

**ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОГО УЩЕРБА ОТ ПОТЕРИ НЕСУЩЕЙ
СПОСОБНОСТИ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В
РЕЗУЛЬТАТЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В АРКТИКЕ В ПЕРСПЕКТИВЕ
ДО 2050 ГОДА**

*А.В.Брушков¹, С.В.Бадина², Д.С.Дроздов³, В.А.Дубровин⁴, М.Н.Железняк⁵, М.Р.
Садуртдинов³, Д.О.Сергеев⁶, А.А.Фалалеева¹, Я.Ю.Шелков¹*

*¹МГУ им.М.В.Ломоносова, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1,
геологический факультет, +7 (495) 939-12-81, brouchkov@geol.msu.ru, ²ИНП РАН, 117418,
г. Москва Нахимовский проспект, д. 47, +7 (499) 129-36-33, bad412@yandex.ru, ³ИКЗ СО
РАН, Тюмень, ул. Малыгина, 86, +7 (3452) 688-781, sciensec@ikz.ru, ⁴Гидроспецгеология,
123060, г. Москва, ул. Маршала Рыбалко, д. 4, +7 (499) 196 02 62, info@specgeo.ru, ⁵ИМЗ
СО РАН, улица Мерзлотная, 36, г. Якутск 677010, +7 (4112) 334-476, fe@mpi.ysn.ru, ⁶ИГ
РАН, Москва, Уланский переулок, дом 13, строение 2, а/я 145, +7 (495) 623-31-1,
sergueevdo@mail.ru,*

В настоящей работе предпринята попытка оценки возможного ущерба от потери несущей способности фундаментов зданий и сооружений для различных сценариев потепления в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) к 2050 г. Оценка проводилась отдельно для 39 муниципальных образований (МО) АЗРФ, расположенных в криолитозоне. Предполагаемое изменение среднегодовых температур грунтов в выделенных муниципальных образованиях АЗРФ взято из прогнозных данных Климатического центра Росгидромета и сценариев изменения климата RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5, по трендам изменения температур воздуха и грунтов и фактическим данным по изменениям температур в основаниях зданий. Принималось, что основная часть зданий и сооружений построена с сохранением мерзлого основания грунтов, а качестве фундамента выбирались наиболее распространенные висячие сваи. Оценивалось изменение их несущей способности, беря в расчет развитие деформаций в случае, если это изменение превышало запас прочности по СП 25.13330.2012. Можно предполагать ущерб для зданий и инженерных сооружений в АЗРФ к середине столетия около 5-7 трлн руб., что в целом согласуется с другими оценками. Ущерб жилому фонду ожидается на порядок меньше, около 700 млрд руб.

Ключевые слова: оценка ущерба, Арктическая зона Российской Федерации, многолетнемерзлые породы, изменения температуры, оттаивание, жилые и промышленные здания, несущая способность мерзлых грунтов

Климатические изменения являются причиной экономического ущерба. Было показано (Hjort et al., 2018), что в XXI в. ущерб от дополнительного потепления, вызванного уменьшением альбедо из-за потери морского льда и снега, а также эмиссии метана, добавится к ежегодному ущербу от потепления, который оценивается от 7.5 трлн до 91.3 трлн US\$ ежегодно. Даже если потепление составит только около 1.5°C, дополнительно будет потеряно в целом 24.8 трлн \$. По другим оценкам, оттаивание мерзлоты в Арктике будет стоить обществу 43 трлн \$ до конца столетия. Цель настоящей работы – попытка оценить возможный ущерб от потери несущей способности фундаментов зданий и сооружений при различных сценариях потепления в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) к 2050 г.

Методика оценки ущерба состояла из нескольких стадий: 1) оценивались возможные сценарии изменения температур воздуха в выделенных районах; 2) оценивались возможные изменения температур мерзлых грунтов; 3) оценивалось изменение несущей способности грунтов; 4) выполнялась оценка ущерба. Оценка проводилась отдельно для 39 муниципальных образований (МО) АЗРФ¹, расположенных в районах развития ММП.

Оценка возможных среднегодовых температур воздуха в выделенных муниципальных образованиях АЗРФ выполнялась на основе прогнозных данных Климатического центра Росгидромета «Изменение климата России в 21-м веке» (Климатический центр..., 2020) и сценариев изменения климата RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 (Второй оценочный доклад..., 2014). При этом учитывался диапазон изменений среднегодовых температур воздуха по различным сценариям. В дальнейшем все три сценария учитывались как отдельные варианты, и по ним определялся максимальный и минимальный ущерб.

Среднегодовая температура грунтов (СГТГ) отличается от среднегодовой температуры воздуха (СГТВ) на величину общей сдвижки, которая складывается из влияния радиационной поправки, снега, растительности, водного покрова, температурной сдвижки и влияния атмосферных осадков. Общая сдвижка оценивалась двумя способами – расчетным с учетом возможных изменений параметров в связи с изменением климата и по данным об общей сдвижке, наблюдаемой в районах АЗРФ (Геокриология СССР, 1989). Оба значения сравнивались и в дальнейшем учитывались в оценке ущерба как различные варианты. Расчет выполняется в соответствии с методикой, изложенной в (Основы мерзлотного прогноза, 2016). При этом по грунтовым условиям и характеристикам грунтов,

¹ АЗРФ рассмотрена в границах, установленных Указом Президента Российской Федерации от 02.05.2014 г. № 296 «О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации» с последующими редакциями.

а также характеристикам покровов и других факторов, влияющих на температурный режим, выбирался реалистичный диапазон их изменения, и расчеты выполнялись для крайних значений выбранных диапазонов характеристик. При этом предполагалось, что на строительных площадках и непосредственно под зданиями снежный и растительный покровы отсутствуют, что является типичным случаем для большинства зданий.

Для оценки изменения несущей способности грунтов принимается, что основная часть зданий и сооружений в АЗРФ построена по I принципу строительства с сохранением мерзлого основания грунтов. В качестве фундамента выбираются висячие сваи как наиболее распространенный вариант. Сначала оценивается их несущая способность в настоящий момент, которая, как предполагается, должна соответствовать несущей способности, определенной в проекте. Затем проводятся расчеты для всех возможных вариантов изменения температур грунтов.

При этом учитывались заложенные в СП 25.13330.2012 “Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах” (2012) опущения возможности повышения температур основания для песчаных и крупнообломочных грунтов на 0.5°C , а для глинистых на 1.0°C без ущерба для несущей способности оснований. Величины несущей способности в настоящее время и середине столетия в соответствии с прогнозом повышения температуры основания сравнивались, и, если сокращение несущей способности в результате потепления грунтов основания составляло 15%, фундамент здания считался потерявшим несущую способность в соответствии с п. 7.2.1 СП 25.13330.2012 и п. 5.7.2 СП 22.13330.2016 “Основания зданий и сооружений”². В наших расчетах значения R_{af} (прочность смерзания грунта с материалом сваи) принимались при средней (эквивалентной) температуре грунта T_e в соответствии с п.7.2.7 СП 25.13330.2012.

В первом варианте расчетов мы исходили из следующего. Нормативное значение среднегодовой температуры многолетнемерзлого грунта T_{0n} определяется 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. Практически невозможно установить, каким образом в каждом конкретном случае изыскатели и проектировщики определяли расчетную среднегодовую температуру мерзлого грунта. Принимался оптимистичный вариант, что их оценки и расчеты были правильными, и она близка в настоящее время к фактической. О том, что, вероятнее всего, они ее занижали, свидетельствует значительное количество деформаций

² URL: <http://docs.cntd.ru/document/456054206>

зданий и сооружений в АЗРФ. При этом, конечно, будущее рискует быть еще более пессимистичным, чем оценки, которые мы даем в настоящей работе.

Наиболее сложной, на наш взгляд, является оценка изменения среднегодовых температур грунтов на территории застройки (нарушенной территории) по сравнению с температурами грунтов в естественных условиях. Так, для Норильского района установлено, что на территории застройки при использовании I принципа строительства (с сохранением мерзлого состояния оснований) такое изменение температур грунтов составляет от -1°C до $+2^{\circ}\text{C}$ (Геокриология СССР, 1989), а для Якутска, например, по данным П.И. Мельникова, а также Минстроя Республики Саха (Якутия), более характерно изменение температур грунтов на территории застройки около -2°C , т.е. преимущественно понижение температуры. В пос. Надежный в Норильском промышленном районе среднегодовая температура грунтов до застройки изменялась от -3°C до -4°C , а после застройки под одним из зданий она составляла от -3.1°C до -5.1°C , что свидетельствует об эффективности охлаждающей работы подполья, где, вероятно, отсутствовали растительный и снежный покровы. Вне контура зданий температура грунта в населенных пунктах Центральной Якутии, по данным П.А. Соловьева, значительно понижается по сравнению с температурой в естественных условиях. Так, для Якутска для застройки возрастом 200-300 лет такое понижение температур составляет от 4°C до 6°C , для застройки возрастом 50-100 лет от 2°C до 4°C , и для застройки возрастом 20-30 лет понижение температуры составляет от 1°C до 2°C . При этом для пос. Чурапча понижение температуры на территории застройки составляет $2-3^{\circ}\text{C}$, а для пос. Абалах от 1°C до 2°C . Необходимо учитывать, что среднегодовая температура воздуха в подполье зданий выше, чем снаружи, на $1-3^{\circ}\text{C}$ в г. Норильске и на $0.2-1^{\circ}\text{C}$ в г. Якутске (Геокриология СССР, 1989). Если подполье обеспечивает надлежащее охлаждение, в Норильске, по данным М.В. Кима, наблюдается понижение температуры по сравнению с естественными условиями от -3°C до -6°C , в Якутске от -1°C до -3°C , а в Игарке от -0.5°C до -1.5°C .

Во втором варианте расчетов температура в основании сооружения определялась по СП 25.13330.2012. Для прогноза изменения температур воздуха в середине XXI столетия использовались данные из «Второго оценочного доклада изменения климата на территории Российской Федерации» (2014) Росгидромета. В среднем для России число дней со снегом сокращается на 0.75 дня за 10 лет (Доклад об особенностях климата на территории РФ за 2018 г., Росгидромет, 2018³). По данным World Meteorological Organization (WMO)⁴, к середине XXI в. ожидается почти повсеместное сокращение числа морозных дней в году

³ URL: <http://global-climate-change.ru/index.php/ru/component/content/article/2189-doklad>

⁴ URL: <http://seakc.meteoinfo.ru/research/34-change-climat21/130-change>

(т.е. дней с минимальной суточной температурой ниже 0°C) на 20-30 суток. Таким, образом, нами было принято уменьшение продолжительности зимнего периода к середине столетия на 20 суток, что скорее является минимальной оценкой.

В данной статье авторы предлагают свой вариант методического подхода к прогнозированию ущербов в криолитозоне. Наибольший ущерб в контексте прогнозируемых геокриологических изменений связан с жилищным фондом и зданиями и сооружениями отраслей экономики⁵. В муниципальном разрезе, масштаб которого принят оптимальным для данного исследования (возможность сопоставления социально-экономических и природных параметров в едином пространственном масштабе), существуют серьезные ограничения в плане обеспеченности показателями стоимости данных видов основных фондов. Для жилфонда информация отсутствует, доступен лишь показатель “Наличие основных фондов на конец года по полной учетной стоимости по коммерческим и некоммерческим организациям (тыс. руб.)”. Под этим видом фондов следует понимать фонды организаций муниципальной формы собственности, т.е. муниципальный жилищный фонд и объекты городской инфраструктуры, муниципальные социально значимые объекты недвижимости (детские дошкольные учреждения, школы, библиотеки и пр.). По нашим оценкам, эти фонды составляют для рассматриваемых муниципальных образований в среднем 2-25% от общей суммы, причем их значение наиболее высоко в наименее экономически развитых дотационных районах.

Поскольку этих данных недостаточно для исчерпывающей оценки ущербов на уровне муниципальных образований, необходимо провести дооценку остальной части основных фондов, исходя из значения их суммарной стоимости в соответствующем регионе по видам экономической деятельности. Региональный показатель “Стоимость основных фондов (на конец года; по полной учетной стоимости; миллионов руб.)” включает в себя здания (жилые и нежилые) и сооружения по всем видам экономической деятельности. К сооружениям относятся такие объекты, как, например, магистрали, автомобильные, железные дороги, взлетно-посадочные полосы аэродромов; мосты, эстакады, тоннели; гидротехнические сооружения; магистральные трубопроводы, линии связи и электропередачи; местные трубопроводы, шахты, скважины, сооружения для отдыха, развлечений и проведения досуга и пр. Приватизированное и выкупленное гражданами жилье, не являющееся основными фондами организаций, в данном показателе не

⁵ Согласно Общероссийскому классификатору основных фондов (ОКОФ), действующему с 01.01.2017 и утвержденному приказом Росстандарта от 12.12.2014 № 2018-ст.

отражается⁶. Необходимо иметь в виду, что конструкции оснований фундаментов части таких сооружений не предполагают использование свай, поэтому наша методика оценки потери несущей способности в этом случае имеет ограничения. В целом, использование этих двух индикаторов (стоимость жилищного фонда и стоимость зданий и сооружений по видам экономической деятельности) позволяет с максимальной подробностью охватить все наиболее уязвимые к геокриологическим изменениям элементы основных фондов. Информационной базой данного этапа исследования послужили База данных Росстата «Показатели муниципальных образований», а также сборники Росстата «Регионы России. Социально-экономические показатели», «Российский статистический ежегодник 2019» и ряд других документов. В целях оценки стоимости жилфонда на основании вышеизложенных информационных ресурсов была создана база данных в территориальном разрезе муниципальных образований регионов АЗРФ, включающая следующие показатели: адрес жилого дома, год ввода в эксплуатацию, площадь. Всего в базу данных вошли 23.9 тыс. жилых домов общей площадью порядка 44.6 млн м².

Для оценки потенциальных ущербов от таяния многолетней мерзлоты требуется рассчитать рыночную стоимость (использование которой при данной задаче представляется предпочтительным, в отличие от, например, кадастровой, ликвидационной и других видов стоимости) жилищного фонда, расположенного в ареалах потенциального риска. Средняя рыночная стоимость 1 м² общей площади жилья была получена на основании нормативно-правовых документов региональных и муниципальных органов власти «Об утверждении размера средней рыночной стоимости одного квадратного метра общей площади жилья», с официальных сайтов администраций муниципальных образований, а также при отсутствии данных – посредством анализа сайтов рынка недвижимости. В наименее статистически обеспеченных МО (например, в некоторых арктических районах Якутии) полностью отсутствует информация о площади существующего перечня жилых домов, либо их доля превышает 50%. В таком случае оценка их стоимости проводилась по следующему упрощенному алгоритму: показатель общей площади жилых помещений из базы данных показателей муниципальных образований Росстата перемножался со средней рыночной стоимостью 1 м² жилья в соответствующем муниципалитете.

Для оценки стоимости зданий и сооружений принималось допущение, что показатель стоимости основных фондов пропорционален объему валового производства по

⁶ Подробнее см. Об утверждении Указаний по заполнению форм федерального статистического наблюдения № 11 «Сведения о наличии и движении основных фондов (средств) и других нефинансовых активов», приказ Минэкономразвития России № 717 от 29 ноября 2019 г.

соответствующему виду экономической деятельности, а объем валового производства в свою очередь пропорционален фонду заработной платы с поправкой на среднеотраслевые коэффициенты, полученные для регионов России. В разрезе муниципальных образований в открытом доступе также отсутствует статистическая информация по объемам валового производства в стоимостном выражении по многим значимым отраслям экономики. Росстатом даны лишь следующие отрасли, формирующие добавленную стоимость: объем промышленного и сельскохозяйственного производства, оборот розничной торговли (т.е. отрасли, по которым напрямую можно оценить стоимость основных фондов на основании прямой пропорции).

Фонды по видам экономической деятельности (согласно ОКВЭД) рассчитаны для каждого МО следующим образом: стоимость фондов по региону распределена пропорционально доле каждого МО в валовом производстве соответствующей отрасли. Основные фонды из категории “Прочие виды” были распределены для каждого МО пропорционально суммарному валовому производству по всем отраслям. Такая оценка достаточно грубая, однако была проведена следующая процедура верификации: Росстатом даются значения стоимости основных фондов по некоторым крупнейшим городам. Таким образом, расчетные значения можно сравнить с фактическими. Например, расчеты по городам регионов, имеющих арктические территории, дали следующие результаты: г. Мурманск – 94% (доля расчетного значения от фактического); г. Красноярск – 101%; г. Петрозаводск – 85%; г. Якутск – 114% и пр.). В связи с этим можно утверждать, что расчетные значения близки к фактическим, и, главное, в целом учтены внутрирегиональные пропорции и дифференциация. Далее, для повышения точности расчетов и снижения погрешности, из общерегионального значения стоимости основных фондов было вычтено значение, данное Росстатом для городов, и уже получившийся остаток распределяется по оставшимся МО. Обычно доля регионального центра и крупнейших городов в основных фондах весьма велика. Например, для регионов АЗРФ доля столиц по этому показателю составляет: Анадырь – 49%, Мурманск – 22%, Красноярск – 25%, Архангельск – 21% и т.д., что существенно снижает погрешность произведенных дооценок.

Важно понимать, какую часть в общей стоимости основных фондов составляют здания и сооружения, как наиболее восприимчивая составляющая к деградации ММП. В общей структуре основных фондов (среднероссийское значение) доля зданий и сооружений – 64% (остальное приходится на машины и оборудование, транспортные средства и пр. виды), т.е. среднеотраслевой понижающий коэффициент равен 0.64. Если несущая способность фундамента изменялась на 15%, здания и инженерные сооружения считались аварийными, и их стоимость относилась на счет ущерба.

Табл. 1. Расчеты ущерба применительно к зданиям и сооружениям по всем видам экономической деятельности при различных сценариях

Варианты	Ущерб, млн руб.		Описание
	min	max	
1	Максимальный (9 614 862.25)		По методике (Основы прогноза..., 2016) и сценариев изменения климата RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5.
2	Максимальный (9 614 862.25)		По методике (Основы прогноза..., 2016) и наблюдающихся трендов изменения температуры воздуха (Второй оценочный..., 2014)
3	Максимальный (9 614 862.25)		По методике (Основы прогноза..., 2016) для нарушенных условий по RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5
4	979 704.55	8 080.641.21	По методике (Основы прогноза..., 2016) для нарушенных условий, с наблюдающимися трендами изменения температуры воздуха
5	3 999 389.33	9 614 862.25	По коэффициентам корреляции (Второй оценочный..., 2014) изменения температур воздуха и грунтов и трендам изменения температур воздуха по RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5
6	Менее 50 млрд руб.	8 417 438.29	По коэффициентам корреляции (Второй оценочный..., 2014) изменения температур воздуха и грунтов с наблюдающимися трендами изменения температуры воздуха.
7	6 251 189.56	9 606 920.00	По коэффициентам корреляции (Второй оценочный..., 2014) изменения температур воздуха и грунтов и трендам изменения температур воздуха по RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5. Исходные температуры по литературным и фондовым источникам для естественных и нарушенных условий
8	Менее 50 млрд руб.	7 578 109.49	По коэффициентам корреляции (Второй оценочный..., 2014) изменения температур воздуха и грунтов с наблюдающимися трендами изменения температуры воздуха Исходные температуры по литературным и фондовым источникам для естественных и нарушенных условий
9	9 543 263.80	9 614 862.25	При условии, что температуры грунтов в подпольях зданий выше от 0.2°C до 3°C по сравнению с температурой воздуха для климатических сценариев по RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 (для нарушенных условий)
10	Менее 50 млрд руб.	2 145 121.54	При условии, что температуры грунтов в подпольях зданий выше от 0.2°C до 3°C по сравнению с температурой воздуха, для трендов изменения температуры воздуха из (Второй оценочный..., 2014)
11	345 690.41	9 614 862.25	По СП 25.13330.2012 для климатических сценариев по RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 (для нарушенных условий)
12	49 707.27	9 606 491.11	По СП 25.13330.2012 для трендов изменения температуры воздуха из (Второй оценочный..., 2014) (для нарушенных условий)

Оценка изменения возможных среднегодовых температур воздуха в выделенных районах (муниципальных образованиях) АЗРФ выполнялась, как указывалось ранее, на основе сценариев изменения климата RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 (Второй оценочный доклад..., 2014). Все три сценария учитывались, и выбирались максимальная и минимальная оценки. Результаты расчетов сведены в Табл. 1.

При осреднении данных получается значение около 6,5 трлн. руб. для всех сценариев. Важно отметить, что в настоящее время нельзя считать приоритетным какой-либо из этих вариантов. Вероятно, что варианты для нарушенных условий в большей степени отражают условия на застроенных территориях. Значительный диапазон оценок возможного ущерба в Табл.1 не является основанием для выбора крайних (максимального или минимального) вариантов. И максимальный, и минимальный варианты получены для крайних значений теплофизических характеристик грунтов, и в действительности, ввиду разнообразия природных условий на застроенных или нарушенных территориях, объективной оценкой будут являться скорее промежуточные значения возможного ущерба.

В целом, по-видимому, можно предполагать ущерб для зданий или инженерных сооружений в АЗРФ к середине столетия около 5-7 трлн руб. или больше (Рис.1).



Рис. 2. Экономический ущерб в муниципальных районах и городах АЗРФ.

Ущерб жилому фонду ожидается примерно, как и стоимость основных жилых фондов, на порядок меньше, около 700 млрд руб. к середине столетия.

Следует иметь в виду, что деформации и разрушения зданий и инженерных сооружений в АЗРФ будут развиваться постепенно, и, очевидно, несколько отставать от изменений температурного режима грунтов.

В данной работе рассматривалась только АЗРФ. Большие территории криолитозоны, где изменения температур грунтов также будут происходить и сопровождаться, возможно, еще большими деформациями и разрушениями, например, Забайкалье (г. Чита), Центральная Якутия (гг. Якутск, Мирный), Магаданская область (г. Магадан) и др., также следует рассматривать, как территории, где в будущем можно ожидать крупный ущерб, и включить их в систему будущего мониторинга криолитозоны.

Некоторые (возможно, немалые) поправки к прогнозным расчетам могут иметь место в связи с особенностями цикличности потеплений-похолоданий климата в XXI в., как это было и в прошлом столетии.

Литература

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. ISBN 978-5-9631-0322-7.
2. Геокриология СССР. Западная Сибирь / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1989.
3. Климатический центр Росгидромета, «Изменение климата России в 21-м веке» URL: <https://cc.voeikovmgo.ru/ru/klimat/izmenenie-klimata-rossii-v-21-veke>
4. Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях / Кол. авт. В.А. Кудрявцев, В.Г. Меламед, Л.С. Гарагуля Л.С. и др. / Под ред. А.В. Брушкова, Л.С. Гарагули. М.: МГУ, 2016.
5. СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М.: 2012. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200095519>
6. *Hjort, J., Karjalainen, O., Aalto, J. et al.* Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century // *Nature communications*. 2018. Vol. 9(1), 5147. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07557-4>