

DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-350-359
УДК 551.583

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ ПЛАНОВ АДАПТАЦИИ К ИЗМЕНЕНИЮ КЛИМАТА В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РОССИИ НА ОСНОВЕ ПРОГНОСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

О. А. Анисимов¹, С. В. Бадина²

¹ ФГБУ «Государственный гидрологический институт» (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 4 апреля 2024 г.

Для цитирования

Анисимов О. А., Бадина С. В. Оптимизация региональных планов адаптации к изменению климата в Арктической зоне России на основе прогностического моделирования // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 3. — С. 350—359. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-350-359.

На примере Арктической зоны Российской Федерации сделана попытка актуализировать разработанные региональные планы адаптации к климатическим изменениям с учетом имеющихся в настоящее время научных знаний, данных наблюдений, климатических сценариев и результатов математического моделирования природных и социально-экономических систем — реципиентов климатических рисков. По разработанным авторами методикам был рассчитан индекс геокриологического риска для макро-регионов криолитозоны России, а также индекс уязвимости хозяйственных систем для муниципальных образований российской Арктики.

Ключевые слова: адаптация, Арктическая зона, прогноз, моделирование.

Введение

В последние несколько лет в России происходит переход проблемы изменения климата из сферы академических исследований в область принятия управленческих и инвестиционных решений. К настоящему времени сформирована законодательная основа системы адаптации к изменениям климата, которая включает национальный, отраслевые и региональные планы адаптации [1]. В октябре 2023 г. была принята обновленная «Климатическая доктрина Российской Федерации до 2030 года», в которой сформулированы целевые показатели мер по адаптации и ограничению изменения климата. Прави-

тельство РФ утвердило планы адаптации, разработанные 10 министерствами и 61 регионом.

В этих документах приведен обширный перечень факторов климатического воздействия и параметров экосистем, задействованных в природопользовании, названы обусловленные ими риски так, как они воспринимаются органами управления на уровне министерств и регионов. Для органов управления адаптация к изменению климата является новым видом деятельности, в котором отсутствует какой-либо предшествующий опыт. Это во многом объясняет, почему административное видение проблемы, впервые зафиксированное в упомянутых документах, значительно отличается от ее научного понимания. В планах адаптации нечетко сформулированы

© Анисимов О. А., Бадина С. В., 2024

ключевые климатические риски в конкретных регионах, полностью отсутствует представление о допустимых рисках и критических уровнях изменения климата, превышение которых многократно увеличивает потенциальный ущерб. Такая ситуация закономерна, она отражает имеющую место в стране разобщенность сфер науки и управления в вопросах, требующих совместных усилий [2].

С управленческой точки зрения эти документы также вызвали ряд замечаний. Агентство стратегических инициатив в июле 2023 г. дало экспертную оценку отчетов по климатической адаптации 51 региона [3]. Оценивались в первую очередь качество и релевантность адаптационных мероприятий. Было установлено, что в большинстве регионов значительная доля предложенных адаптационных мероприятий таковыми по сути не являются, поскольку они не связаны с климатическими изменениями и их последствиями. Отмечена низкая доля мероприятий с наличием количественных показателей в описании. Среди лучших практик выделены разработки программ адаптации территориально локализованного крупного бизнеса, модернизация предприятий повышенной техногенной опасности, что также говорит о весьма ограниченном понимании проблемы климатических изменений на региональном уровне. По мнению авторов, это во многом является следствием институциональной специфики. Как и в других сферах, в данном направлении заметны жесткость вертикали и централизованность принятия решений: методические рекомендации по написанию региональных планов адаптации, разработанные Минэкономразвития России, сделали большинство планов практически идентичными друг другу. Отсутствие «инициативы снизу», полноты учета локальной специфики является существенным ограничением на пути формирования действительно эффективных адаптационных решений.

Цель данной работы состоит в том, чтобы отчасти уменьшить обозначенную выше разобщенность. На примере Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) сделана попытка актуализировать разработанные региональные планы адаптации с учетом имеющихся на сегодня научных знаний, данных наблюдений, климатических сценариев и результатов математического моделирования природных и социально-экономических систем — реципиентов климатических рисков.

В состав АЗРФ частично или полностью входят следующие территории: Мурманская и Архангельская области, Карелия, Ненецкий автономный округ (АО), Республика Коми, Ямало-Ненецкий АО, Чукотский АО, Республика Саха (Якутия) и Красноярский край. Площадь АЗРФ составляет примерно 4,8 млн км², в ней постоянно проживают около 2,6 млн человек [4].

Выбор исследуемого региона обусловлен тем, что в АЗРФ в настоящее время реализуются и готовятся к запуску многие инвестиционные проекты на фоне

продолжающегося более сильного, чем в среднем по стране, потепления. Прежде всего речь идет о проектах в сфере добычи углеводородного сырья — главного ресурса, формирующего доходы федерального бюджета [5]. В настоящее время этот макрорегион, пожалуй, наиболее иллюстративен в плане проявлений влияния изменения климата на социально-экономические условия, здоровье населения, инфраструктуру, технологии и ресурсную базу различных видов экономической деятельности. Показательно, что многие последствия изменения климата, которые были предсказаны с помощью математических моделей в начале 2000-х годов, уже наблюдаются в АЗРФ. Это в полной мере относится к объектам промышленной и жилой инфраструктуры топливно-энергетического и добывающего комплексов, особенно в крупных арктических городах [6]. Главные риски для них связаны с деградацией многолетнемерзлых грунтов (ММГ), всю область распространения которых принято называть криолитозоной. Оценке этих рисков в работе уделено наибольшее внимание.

Материалы и методы

В рамках работы была построена база данных о современном климате в АЗРФ для периода 1990—2020 гг. и о его прогнозируемом изменении к середине XXI в. (2035—2064 гг.). Для современного периода использовались данные метеоархива CRU TS4.07 о среднемесячных температурах воздуха и суммах атмосферных осадков в узлах пространственной сетки с шагом 0,5° по широте и долготе, с запасом покрывающей всю АЗРФ. Для прогнозного периода были использованы результаты расчетов по моделям земной системы поколения CMIP6. Все прогностические расчеты на середину XXI в. проводились по регионально-оптимизированному ансамблю из 20 моделей CMIP6, из которого были исключены модели, воспроизводящие с большой ошибкой изменения климата в АЗРФ за исторический период времени. Использовался наиболее агрессивный сценарий эмиссии парниковых газов SSP5-8.5. По мнению авторов, в контексте рассматриваемой задачи он представляет наибольший практический интерес, поскольку меры по адаптации должны учитывать в том числе и наименее благоприятные из возможных в будущем условий.

Был разработан программный алгоритм расчета параметров физического состояния ММГ при изменении климата. В его первом блоке проводится расчет среднегодовой температуры и мощности сезонно-талого слоя (СТС) для современных и прогнозируемых климатических условий. Во втором инженерном блоке рассчитывается максимальная нагрузка, которую может выдержать стандартная свая, используемая при строительстве фундаментов в криолитозоне. Алгоритм позволяет определить интервал времени после завершения строительства, на протяжении которого расчетная нагрузка

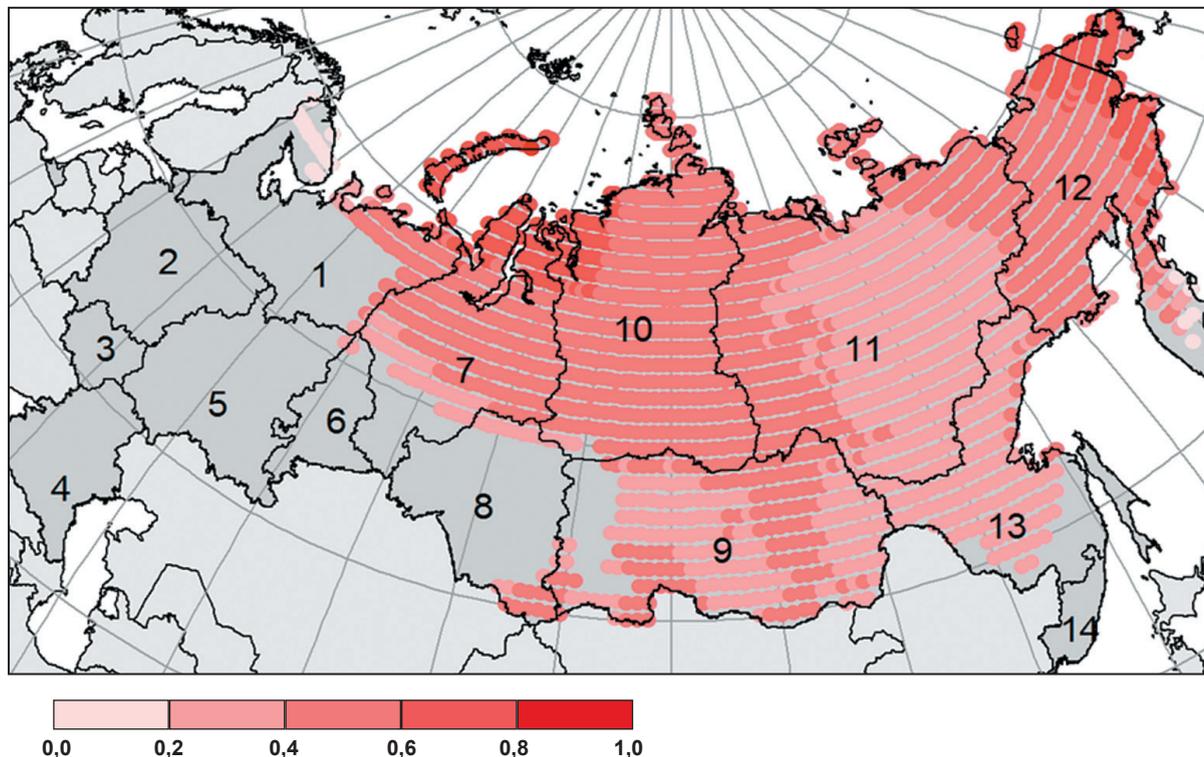


Рис. 1. Прогнозируемые изменения мощности СТС (м) для середины XXI в. по отношению к базовому периоду 1961–1990 гг.
 Fig. 1. Anticipated changes in the season tabetisol thickness (m) by mid-21st century relative to the base period 1961–1990

на сваю будет оставаться в пределах заложенного при проектировании коэффициента запаса для различных климатических проекций. Более подробное описание дано в [7].

Задачей вычислительной части работы является прогноз риска для инфраструктуры, обусловленного деградацией ММГ при изменении климата. Механизм воздействия изменения климата на инфраструктуру в АЗРФ понятен и достаточно хорошо изучен. Большинство объектов жилого фонда в криолитозоне построено на свайных фундаментах. Их устойчивость зависит от того, насколько прочно грунт, смерзшийся с боковой поверхностью сваи ниже сезонно-талого слоя, удерживает ее от погружения. В инженерной геокриологии получены зависимости несущей способности ММГ от различных факторов. Полученные опытным путем закономерности закреплены в своде правил, регламентирующих строительство [8]. В контексте изменения климата главным фактором является температура грунта: с ее увеличением несущая способность ММГ уменьшается, и свая может начать «тонуть» [9]. Меньшее, но также заметное влияние оказывает мощность СТС. Поскольку расположенная в талом слое часть сваи не скреплена с грунтом, несущая способность линейно убывает с увеличением мощности СТС. Согласно прогнозам, изменения климатических факторов на обозримом временном горизонте будут лишь увеличивать риски для инфраструктуры, построенной на ММГ [10–13]. В обзор-

ной работе [14] приведены многочисленные примеры того, что это уже происходит почти повсеместно в криолитозоне России.

Для количественной оценки рисков для инфраструктуры использовался расчетный индекс I_e , определяемый формулой [15]

$$I_e = \Delta ZWS,$$

где ΔZ — прогнозируемое изменение мощности СТС; W — льдистость грунта; S — засоленность грунта.

Для оценки экономических рисков нами предложен количественный индекс уязвимости хозяйственных систем I_v , который рассчитывается для различных административно-территориальных образований начиная с муниципального уровня как произведение средних по макрорегионам значений индекса I_e и оценочной стоимости недвижимой части основных фондов (зданий и сооружений) C_f по формуле

$$I_v = I_e C_f.$$

Результаты исследований

На рис. 1 показан прогноз изменения мощности СТС по отношению к базовому периоду 1961–1990 гг. (периоду основного строительства в криолитозоне), рассчитанный для климатических условий середины XXI в.

Прогностические расчеты по модели ММГ для середины XXI в. указывают на то, что мощность СТС

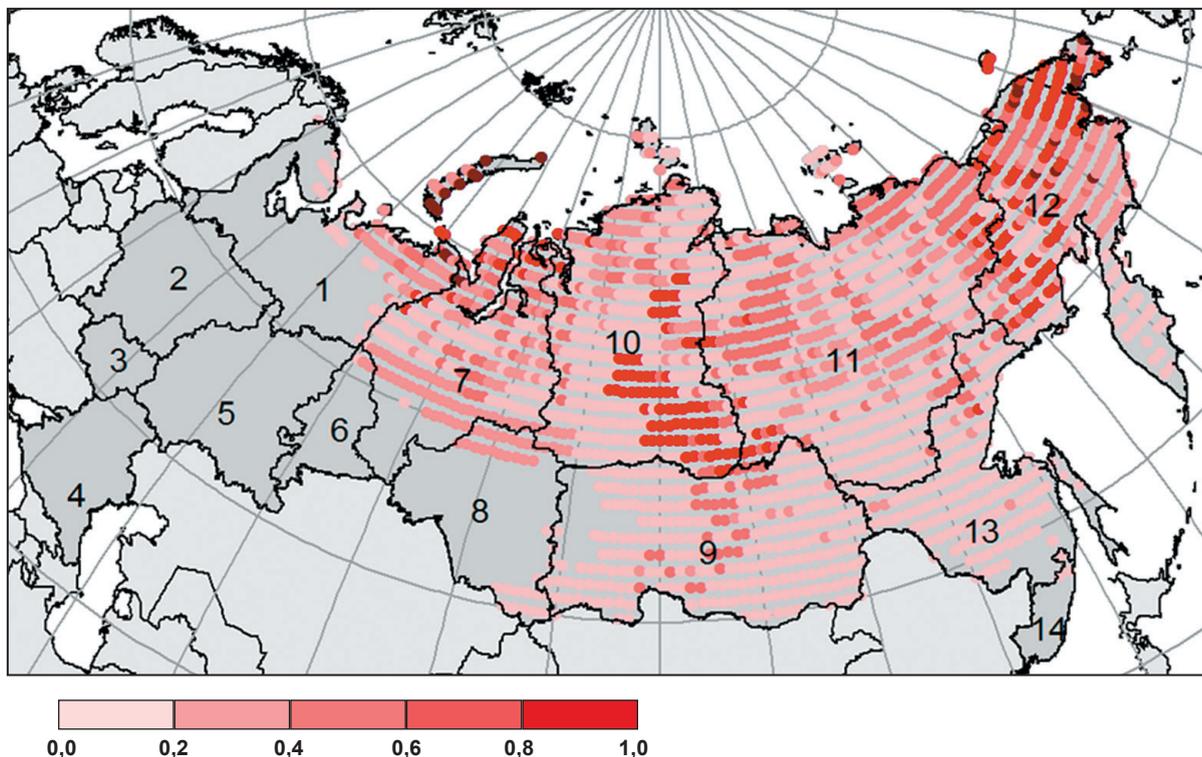


Рис. 2. Прогнозируемые для середины XXI в. значения индекса риска для инфраструктуры.
Fig. 2. Anticipated infrastructure risk index values for the mid-21st century

будет увеличиваться на всей территории криолитозоны, достигая наибольших значений в прибрежных регионах Западной Сибири (полуострова Ямал и Гыданский) и крайнего северо-востока России. В Восточной Сибири оно будет менее выражено (см. рис. 1). Это с неизбежностью приведет к увеличению рисков для инфраструктуры в криолитозоне. На рис. 2 представлена карта нормированного индекса риска для инфраструктуры, рассчитанная для прогнозируемых на середину XXI в. климатических условий, а в табл. 1 приведены средние значения индекса для климатически однородных районов криолитозоны.

На карте, представленной на рис. 2, можно видеть, что районы наиболее высоких рисков для инфраструктуры, имеющие значения индекса 0,6—0,8 и более, расположены в наиболее возвышенной части Среднесибирского плоскогорья (в административном отношении речь идет о Ямало-Ненецком АО), в горных районах северо-востока России (12-й макрорегион, входящие в его состав Чукотский АО, Магаданская область и Камчатский край, имеет максимальное значение индекса — 0,45), на севере Западной Сибири (на Ямальском и Гыданском полуостровах). Максимальных значений индекс достигает на юге и востоке Новой Земли. Для Среднесибирского плоскогорья и Новой Земли определяющим фактором является очень высокая льдистость грунта (25—35%), на севере Западной Сибири и крайнем северо-востоке умеренно высокая льдистость

Таблица 1. Прогнозируемые для середины XXI в. средние значения индекса риска для инфраструктуры в макрорегионах, полностью или частично расположенных в криолитозоне

Table 1. Average risk index values anticipated by mid-21st century for infrastructure in macro-regions, wholly or partially located in the permafrost zone

Макрорегион	Индекс риска для инфраструктуры
1	0,27
7	0,31
9	0,20
10	0,30
11	0,31
12	0,45
13	0,18

грунта (10—25%) сочетается с максимальным увеличением мощности СТС (до 0,5 м и более).

Как отмечалось выше, год ввода здания в эксплуатацию является важной переменной при моделировании вероятного ущерба при деградации ММГ. При этом большинство исследователей упускают

Таблица 2. Площадь объектов жилищного фонда, построенных в различные годы в АЗРФ, тыс. м²
Table 2. Area of housing facilities built in different years in the Russian Arctic, thousand m²

Регион	До 1945 г.	1945—1959 гг.	1960—1979 гг.	1980—1999 гг.	После 2000 г.	Нет данных
Республика Коми	1,0	110,7	1380,5	1470,9	14,8	7,0
Ямало-Ненецкий АО	1,5	21,2	648,8	7525,7	3241,0	88,7
Красноярский край	1,4	469,1	2341,4	3175,2	43,2	1,9
Республика Саха (Якутия)	1,6	7,7	179,0	475,2	50,8	9,0
Чукотский АО	1,7	29,9	399,2	904,7	85,8	18,0

Таблица 3. Стоимость жилищного фонда (в ценах 2023 г.), расположенного в АЗРФ, по годам постройки, млн руб.

Table 3. Cost of housing facilities stock (in 2023 prices) located in the Russian Arctic, by year of construction, million rubles

Регион	До 1945 г.	1945—1959 гг.	1960—1979 гг.	1980—1999 гг.	После 2000 г.	Нет данных
Республика Коми	30	3 491	43 515	46 364	468	220
Ямало-Ненецкий АО	95	1 564	36 314	459 699	228 101	5 205
Красноярский край	28	10 777	52 732	71 653	909	38
Республика Саха (Якутия)	52	293	5 528	14 152	1 809	—
Чукотский АО	115	2 029	31 886	67 643	6 856	1 188

ее из рассмотрения. В нашей работе была сформирована база данных жилых домов, расположенных в пределах криолитозоны АЗРФ, включающая в себя информацию о месте локализации каждого объекта, его площади и годе ввода в эксплуатацию. Информационным ресурсом послужил сайт общественного проекта «Дом.МинЖКХ.РУ» (<https://dom.mingkh.ru/>).

Как показано в табл. 2, 81% площади жилых домов на рассматриваемой территории возведено с 1960 по 1999 гг. Самым «молодым» фондом закономерно обладает Ямало-Ненецкий АО: 28% жилищного фонда региона было построено уже после 2000 г., т. е. имеет достаточно высокий запас прочности фундаментов. Напротив, наиболее «старый» фонд характерен для регионов старого освоения — в Норильском промышленном районе и Воркуте практически каждый второй жилой дом построен до 1980 г., т. е. в совершенно отличных от настоящего времени мерзлотных условиях. При этом данные таблицы показывают, что наибольшая доля всего арктического жилищного фонда, построенного до 1980 г., также расположена на арктической части территории Красноярского края (50%) и Республики Коми (27%), что свидетельствует о повышенной уязвимости этих районов.

Для оценки вероятных ущербов необходимо представление о ценовой структуре жилищного фонда по годам постройки, в частности о стоимости фондов, которые с высокой долей вероятности подвергнутся деформациям и разрушениям в связи с изменением мерзлотных условий. По ранее разработанной и апробированной методике [16] была оценена рыночная стоимость существующих жилых домов (здесь и далее — в ценах 2023 г.). Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Как показали расчеты, всего в АЗРФ в зоне распространения ММГ располагается жилой фонд общей стоимостью порядка 1,1 трлн руб. по состоянию на 2023 г. При этом рыночная стоимость многоквартирных домов, построенных в 1960—1999 гг., составляет 0,8 трлн руб., или 76% совокупной стоимости.

Были рассчитаны значения индекса экономической уязвимости I_v для прибрежной части АЗРФ, где располагаются основные порты с сопутствующей инфраструктурой и некоторые промышленные центры нефтегазового комплекса. Для этого, во-первых, была получена оценка рыночной стоимости жилищного фонда АЗРФ с детализацией по 29 муниципальным образованиям (МО). Во-вторых, также по

заранее отработанным авторами методикам [9] на основании данных Росстата дана оценка балансовой стоимости недвижимой части основных фондов экономики, т. е. зданий и сооружений, для каждого из рассматриваемых МО. Расчет осуществлен для следующих отраслей (в соответствии с Общероссийским классификатором основных фондов): сельского и лесного хозяйства, охоты, рыболовства и рыбоводства, промышленности (добычи полезных ископаемых, обрабатывающих производств, обеспечения электрической энергией, газом и паром, кондиционирования воздуха, водоснабжения и водоотведения, организации сбора и утилизации отходов, деятельности по ликвидации загрязнений), строительства, торговли оптовой и розничной, ремонта автотранспортных средств и мотоциклов, транспортировки и хранения, прочим видам экономической деятельности.

В расчетной методике для каждого вида экономической деятельности постулировалось наличие линейных зависимостей между фондом заработной платы, объемом валового производства и стоимостью соответствующих основных фондов. Правоммерность такого постулата подтверждает проведенный нами анализ корреляционных зависимостей перечисленных показателей для каждой отдельно взятой отрасли экономики на региональном уровне, который в России обеспечен соответствующей статистической информацией.

Для каждой из рассматриваемых перечисленных отраслевых групп основных фондов была проанализирована их видовая структура на региональном уровне и определена доля, которую занимают здания и сооружения. Полученные соотношения были перенесены на муниципальный уровень, что позволило оценить искомое значение стоимости зданий и сооружений для каждого из рассматриваемых муниципалитетов.

На основе этих данных был рассчитан индекс уязвимости хозяйственных систем I_v для различных административно-хозяйственных образований начиная с муниципального уровня. Итоговые результаты расчетов индекса уязвимости хозяйственных систем приведены в табл. 4. Классификация уязвимости МО приведена в условных относительных единицах для совокупности рассмотренных 29 МО: класс 0 — наименее уязвимые ($I_v < 0,001$), 1 — малоуязвимые (0,001—0,01), 2 — умеренно уязвимые (0,01—0,1), 3 — сильно уязвимые (0,1—0,5), 4 — наиболее уязвимые (0,5—1,0).

Обсуждение и выводы

Результаты исследования указывают на то, что к наиболее уязвимым районам относятся Надымский, Пуровский и Ямальский районы Ямало-Ненецкого АО, в меньшей степени — Тазовский район и город Ноябрьск, Заполярный район Ненецкого АО, города Воркута и Норильск. Именно для этих территорий, обладающих вместе с тем наибольшим

промышленным потенциалом в АЗРФ, требуется корректировка адаптационных планов к климатическим изменениям с учетом индекса экономической уязвимости, их детализация до уровня конкретных МО и даже отдельных наиболее значимых хозяйственных объектов.

Можно отметить, что в утвержденных региональных планах адаптации перечисленным территориям уделяется недостаточное внимание. Например, в региональном плане адаптации к изменениям климата Ямало-Ненецкого АО, который считается на сегодня одним из наиболее хорошо проработанных, для указанных районов отмечаются риски деградации ММГ и развития суффозионных процессов. При этом адаптационные мероприятия обозначены очень схематично для региона в целом — «прогнозирование деградации мерзлоты», «корректировка существующих правил землепользования и застройки поселений», формирование «региональной сети геотехнического мониторинга и мониторинга мерзлоты в естественных условиях». В целом по округу приводятся цифры прогноза снижения несущей способности свай в различных грунтах и районах.

Современные технологии, основанные на использовании термосифонов, а также достаточно простые устройства для вентиляции подполий дают возможность понизить температуру грунта и на какое-то время стабилизировать фундамент, утраченный запас прочности [17]. Эти меры достаточно эффективны, но дороги, и целесообразность их применения необходимо оценивать прежде всего с экономической точки зрения. Такая оценка для жилищного фонда Норильска была дана в [18]. Кроме того, нужно принимать во внимание, что они не устраняют проблему, а лишь отодвигают ее решение на более позднее время до тех пор, пока величина потепления не превысит возможности этих методов.

В плане адаптации Республики Коми к изменениям климата отмечено, что «рост температуры воздуха в тундре ведет к таянию вечной мерзлоты, что, в свою очередь, приводит к изменению состава растительного покрова оленьих пастбищ (вытеснение ягеля травами, кустарником)». О геотехнической стороне проблемы не упоминается. Также в плане Красноярского края в качестве ключевой проблемы для Норильска выделено снижение выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, что лишь косвенно связано с адаптацией к климатическим изменениям. По-видимому, речь идет о снижении выбросов парниковых газов, поскольку выбросы других загрязняющих веществ в Норильске напрямую не являются узкой проблемой адаптации, а выходят за ее пределы. Мероприятие, связанное с мониторингом температуры многолетнемерзлых грунтов оснований и деформационным поведением строительных конструкций фундаментов, носит, согласно плану, лишь рекомендательный характер и возложено на предприятия энергетики, расположенные в зоне залегания многолетнемерзлых грун-

Таблица 4. Значения индекса экономической уязвимости для 29 муниципальных образований АЗРФ
Table 4. The economic vulnerability index values for 29 municipalities of the Russian Arctic

Регион	Муниципальное образование	I_v	Класс
Мурманская область	Кольский муниципальный район	0,013 03	2
	Ловозерский муниципальный район	0,000 48	0
	Печенгский муниципальный район	0,004 16	1
Архангельская область	Городской округ Новая Земля	0,000 69	0
	Мезенский муниципальный район	0,004 77	1
Ненецкий АО	Заполярный муниципальный район	0,225 67	3
Ямало-Ненецкий АО	Красноселькупский муниципальный район	0,057 08	2
	Надымский муниципальный район	0,552 97	4
	Приуральский муниципальный район	0,013 73	2
	Пуровский муниципальный район	1,000 00	4
	Тазовский муниципальный район	0,408 21	3
	Шурышкарский муниципальный район	0,002 04	1
	Ямальский муниципальный район	0,582 49	4
	Город Ноябрьск	0,221 04	3
Республика Коми	Городской округ Воркута	0,139 40	3
Красноярский край	Таймырский Долгано-Ненецкий муниципальный район	0,024 78	2
	Туруханский муниципальный район	0,099 23	2
	Город Норильск	0,187 63	3
Республика Саха (Якутия)	Аллаиховский муниципальный район	0,001 54	1
	Анабарский муниципальный район	0,004 92	1
	Булунский муниципальный район	0,003 88	1
	Нижнеколымский муниципальный район	0,002 59	1
	Усть-Янский муниципальный район	0,002 64	1
Чукотский АО	Анадырский муниципальный район	0,004 30	1
	Билибинский муниципальный район	0,009 93	1
	Чукотский муниципальный район	0,001 12	1
	Городской округ Эгвекинот	0,003 82	1
	Городской округ Провиденский	0,001 17	1
	Городской округ Певек	0,009 18	1

тов. Это означает, что здания и сооружения других значимых отраслей экономики и жилищный фонд по каким-то причинам не учитываются.

Главный вывод исследования состоит в том, что необходимы совершенствование и доработка действующих планов адаптации к климатическим

изменениям в регионах АЗРФ, в первую очередь в вопросах, связанных с деградацией ММГ. В большей степени в этих планах проработаны вопросы фактической уязвимости территории к природным опасностям, дается характеристика современной ситуации. Однако для региональных страте-

гий адаптации важна не только инвентаризация возможных опасностей, связанных с изменением климата, но и в определяющей степени понимание внутрирегиональных особенностей и различий в степени и характере уязвимости с учетом особенностей структуры расселения, отраслевой специализации экономики и пр. Это подчеркивает важность рассмотрения локального уровня (муниципальных образований и поселений), который пока фактически отсутствует в иерархии действующих стратегий и планов адаптации.

Финансирование

Прогностическое моделирование ММГ осуществлялось в Государственном гидрологическом институте в рамках выполнения плана научно-технических исследований Росгидромета.

Литература/References

1. Анисимов О. А., Гайда И. В., Му А. Адаптация к изменению климата как путь снижения рисков для бизнеса // *Фундамент. и приклад. климатология*. — 2023. — № 2 (9). — С. 224—235.
Anisimov O. A., Gaida I. V., Moe A. Adaptation to climate change as a factor of lowering business risks. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya* [Fundamental and Applied climatology], 2023, no. 2 (9), pp. 224—235. (In Russian).
2. Мое А., Lamazhapov E., Anisimov O. Russia's expanding adaptation agenda and its limitations. *Climate Policy*, 2022, vol. 23, iss. 5, pp. 1—15. DOI: 2022.10.1080/14693062.2022.2107981.
3. Результаты экспертной оценки качества региональных отчетов по климатической адаптации / Агентство стратег. инициатив. — М., 2023. — 15 с. Expert evaluation of the quality of regional reports on climate adaptation. Agency of strategic initiatives. Moscow, 2023, 15 p. (In Russian).
4. Анисимов О. А., Бадина С. В. Инфраструктура в зоне многолетней мерзлоты // Третий оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Под ред. С. М. Семенова и В. М. Катцова. — М.: Росгидромет, 2022. — С. 417—426.
Anisimov O. A., Badina S. V. Infrastructure in permafrost regions. Third assessment report on climate change and its consequences in the territory of Russian Federation. S. M. Semenov, V. M. Katcov (Eds.). Moscow, Roshydromet, 2022, pp. 417—426. (In Russian).
5. Бадина С. В., Панкратов А. А. Реализация крупных инфраструктурных проектов на территории, прилегающей к акватории Северного морского пути, в контексте климатических изменений // *ИнтерКарто. ИнтерГИС*. — 2022. — № 1 (28). — С. 91—104.
Badina S. V., Pankratov A. A. Implementation of the large infrastructural projects on the territory adjacent to the Northern Sea Route in the context of changing climate. *InterKarto. InterGIS*, 2022, no. 1 (28), pp. 91—104. (In Russian).
6. Порфирьев Б. Н., Елисеев Д. О., Стрелецкий Д. А. Экономическая оценка последствий деградации вечной мерзлоты для жилищного сектора российской Арктики // *Вестн. Рос. акад. наук*. — 2021. — № 2 (91). — С. 105—114. — DOI: 10.31857/S0869587321020067.
Porfiriev B. N., Eliseiv D. O., Streletskiy D. A. Economical estimate of the impact of permafrost degradation on the residential buildings in the Russian Arctic. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk* [Annals of the Russian Academy of Science], 2021, no. 2 (91), pp. 105—114. DOI: 10.31857/S0869587321020067. (In Russian).
7. Анисимов О. А., Лавров С. А., Жирков А. Ф. и др. 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.
Anisimov O. A., Lavrov S. A., Zhirkov A. F. et al. Model assimilation and reanalysis of permafrost data: problem formulation and validation of the model for the European North and East Siberia. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology], 2020, no. 4, pp. 85—94. (In Russian).
8. Свод правил СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88. — М.: М-во регион. развития Рос. Федерации, 2012. — 12 с.
Construction code SP 25.13330.2012. Basements and foundations on permafrost. Updated SNiP 2.02.04-88. Moscow, Ministry of regional development of the Russian Federation, 2012, 12 p. (In Russian).
9. 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. Геоэкология. Геоэкология*. — 2021. — № 1. — С. 14—31.
Melnikov V. P., Osipov V. I., Brushkov A. V. et al. Evaluation of damage to residential and industrial buildings due to temperature changes and permafrost thawing in the Arctic zone of Russian Federation by mid-21st century. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidroekologiya. Geokriologiya* [Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology], 2021, no. 1, pp. 14—31. (In Russian).
10. Анисимов О. А., Гребенец В. И., Стрелецкий Д. А. Хозяйственные объекты, расположенные на вечной мерзлоте // Второй оценочный доклад об изменении климата и его последствиях на территории России / Под ред. С. М. Семенова и В. М. Катцова. — М.: Росгидромет, 2014. — С. 410—458.
Anisimov O. A., Grebenets V. I., Streletskiy D. A. Buildings in permafrost regions. Second assessment report on climate change and its consequences in Russia. S. M. Semenov, V. M. Katsov (eds.). Moscow, Roshydromet, 2014, pp. 410—458. (In Russian).

Научные исследования в Арктике

11. *Гарагуля Л. С., Булдович С. Н., Романовский В. Е. и др.* Геокриологические опасности. Природные опасности в России. — М.: Крук, 2000. — 315 с.
Garagulya L. S., Buldovich S. N., Romanovskii V. E. et al. Geokriologicheskie opasnosti. Prirodnye opasnosti v Rossii [Geocryological hazards. Natural hazards in Russia]. Moscow, Cruk, 2000, 315 p. (In Russian).
12. *Гребенец В. И., Ухова Ю. А.* Снижение геотехнической надежности при ухудшении мерзлотных условий оснований // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2008. — № 5. — С. 24—28.
Grebenets V. I., Ukhova Yu. A. Lowering of geotechnical stability under the worsening of the permafrost conditions of the basements. *Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov* [Basements, foundations and soil mechanics], 2008, no. 5, pp. 24—28. (In Russian).
13. *Стрелецкий Д. А., Шикломанов Н. И., Гребенец В. И.* Изменение несущей способности мерзлых грунтов в связи с потеплением климата на севере Западной Сибири // Криосфера Земли. — 2012. — № 1. — С. 22—32.
Streletskiy D. A., Shiklomanov N. I., Grebenets V. I. Changes of the permafrost bearing capacity due to climatic warming in the north of Western Siberia. *Kriosfera Zemli* [Earth cryosphere], 2012, no. 1, pp. 22—32. (In Russian).
14. *Streletskiy D. A., Anisimov O. A., Vasiliev A. A.* Permafrost Degradation. Snow and ice-related hazards, risks, and disasters. [S. I.], Elsevier, 2014, pp. 303—344.
15. *Анисимов О. А., Стрелецкий Д. А.* Геокриологические риски при таянии многолетнемерзлых грунтов // Арктика XXI век. Естеств. науки. — 2015. — № 2 (3). — С. 60—74.
Anisimov O. A., Streletskiy D. A. Geocryological risks due to thawing permafrost. *Arktika XXI vek* [Arctic XXI Century], 2015, no. 2 (3), pp. 60—74. (In Russian).
16. *Badina S. V.* Estimation of the Value of Buildings and Structures in the Context of Permafrost Degradation: The Case of the Russian Arctic. *Polar Science*, 2021, no. 29, pp. 31—39.
17. *Попов А. П., Милованов В. И., Жмулин В. В. и др.* К вопросу о типовых технических решениях по основаниям и фундаментам для криолитозоны // Инженер. геология. — 2008. — № 3. — С. 22—40.
Popov A. P., Milovanov V. I., Zmulin V. V. et al. On the typical technical solutions for the basements and foundations in permafrost regions. *Inzhenernaya geologiya* [Engineering geology], 2008, no. 3, pp. 22—40. (In Russian).
18. *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.
Melnikov V. P., Osipov V. I., Brushkov A. V. et al. Adaptation of the infrastructure in the Arctic and sub-Arctic to permafrost temperature changes. *Kriosfera Zemli* [Earth cryosphere], 2021, no. 6 (25), pp. 3—15. (In Russian).

Информация об авторах

Анисимов Олег Александрович, доктор географических наук, заведующий отделом климатологии, Государственный гидрологический институт (199053, Россия, С.-Петербург, 2-я линия В. О., д. 23), e-mail: Anisimov.travel@gmail.com.

Бадина Светлана Вадимовна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, географический факультет, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1), e-mail: bad412@yandex.ru.

OPTIMIZATION OF REGIONAL ADAPTATION PLANS TO CLIMATE CHANGE IN THE RUSSIAN ARCTIC BASED ON FORECASTING MODELING

Anisimov, O. A.¹, Badina, S. V.²

¹ State Hydrological Institute (St. Petersburg, Russian Federation)

² Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russian Federation)

The article was received on April 4, 2024

For citing

Anisimov O. A., Badina S. V. Optimization of regional adaptation plans to climate change in the Russian Arctic based on forecasting modeling. *Arctic: Ecology and Economy*, 2024, vol. 14, no. 3, pp. 350—359. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-350-359. (In Russian).

Abstract

Based on the Russian Arctic example, an attempt was made to update the developed regional plans for adaptation to climate change, taking into account currently available scientific knowledge, observational data, climate scenarios and the results of mathematical modeling of natural and socio-economic systems — recipients of climate risks. The authors using the developed methods have calculated the geocryological risk index for the macro-regions of the Russian permafrost zone, as well as the vulnerability index of economic systems for municipalities of the Russian Arctic.

Keywords: *Adaptation, Arctic zone, forecast, modeling.*

Funding

Permafrost forecasting modeling has been done at the State Hydrological Institute as part of the Roshydromet scientific and technological research activity.

Information about the authors

Anisimov Oleg Aleksandrovich, Doctor of Geography, Head of the climatological department, State Hydrological Institute (23, Second Line V.O., St. Petersburg, Russia, 199053), e-mail: Anisimov.travel@gmail.com.

Badina Svetlana Vadimovna, PhD of Geography, Senior Researcher, Department of Geography, Lomonosov Moscow State University (1, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119991), e-mail: bad412@yandex.ru.

© Anisimov O. A., Badina S. V., 2024