровождаться еще большими деформациями и разрушениями. Это касается таких областей как Забайкалье, Центральная Якутия, Магаданская область и другие. Их также следует рассматривать в будущем и включить в систему будущего мониторинга криолитозоны.

В целом результаты оценки изменения температуры грунтов и, как следствие, изменение несущей способности фундаментов зданий заметно пессимистичнее, чем результаты работы [Streletsksiy и др., 2019]. По оценке [Romanovsky, Osterkamp, 1997] температура вечной мерзлоты на глубине нулевых годовых колебаний увеличилась на $0,5\text{--}2,0^{\circ}\text{C}$ за последние десятилетия в целом по криолитозоне России, а по данным [Павлов, Малкова, 2009] диапазон изменений температуры грунтов для Севера России составляет до $0,05^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Л.Н. Хрусталев [Khrustalev, 2000] установил, что если величина несущей способности грунтов основания здания или сооружения уменьшится на 64–95%, то такое здание потенциально будет подвержено деформациям и разрушению, и далее, рассчитав несущую способность типичных фундаментов в г. Якутске и пришел к выводу, что увеличение среднегодовой температуры воздуха на $1,5^{\circ}\text{C}$ может привести к разрушению практически всех фундаментов в этом городе.

Выводы. Таким образом, расчеты, проведенные с использованием различных долгосрочных прогнозов изменения климата по сценариям RCP2.6,

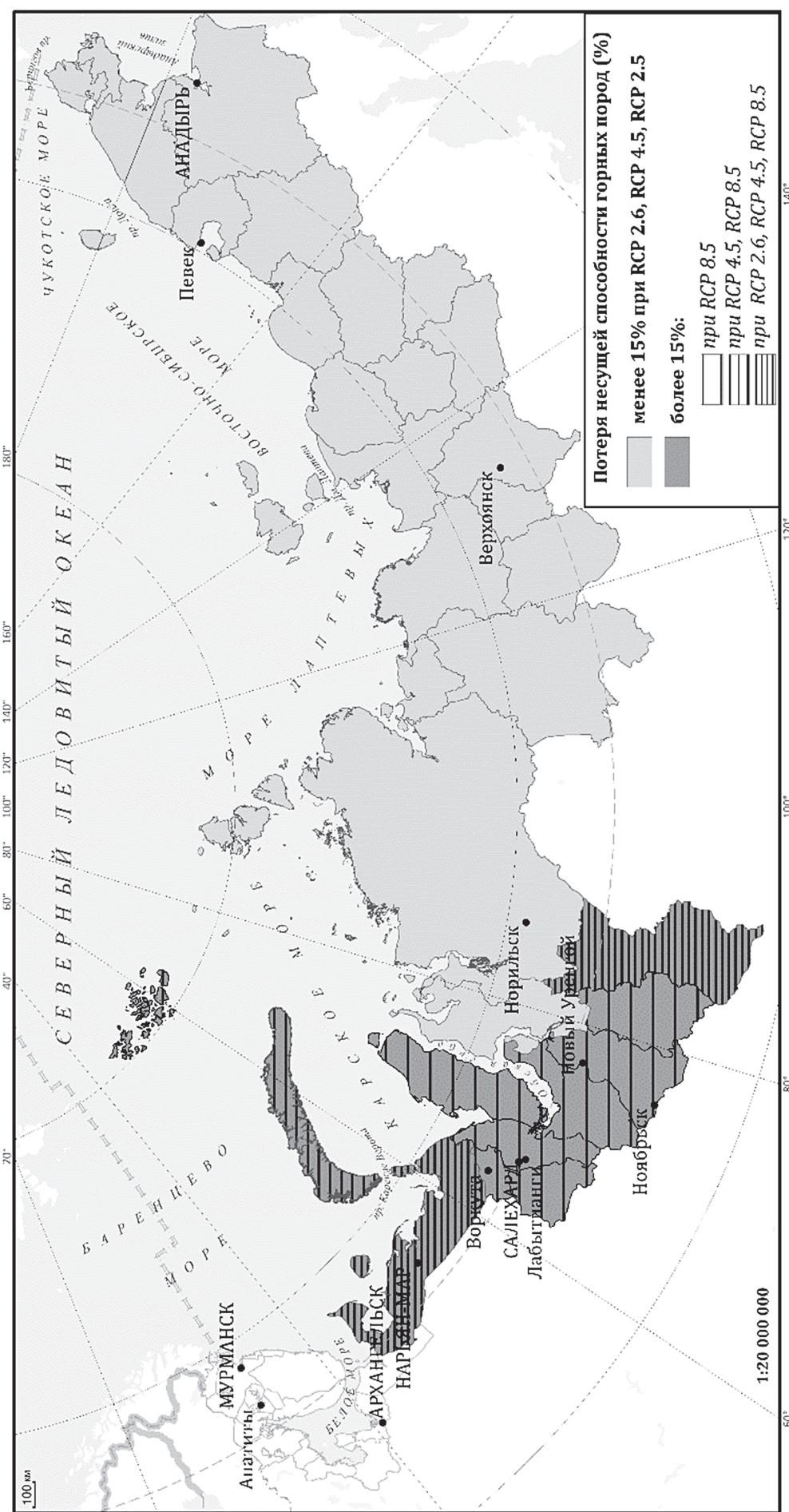


Рис. 6. Снижение несущей способности горных пород на территории АЗРФ к середине ХХI века при различных климатических сценариях

RCP4.5, RCP8.5, а также трендам изменения температуры воздуха, показывают, что к середине столетия площадь распространения вечной мерзлоты серьезно сократится. Повсеместно увеличится глубина сезонного оттаивания и возникнет опасность формирования высокотемпературных мерзлых грунтов в АЗРФ. Таяние вечной мерзлоты будет сопровождаться снижением несущей способности мерзлых грунтов, подобные изменения грозят увеличением вероятных деформаций и разрушений различных сооружений.

Предполагается значительное снижение несущей способности грунтов оснований зданий и сооружений в муниципальных образованиях АЗРФ, которое прогнозируется в диапазоне от 2 до 100% к середине XXI столетия. Если тенденция изменения климата сохранится, а именно на это

указывают современные прогнозы, опасные последствия деградации многолетнемерзлых грунтов будут неизбежны. Нельзя считать приоритетным какой-либо из рассмотренных вариантов: и максимальные и минимальные снижения несущей способности получены для крайних значений теплофизических характеристик грунтов, и, ввиду разнообразия природных условий и степени нарушения территории, предварительной оценкой будут являться скорее промежуточные варианты.

Значительные предполагаемые снижения несущей способности свидетельствуют о необходимости разработки и применения новых технических решений по управлению температурным режимом грунтов оснований, способных компенсировать отрицательное воздействие потепления для существующих, строящихся и проектируемых сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Г.В. Алексеев и др. М.: Росгидромет, 2014. 1007 с.
2. Геокриологическая карта СССР масштаба 1:2 500 000 / Мингео СССР, Гидроспецгеология, МГУ / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: ГУГК, 1991. 16 с.
3. Дроздов Д.С., Малкова Г.В., Романовский В.Е. и др. Цифровые карты криолитозоны и оценка современных тенденций изменений в криосфере // Холодок! 2018. Т. 16. С. 7.
4. Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях / В.А. Кудрявцев, В.Г. Меламед, Л.С. Гарагуля Л.С., Булдович С.Н. и др. Ред. А.В. Брушков, Л.С. Гарагуля. М.: МГУ, 2016.
5. Павлов А.В., Малкова Г.В. Мелкомасштабное картографирование трендов современных изменений температуры грунтов на севере России // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII, № 4. С. 32–39.
6. Порфириев Б.Н., Елисеев Д.О., Стрелецкий Д.А. Экономическая оценка последствий деградации вечной мерзлоты под влиянием изменений климата для устойчивости дорожной инфраструктуры в Российской Арктике // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89, № 12. С. 1228–1239.
7. СП 25.13330.2012 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М., 2012.
8. Khrustalev L.N. Allowance for climate change in designing foundations on permafrost grounds // Intern. Workshop on Permafrost Engineering, Longyearbyen, Tapir Publ. Norway. 2000. P. 25–36.
9. Hjort J., Karjalainen O., Aalto J., et al. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century. Nat Commun 9, 5147 [2018].
10. IPCC. Climate change 2014: Synthesis report. Fifth Assessment Report. Geneva: IPCC, 2014.
11. Romanovsky V.E., Osterkamp T.E. Thawing of the active layer on the coastal plain of the Alaskan Arctic // Permafrost and Periglacial Processes. 1997. Vol. 8. P. 1–22.
12. Streletskiy D.A., Shiklomanov N.I., Nelson F.E. Permafrost, infrastructure and climate change: a GIS based landscape approach to geotechnical modeling // Arctic, Antarctic, Alpine Res. 2012. Vol. 44. P. 368–380.
13. 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, № 025003. P. 1–15.

Статья поступила в редакцию 02.05.2023,
одобрена после рецензирования 12.06.2023,
принята к публикации 22.09.2023