

---

# Изменение климата в Российской Арктике: риски и новые возможности

---



Март 2022

---

## АВТОРЫ



**Олег Анисимов**

**д.г.н., зав отделом исследований изменений климата, Государственный гидрологический институт (ГГИ)**



**Светлана Бадина**

**к.г.н., с.н.с., лаборатория региональной политики и региональных инвестиционных процессов РЭУ им. Г.В.Плеханова**



**Марина Белоуцкая**

**к.г.н., доцент кафедры информатики, С.Петербургский медицинский университет (СПбМУ)**



**Евгений Володин**

**д.ф-м.н, в.н.с., Институт вычислительной математики РАН (ИВМ РАН)**



**Сергей Лавров**

**д.т.н., г.н.с., ГГИ**



### Борис Шерстюков

**Д.г.н.,  
зав. лаб. Исследования последствий изменения  
климата,**  
Всероссийский научно-исследовательский  
институт гидрометеорологической информации  
(ВНИИГМИ)



### Дмитрий Стрелецкий

**Ph.d, профессор** университета Дж. Вашингтона,  
США



### Василий Кокорев

Университет Твентэ, Голландия



### Ирина Гайда

**Академический директор**  
Центр энергетики Московской школы управления  
СКОЛКОВО



### Никита Доброславский

**Директор программы «Арктический диалог»**  
Московской школы управления СКОЛКОВО

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>АВТОРЫ .....</b>	<b>2</b>
<b>СПИСОК ТЕРМИНОВ И СОКРАЩЕНИЙ .....</b>	<b>5</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>8</b>
<b>КАК ПОЛУЧАЮТ ПРОГНОЗЫ КЛИМАТА .....</b>	<b>11</b>
<b>СЦЕНАРНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КЛИМАТА С УЧЕТОМ МИРОВОГО СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ .....</b>	<b>17</b>
<b>УМЕНЬШЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПРОЕКЦИЙ .....</b>	<b>21</b>
<b>ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ЭКОСИСТЕМЫ АРКТИКИ .....</b>	<b>27</b>
<b>РАСТИТЕЛЬНОСТЬ АРКТИКИ .....</b>	<b>28</b>
Продуктивность растительности .....	28
Смещение границ растительных зон .....	31
Изменения растительности в прошлые теплые эпохи .....	32
Прогноз изменения растительности .....	34
<b>МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫЕ ГРУНТЫ .....</b>	<b>38</b>
Влияние экосистем Арктики на углеродный цикл .....	45
<b>УСТОЙЧИВОСТЬ ЭКОСИСТЕМ АРКТИКИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА .....</b>	<b>49</b>
<b>ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА .....</b>	<b>54</b>
<b>ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА В КОНТЕКСТЕ МИРОВОЙ И НАЦИОНАЛЬНОЙ ПОЛИТИКИ .....</b>	<b>60</b>
<b>ОСНОВНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В АРКТИКЕ ДЛЯ ЭКОНОМИКИ .....</b>	<b>67</b>
Последствия, обусловленные изменением растительности .....	67
Последствия, обусловленные изменением мерзлоты .....	70
Изменения морского льда и развитие северного морского пути .....	73
<b>РЕКОМЕНДУЕМЫЕ МЕРЫ ПО АДАПТАЦИИ К ИЗМЕНЕНИЮ КЛИМАТА В АРКТИКЕ .....</b>	<b>78</b>
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>83</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>85</b>

## СПИСОК ТЕРМИНОВ И СОКРАЩЕНИЙ

<b>АЗРФ</b>	часть Арктики, расположенная на территории Российской Федерации.
<b>Анаэробные условия</b>	условия, при которых отсутствует кислород и невозможно окисление углерода до углекислого газа. Такие условия имеются в болотах ниже уровня болотных вод.
<b>Арктика</b>	в общем случае определяется как пространство, находящееся к северу от полярного круга, охватывающее часть континентальной территории, арктические острова, моря и Северный ледовитый океан. Часто ее рассматривают совместно с субарктической областью.
<b>Арктический Совет<sup>1</sup></b>	организация, учрежденная 19 сентября 1996 представителями Правительств 8 Арктических государств (Канады, Дании, Финляндии, Исландии, Норвегии, Российской Федерации, Швеции и Соединенных Штатов Америки), с целью улучшения сотрудничества, координации и взаимодействия по вопросам Арктики, представляющим взаимный интерес, при широком привлечении арктических коренных народов.
<b>Арктическая тундра</b>	биолиматическая зона в Арктике, в которой доминируют лишайники, мхи, малочисленные виды кустарниковой растительности и небольших деревьев.
<b>Биом</b>	сообщество растений, характеризующееся определенным сочетанием различных их видов. Например, тундра, широколиственный лес, и т.п.
<b>Геокриологические риски</b>	вероятность повреждения объектов инфраструктуры, обусловленного деградацией многолетнемерзлых грунтов
<b>Деградация многолетнемерзлых грунтов</b>	любые их изменения, при которых происходит один или несколько из перечисленных процессов: увеличение температуры грунта, глубины сезонного таяния, уменьшение мощности (толщины) мерзлых пород, образование таликов, сокращение площади распространения.
<b>Инфраструктура</b>	обширный класс созданных человеком объектов, включающий в себя различные постройки, имеющие фундамент, сооружения транспортной сети (дороги, взлетно-посадочные полосы, мосты и тоннели, трубопроводы, речные и морские порты), линии электропередач и иные инженерные сооружения, имеющие определенную функцию в системе экономических и социальных отношений, или в природопользовании/охране окружающей среды. Инфраструктура является необходимым атрибутом экономического развития как на региональном, так и на национальном и глобальном уровнях.
<b>Климатически обусловленное распространение вечной мерзлоты</b>	территория, на которой климатические условия таковы, что почва ниже уровня сезонного оттаивания может иметь отрицательную температуру на протяжении всего года. На фактическое наличие или же отсутствие вечной мерзлоты влияют помимо климата также и иные факторы, например растительность, теплофизические свойства почвы, и т.п. По этой причине климатически обусловленное распространение может отличаться от реального.

<sup>1</sup> Материалы об Арктическом Совете: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Арктический\\_совет](http://ru.wikipedia.org/wiki/Арктический_совет).  
Декларация об учреждении Арктического Совета: <http://www.lawmix.ru/abro.php?id=6719>

<b>Климатические проекции</b>	Результаты расчетов параметров климата по гидродинамическим моделям для интервалов времени в будущем при заданных условиях воздействия на климатическую систему.
<b>Криолитозона</b>	часть территории суши и Арктического шельфа, на которой распространены многолетнемерзлые грунты.
<b>Криопэги</b>	переохлажденные минерализованные подземные воды с температурой заморзания ниже 0 °С.
<b>Льдистость</b>	доля объема многолетнемерзлой толщи, занятая льдом. Как правило, на картах указывается средняя льдистость верхнего слоя, ограниченного несколькими метрами. Измеряется в процентах.
<b>Ледовый комплекс</b>	многолетнемерзлые породы с высоким содержанием льда в приповерхностном слое толщиной в несколько метров. Часто встречается на побережье арктических морей.
<b>МГЭИК</b>	Межправительственная Группа Экспертов по Изменению Климата, более известная по своей англоязычной аббревиатуре IPCC. Состоит из трех рабочих групп (РГ). Занимается подготовкой периодических докладов, в которых оцениваются современные и ожидаемые в будущем изменения климата (Первая РГ), последствия таких изменений (РГ-2), а разработкой стратегии адаптации к ним (РГ-3). До настоящего времени были выпущены 5 таких отчетов в 1991, 1995, 2001, 2007 и 2014 гг. В 2007 г. МГЭИК <sup>2</sup> была присуждена Нобелевская премия Мира, которую эта организация разделила с А.Гором.
<b>Многолетнемерзлые грунты<sup>3</sup>, также называемые «многолетняя мерзлота», «вечная мерзлота»</b>	любое вещество, находящееся ниже поверхности Земли, температура которого на протяжении двух или более последовательных лет остается отрицательной.
<b>Нормы климатических характеристик</b>	типичные значения характеристик, например, средней годовой температуры воздуха в данном пункте наблюдений, осредненные за достаточно большой интервал времени. Всемирная метеорологическая организация рекомендует для расчета современных норм осреднять характеристики за период 1961–1990 г. Возможно также рассчитывать нормы за любой иной период времени.
<b>Регрессия и трансгрессия многолетнемерзлых грунтов</b>	периодическое отступление и расширение области, занятой многолетнемерзлыми грунтами, в силу различных причин, как правило, изменений климата. Часто рассматривают эти процессы в геологических масштабах времени, порядка тысячелетий, хотя также можно применять эти термины и в пределах одного столетия – нескольких десятилетий.
<b>Сезонно-талый слой</b>	верхний слой почвы над вечной мерзлотой, который ежегодно протаивает в летнее время. Сезонно-талый слой (СТС) играет огромную роль, поскольку он определяет количество вещества, вовлеченного в энерго и массообмен между почвой и атмосферой в криолитозоне. Толщина (обычно ее называют мощностью) СТС является одним из важнейших параметров состояния многолетнемерзлых грунтов. Характерные мощности СТС составляют несколько десятков сантиметров в наиболее северных областях сплошной мерзлоты, около 1 метра в области прерывистого распространения, и более 2 метров, а островной зоне.

<sup>2</sup> Подробнее о МГЭИК на <http://www.ipcc.ch>

<sup>3</sup> Материалы о многолетнемерзлых грунтах представлены на портале: <http://www.permafrost.su>

---

<b>Сомкнутость многолетнемерзлых грунтов</b>	доля площади, занимаемая многолетнемерзлыми грунтами на данной территории. В зависимости от сомкнутости различают области сплошного (мерзлота занимает более 90% площади), прерывистого (50%–90%), островного (10%–50%) и редкоостровного (<10%) распространения многолетнемерзлых грунтов, между которыми можно провести условные границы.
<b>Субарктическая область</b>	территория, примыкающая с юга к Арктике, тесно связанная с ней общими природными явлениями и процессами, например наличием многолетнемерзлых грунтов, которые встречаются и южнее полярного круга.
<b>Тайга</b>	лесная зона, граничащая на севере с тундрой, в которой доминируют хвойные деревья.
<b>Талик</b>	протаявший ниже СТС слой многолетнемерзлых грунтов, над которым находится слой сезонного промерзания. Различают сквозные и несквозные талики. В первом случае протаивает вся толща мерзлых пород, при этом образуется талый «остров», окруженный мерзлотой. Во втором случае под талым слоем остаются мерзлые породы, а выше талого слоя имеет место сезонное промерзание.
<b>Термокарстовые просадки</b>	понижения уровня земной поверхности при таянии льдосодержащих подстилающих мерзлых грунтов.
<b>Ppm</b>	единица, используемая для измерения концентрации различных газовых примесей в атмосфере, обозначающая количество молекул данного газа на миллион молекул других газов. Также иногда называют миллионными долями.

---

## ВВЕДЕНИЕ

В мире растет общественный запрос на понятную и объективную информацию о том, является ли изменение климата главным вызовом 21 века и «вселенским злом», как это часто преподносится в печати. Дискурс на эту тему риторичен, если не анализировать полный спектр последствий с учетом баланса климатических рисков и открывающихся потенциальных выгод. Такой анализ невозможен вне конкретного географического, социально-экономического и геополитического контекста, и его результаты могут различаться для разных стран. В этом проявляется противоречие между глобальным характером изменения климата и его последствиями, которые за редким исключением локальны и специфичны. Это же объясняет, почему разные страны акцентируют внимание на различных климатозависимых процессах и объектах, в силу чего недостижим полный международный консенсус по проблеме изменения климата.

Россия занимает особую позицию на глобальной «карте» климатических изменений. Последствия изменения климата у нас в стране неоднозначны и варьируют от ущерба для объектов инфраструктуры, построенных в зоне вечной мерзлоты на Крайнем Севере, засух в одних регионах и ливневых наводнений в других, до потенциальных выгод [49], анализ которых дан в публикации [88]. Каждые 10 лет в среднем по России отопительный период сокращается на пять дней, уменьшаются и расходы. На 3–5 дней увеличивается период со среднесуточной температурой выше 10 градусов и продвигается к северу граница устойчивого земледелия. На 13% сокращается минимальная площадь льдов в Арктике, что улучшает условия навигации по Северному морскому пути. Увеличивается сток сибирских рек, за счет более теплых зим в целом по стране сток становится более равномерным в течение года, что положительно влияет на водопользование и гидроэнергетику. На Волго-Камском каскаде водохранилищ за последние 30 лет приток воды в среднем за год вырос на 8–20%, а зимой — на 70–120%. Выработка электроэнергии на девяти гидростанциях выросла на 13%, причем в основном зимой, когда она наиболее востребована. На реках Европейской части России на 20–40% уменьшились максимальные уровни воды во время весеннего половодья. Если рассматривать климат как неисчерпаемый природный ресурс, можно констатировать, что, в отличие от многих стран, Россия наряду с рисками получает новые потенциальные возможности его использования для улучшения природопользования, экономики и социальных условий жизни. [47, 73, 86, 88, 89]

Принятая в зарубежных исследованиях парадигма, в которой не нашлось места для потенциальных выгод, связанных



с изменением климата, в России оказалась скомпрометирована. Наиболее действенной может стать климатическая политика, основанная не только на совершении затратных действий, как предлагается мировым сообществом, но и на перераспределении имеющихся ограниченных экономических и интеллектуальных ресурсов. Это позволит реализовать потенциальные выгоды и направить высвобождаемые при этом ресурсы в те сферы и регионы, где необходимы неотложные меры по минимизации негативных последствий потепления.

**Таблица 1** Численность городского и сельского населения АЗРФ по данным Росстата за 2020 г., тыс. чел. и %.

	Мурманская область	Республика Карелия	Архангельская область	Ненецкий АО	Ямало-Ненецкий АО	Республика Коми	Красноярский край	Республика Саха	Чукотский АО
<b>Гор.</b>	683.4	27.4	595.3	32.5	457.1	72.7	208.2	26.3	35.2
<b>Сел.</b>	58.0	13.1	45.3	11.6	87.4	0.4	21.3	41.4	14.5
<b>Гор.</b>	92%	68%	93%	74%	84%	99%	91%	39%	71%
<b>Сел.</b>	8%	32%	7%	26%	16%	1%	9%	61%	29%

Физико-географические особенности России и преимущественно ресурсно-ориентированная структура ее экономики определяют важнейшую роль Арктической зоны РФ (АЗРФ) в природопользовании и экономике. По данным Росстата за 2020 г., здесь проживают 2.1 млн человек, или 1.5% населения страны. Это самая урбанизированная территория России, доля городского населения составляет в среднем 88% (таблица 1). Помимо приблизительно 370 деревень и поселков, в АЗРФ расположен 21 город с населением свыше 15 тысяч человек, в том числе 6 городов с населением более 100 тыс., крупные речные порты, развитая городская, транспортная и промышленная инфраструктура. Здесь сосредоточено свыше 30% разведанных и более 90% потенциальных запасов углеводородного сырья, находится значительная часть месторождений золота, олова, никеля, меди, каменного угля, торфа, ресурсов леса и пресной воды, а также гидроэнергии. АЗРФ дает более 15% добываемой в России нефти и 80% газа (данные 2016 г., опубликованные в [196]). Две эти отрасли формируют 30% бюджета страны и более половины стоимости суммарного экспорта [190]. По данным за 2010 г., вклад России в валовый выпуск продукции (ВВП) всей Арктики составил 71% [134], а вклад АЗРФ в ВВП России достигает 10% [54]. Ни в одной из Арктических стран нет столь большого различия между долей населения и создаваемой им долей национального продукта. [149]

В Арктике изменения климата происходят значительно быстрее и имеют большую величину. Поэтому уже сейчас

наблюдаются многие последствия изменения климата, предсказанные в 1990-х, прежде всего касающиеся природных систем. Цель данного доклада в том, чтобы предоставить широкому кругу заинтересованных лиц и ведомств объективную информацию о современном и прогнозируемом на будущее изменении климата, о его основных природных и социально-экономических последствиях для АЗРФ и о возможности адаптации к ним.

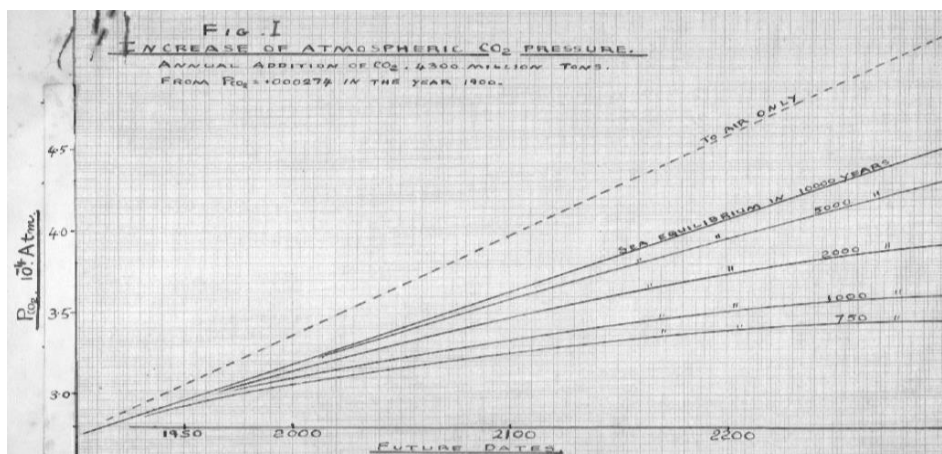
## КАК ПОЛУЧАЮТ ПРОГНОЗЫ КЛИМАТА

Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) в своем Шестом оценочном докладе (2021) пришла к заключению, что к настоящему времени неопровержимо установлен факт глобального изменения климата, изучены его главные механизмы и причины [153]. Для понимания важности этого вывода имеет смысл совершить краткий экскурс в историю климатологии.

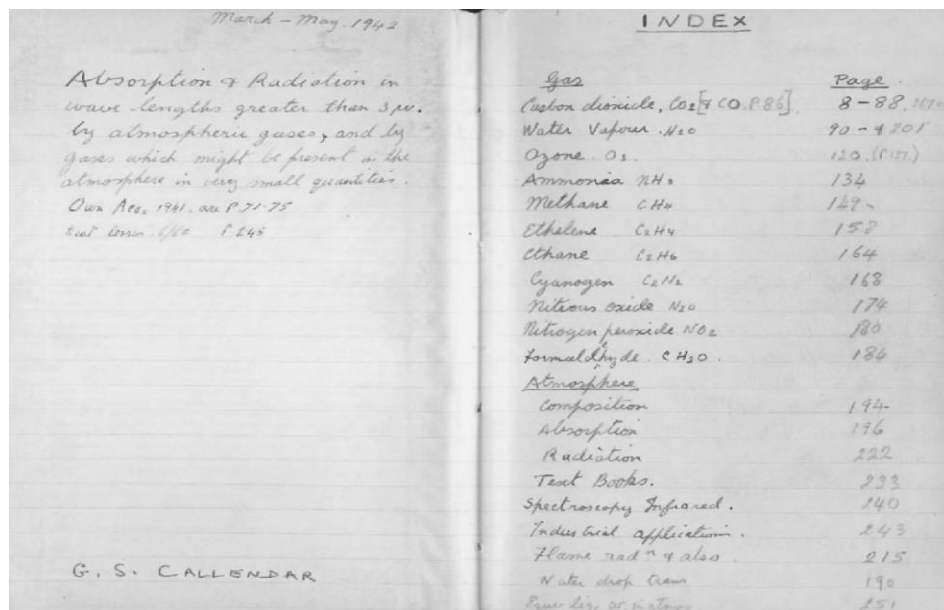
Более 100 лет назад шведский химик Свантэ Аррениус впервые показал, что углекислый газ создает парниковый эффект, и рост его содержания в атмосфере может привести к увеличению глобальной температуры воздуха [90]. Спустя 30 лет британский инженер Гай Стюард Кэллендер, опираясь на работу Аррениуса, сформулировал теорию парникового эффекта и определил в ней роль антропогенных факторов. Он рассчитал доиндустриальный уровень концентрации  $\text{CO}_2$ ; изучил чувствительность климата к удвоению концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере, оценив ее в  $2^\circ\text{C}$ ; объяснил потепление Северного полушария в первой трети 20 в. По его расчетам,  $2/3$  тренда температуры, который в тот период составил около  $0.5^\circ\text{C}$  за 100 лет, обусловлены ростом  $\text{CO}_2$  [101]. Кэллендер впервые построил сценарии изменения концентрации углекислого газа в атмосфере до 2300 г. в зависимости от интенсивности углеродного обмена с океаном (рис. 1). Он также установил, что не только  $\text{CO}_2$ , но и другие газы вызывают парниковый эффект (рис. 2).

Лишь через 30 лет после работ Кэллендера международное научное сообщество стало уделять серьезное внимание изменению климата. В 1970-х годах впервые начали говорить о влиянии сжигания ископаемого топлива на климат. Важно было сравнить роль антропогенных и естественных факторов, таких как колебания солнечной постоянной, извержения вулканов, изменения орбиты Земли и биогеохимический круговорот углерода. Это удалось сделать при помощи математических моделей климата.

**Рисунок 1** - Первые сценарии изменения концентрации углекислого газа в атмосфере до 2300 г. в зависимости от интенсивности углеродного обмена с океаном [101].



**Рисунок 2** - Рабочая тетрадь Г.С. Кэллендера (1942), посвященная парниковому эффекту CO<sub>2</sub> и малых газовых составляющих.



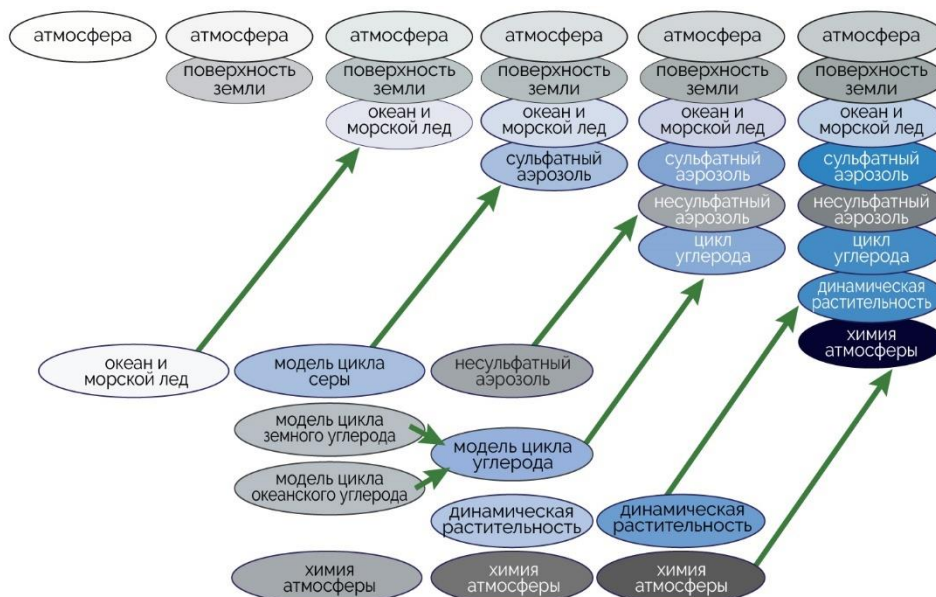
Исчерпывающие сведения об эволюции климатических моделей содержатся в серии оценочных докладов МГЭИК [128, 129, 135, 152], а также в двух аналогичных докладах об изменении климата на территории Российской Федерации [21, 49]. В настоящее время гидродинамическое моделирование признано безальтернативным методом прогноза климата [49, 104, 136]. Обзор результатов расчетов по современным моделям на русском языке дан в публикациях [13, 15, 50, 51, 68].

Поскольку расчеты по гидродинамическим моделям зависят от многих факторов, в том числе малопредсказуемых, они содержат значительную неопределенность [34, 50, 113, 143]. С учетом этого в современной климатологии вместо прогнозов на длительную перспективу часто используется понятие «климатическая проекция», под которой понимаются результаты расчетов, выполненных для заданного набора влияющих параметров с использованием гипотетических предположений о будущих изменениях климатообразующих факторов. В отличие от прогноза, проекция не предполагает единственности получаемой оценки будущих климатических изменений. Она показывает один из возможных путей развития климатической системы при заданных условиях меняющегося внешнего воздействия.

Климатические модели представляют собой набор уравнений, описывающих последовательные изменения во времени параметров состояния атмосферы (температура воздуха, влажность, облачность, скорость ветра и т.п.), океана (температура поверхности воды, соленость, испарение) и подстилающей поверхности (температура на поверхности почвы и на глубинах, испарение, потоки тепла). Модели, в которых перечисленные компоненты соединены вместе и интерактивно взаимодействуют, получили название

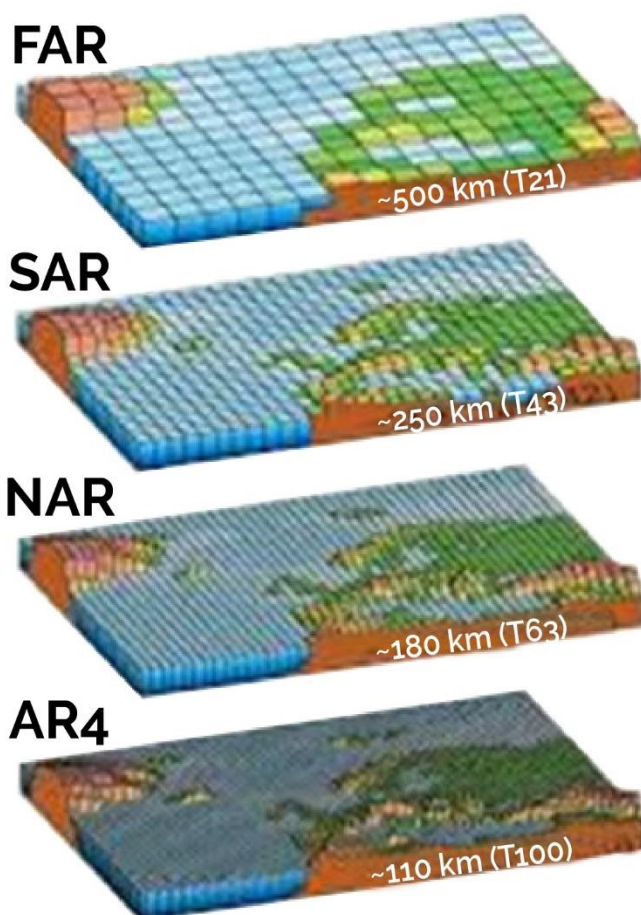
моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО). Развитие гидродинамического моделирования шло по нескольким направлениям. Во-первых, происходило постепенное усложнение моделей за счет увеличения числа рассматриваемых в них процессов. На рисунке 3 показаны блоки, которые первоначально создавались и использовались как самостоятельные математические модели, а в последующем были интегрированы в МОЦАО. Современные гидродинамические модели, в которых описывается большое число био-геосферных процессов, получили название моделей земной системы (МЗС), что подчеркивает их большую комплицированность по сравнению с МОЦАО.

**Рисунок 3 - Эволюция гидродинамических моделей климатической системы.**



Вторым направлением развития было увеличение пространственного разрешения моделей. Расчеты проводятся на 3-х мерной глобальной сетке, размер ячейки которой определяет разрешающую способность модели. Рисунок 4 иллюстрирует пространственную дифференциацию результатов расчетов для территории Европы при использовании сетки с шагом от 500 до 110 км. В современных глобальных моделях шаг сетки составляет от 100 до 250 км по горизонтали и около 1 км по вертикали. Многие описываемые моделями процессы, такие как динамика облачности или океаническая конвекция, имеют значительно меньшие пространственные масштабы. Это не позволяет описывать их при помощи соответствующих физике этих процессов уравнений. Вместо этого дается их усредненное в пространстве приближенное описание на основе физических и статистических связей с более крупномасштабными переменными. Подобный метод известен как параметризация.

**Рисунок 4** - Пространственная дифференциация результатов расчетов для территории Европы при использовании сетки с шагом 500 км, 250 км, 180 км и 110 км (сверху вниз)



Большую роль в моделировании климата играет проведение расчетов за исторический период времени, которые в последующем сравниваются с данными наблюдений. Исторические расчеты выполняют две главные функции. Во-первых, даже наиболее совершенные модели содержат ряд подгоночных параметров и параметризаций, варьируя которые можно добиться наилучшего соответствия между расчетами и данными наблюдений. Такая настройка модели осуществляется по данным исторических расчетов. Это позволяет минимизировать, но не устранить модельные ошибки. Во-вторых, настроенная наилучшим образом модель проходит проверку, в ходе которой оцениваются ошибки воспроизведения не использовавшихся при настройке параметров, изменения которых за исторический период берутся из данных наблюдений. За редким исключением [15, 155] разработчики моделей не раскрывают детали того, как именно происходит первый этап, т.е. настройка модели. Поэтому полный перечень параметров, используемых в этой процедуре, в большинстве случаев неизвестен. Как правило, их число невелико, и настройка происходит с использованием глобально осредненных переменных, которые отвечают за соблюдение баланса энергии, массы и количества движения. На примере одной модели было

показано, что такая «глобальная» настройка не позволяет однозначно определить наилучшие значения всех настраиваемых параметров. [155]

Важный вывод из сказанного состоит в том, что при использовании модельных расчетов для изучения последствий изменений климата необходимо проводить независимую оценку качества воспроизведения моделями тех климатических характеристик, от которых наиболее зависим исследуемый процесс или объект. Такую проверку необходимо проводить не на глобальном уровне, а в конкретном рассматриваемом регионе. Еще один вывод состоит в том, что, с учетом обозначенных выше проблем, наибольший интерес для практического использования представляют результаты расчетов по российским гидродинамическим моделям, поскольку в их настройке и проверке, как правило, задействовано наибольшее количество данных наблюдений на территории России. Особенности построения климатических проекций для территории России обсуждаются в работах [5, 13, 33, 50, 51], в том числе для ее арктической территории [15]

В России были разработаны две глобальные гидродинамические модели, в институте вычислительной математики РАН (модель ИВМ РАН, [28, 29, 30, 39, 77], и в главной геофизической обсерватории (модель ГГО [62]). Модель ИВМ РАН участвовала в различных международных проектах, в том числе МГЭИК, результаты проведенных по ней расчетов общедоступны через центры распространения данных. Результаты расчетов по модели ГГО до настоящего времени используются преимущественно самими разработчиками модели, в свободном доступе их нет, что заметно ограничивает круг их потенциальных пользователей. Сама модель ГГО и отдельные результаты проводившихся по ней расчетов описаны в публикациях [60, 64, 74, 79, 80, 81].

Третьим направлением развития гидродинамического моделирования является совершенствование так называемых форсингов, определение которых будет дано ниже. Настроенную модель используют для расчетов изменений климатической системы в прошлом и будущем. В расчетах задаются начальные условия, характеризующие состояние климатической системы в период времени, принимаемый за базовый, а также обширный набор входных параметров, часть которых меняется во времени. К последним относятся сведения о концентрации парниковых газов (ПГ) в атмосфере, которые напрямую воздействуют на температурный режим и опосредованно на другие показатели климата. Форсингом называют набор меняющихся во времени входных параметров, поскольку именно они обуславливают изменения в климатической системе, рассчитываемые моделью. Форсинги для периодов времени в прошлом задаются по данным наблюдений, а для будущего – в соответствии

с предварительно разработанными сценариями, которые учитывают различные пути развития мировой цивилизации, прежде всего экономики, энергетики и демографии. По заданным форсингам гидродинамическая модель рассчитывает последовательные изменения полного набора климатических параметров во всех узлах 3-х мерной пространственной сетки с шагом по времени, как правило, составляющим 30 минут. Далее результаты усредняются по времени до суточного и месячного уровня.



## СЦЕНАРНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КЛИМАТА С УЧЕТОМ МИРОВОГО СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ

Человеческая деятельность приводит к изменению газового состава атмосферы и физических свойств подстилающей поверхности за счет эмиссии парниковых газов, вырубки лесов, промышленного и сельскохозяйственного освоения земель и других видов природопользования. Антропогенные воздействия учитываются в климатических моделях как форсинги, вызывающие изменения климата. Различные гипотетические варианты антропогенных форсингов принято называть сценариями. На раннем этапе моделирования использовался примитивный сценарий, который предполагал скачкообразное удвоение концентрации углекислого газа в атмосфере. Применялся также иной сценарий, предполагавший, что под влиянием человеческой деятельности концентрация углекислого газа в атмосфере будет ежегодно увеличиваться на 1%. В 1992 г. был подготовлен набор более сложных сценариев, получивший обозначение IS92. Их описание дано в публикациях [148, 177]. В отличие от предыдущих, в них рассматривались изменения не концентрации, а эмиссии различных парниковых газов, при этом их атмосферная концентрация рассчитывалась в самой модели. В основу сценариев IS92 были положены существовавшие заключения международных организаций и мнения отдельных экспертов относительно эмиссии парниковых газов при различных путях развития мировой экономики и роста населения.

Следующим шагом стала разработка в 2000 г. новой группы сценариев, получивших название SRES. Детальное описание этих сценариев дано в [169]. В их разработке принимали участие более 50 экспертов, представляющих различные международные организации, в том числе Банк Мирового Развития. Сценарии SRES описывают эмиссии парниковых газов до конца 21 века в соответствии с четырьмя различными линиями возможного мирового развития, получившими названия A1, A2, B1 и B2. Вместе они дают описание различных вариантов будущего, которые охватывают значительную долю основных неопределенностей в таких факторах, как демографические изменения, экономическое развитие и внедрение новых технологий. Поскольку многие из опубликованных в 2000–2010 гг. и широко распространенных до настоящего времени оценок последствий изменений климата основаны на этих сценариях, целесообразно описать их более подробно.

Сценарии A1 соответствуют будущему миру, характеризующемуся быстрым экономическим ростом, глобальным населением, численность которого достигает пиковых значений в середине века с последующим уменьшением, а также быстрым внедрением новых более эффективных технологий. Они предполагают постепенное

экономическое сближение разных регионов при значительном уменьшении региональных различий в доходе на душу населения. Сценарии А1 разделяются на три группы, дающие описание альтернативных вариантов развития энергетического сектора с акцентами на ископаемых видах топлива (сценарий А1FI), неископаемые источники энергии (А1Т) или равновесие между всеми источниками (А1В).

Сценарии А2 дают описание очень неоднородного мира, где главными ценностями является самообеспечение и сохранение местной самобытности. Показатели рождаемости в разных регионах очень медленно сближаются, результатом чего является постоянный рост общей численности населения. Экономическое развитие имеет главным образом региональную направленность, а экономический рост в расчете на душу населения и технологические изменения замедлены по сравнению с другими сценариями.

Сценарии В1 соответствуют миру, глобальное население которого достигает максимальной численности в середине 21 века, а затем уменьшается, как и в сценариях А1, однако при быстрых изменениях в экономике и внедрении ресурсосберегающих технологий. Главное внимание уделяется глобальным решениям экономической, социальной и экологической устойчивости, включая большую справедливость, но без дополнительных инициатив, связанных с климатом.

В мире по сценарию В2 главное внимание уделяется локальным решениям проблемы экономической, социальной и экологической устойчивости. Это мир с постоянно увеличивающимся глобальным населением при темпах ниже, чем А2, промежуточными уровнями экономического развития и менее быстрыми и более разнообразными технологическими изменениями по сравнению с В1 и А1. Хотя данный сценарий также ориентирован на охрану окружающей среды и социальную справедливость, главное внимание в нем уделяется местным и региональным уровням.

Эти сценарии эмиссии парниковых газов использовались при подготовке Третьего (2001) и Четвертого (2007) оценочных докладов МГЭИК. В 2011 г. в процессе подготовки Пятого доклада МГЭИК было принято решение перейти в сценариях от эмиссий к концентрациям парниковых газов в атмосфере. В соответствии с этим были разработаны четыре новые сценария, получившие названия RCP8.5 [183], RCP6 [154], RCP4.5 [199] и RCP2.6 [203]. Как и в предыдущих сценариях, в основу положены различные предположения о глобальном экономическом развитии. Была уменьшена одна из неопределенностей, присущих предыдущим сценариям SRES, связанная с необходимостью пересчета эмиссий парниковых газов в их атмосферные концентрации. Цифры в обозначениях

указывают радиационное воздействие к 2100 г. ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ), обусловленное соответствующим данному сценарию увеличением концентрации парниковых газов. Под радиационным воздействием понимается разность приходящей (излучение Солнца) и уходящей (тепловое излучение Земли) энергии в климатической системе. Парниковые газы «укрывают» Землю, подобно одеялу, уменьшают уходящую энергию, увеличивая радиационное воздействие и вызывая увеличение температуры. В работе [185] проводится сопоставление новых сценариев RCP с предыдущими SRES, при этом в качестве метрики используется глобальная температура воздуха. Авторами показано, что RCP4.5 дает результаты близкие SRES B1; RCP8.5 к концу 21 века дает больший рост температуры, чем SRES A2; RCP2.6 — «слабее» любого сценария SRES.

За годы, прошедшие со времени появления сценариев RCP, появилась возможность оценить их реалистичность, сравнив с динамикой выбросов парниковых газов. Становится все более очевидно, что сценарий RCP2.6 не соответствует современным реалиям, поскольку в нем уже сейчас предполагается значительное сокращение эмиссии парниковых газов. Показательно, что расчеты по гидродинамическим моделям с этим сценарием указывают на продолжение роста глобальной температуры к середине 21 в. на  $1^\circ\text{C}$  с последующей стабилизацией. Расчеты по трем другим сценариям дают к середине 21 в. рост температуры на  $1,4^\circ\text{C}$ ,  $1,3^\circ\text{C}$  и  $2,0^\circ\text{C}$ , а к концу 21 века на  $1,8^\circ\text{C}$ ,  $2,2^\circ\text{C}$  и  $3,7^\circ\text{C}$ . При этом до 2030 г. различия глобальной температуры, рассчитанной по любой модели для всех сценариев RCP, не превышают  $0,2^\circ\text{C}$ , что в 2 раза меньше межмодельного разброса, который для каждого из RCP составляет около  $0,4^\circ\text{C}$  [192]. На региональном уровне наибольшие различия как между моделями, так и между RCP выявлены для Арктики. [104]

В августе 2021 г. был опубликован первый том шестого оценочного доклада МГЭИК [152]. Для этого доклада были разработаны новые сценарии. В них каждому из «технических» сценариев семейства RCP, характеризующихся, прежде всего, суммарным увеличением радиационного воздействия на поверхность Земли к 2100 году, был поставлен в соответствие путь общего социально-экономического мирового развития (Shared Socioeconomic Pathway, SSP). Были сформулированы главные черты пяти различных путей мирового развития. Самый «зеленый» мир, сосредоточенный на достижении устойчивого развития при минимальном воздействии на климат (SSP1); мир, во многом следующий принципам и паттернам социально-экономического развития последних нескольких десятилетий (SSP2); мир, в котором возрастает социально-экономическая разобщенность наций и государств, с усилением националистической направленности развития (SSP3); мир усиливающегося неравенства

государств (SSP4), и, наконец, самый агрессивный путь быстрого и неограниченного роста экономики и потребления энергии (SSP5). Нечто подобное было сделано ранее для сценариев семейства SRES.

Главная идея разработки новых сценариев состояла в том, чтобы с учетом экономических, социальных и геополитических реалий обрисовать в общих чертах пути мирового развития, при которых достигаются показатели радиационного воздействия прежних сценариев RCP. С учетом целевых показателей Парижского соглашения, предусматривающих меры по ограничению роста глобальной температуры менее чем на 2°C, а в оптимистичном варианте на 1,5°C по отношению к доиндустриальному периоду, был добавлен еще один, самый «зеленый» сценарий RCP1.9. С самого начала можно с уверенностью утверждать, что этот сценарий не имеет шансов на реализацию. Его можно рассматривать лишь как модель мира, предпринимающего беспрецедентные совместные усилия не только по сокращению эмиссии парниковых газов, но и по декарбонизации, т.е. удалению из атмосферы уже находящегося в ней углерода. Мировое сообщество, очевидно, не готово к этому ни с позиций неизбежного кардинального изменения социально-экономических условий для большей части населения Земли, ни с позиции чисто технологической. В ряде работ было показано, что известные на сегодняшний день методы декарбонизации с учетом возможности их практического применения обладают небольшим потенциалом снижения антропогенного воздействия на климат, если не применять более эффективные меры по сокращению эмиссии парниковых газов [152]. Кроме того, ни одна из предложенных технологий декарбонизации не была опробована на практике, и до настоящего времени не доказана их эффективность на больших пространственных и временных интервалах. [147]

## УМЕНЬШЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПРОЕКЦИЙ

Климатические проекции, получаемые при помощи моделей, содержат неопределенности. Анализ того, как меняется неопределенность в зависимости от заблаговременности прогнозов, дан в работе [123]. Авторы показывают, что межгодовая изменчивость значительно превышает ожидаемую величину изменений в первые десять лет прогноза, что делает его крайне неопределённым, принимая во внимание сложность точного задания начальных условий. Заметим, что это находит отражение в результатах модельных расчетов на 2030 г. В [115] было показано незначительное влияние выбора сценария эмиссии парниковых газов на временном промежутке до 20 лет, после чего обусловленная этим неопределенность начинает расти, и на временном интервале более 50 лет эта компонента становится доминирующей. При этом компонента неопределённости, связанная с ошибкой самих моделей, остаётся примерно одинаковой, а относительная ошибка постепенно уменьшается по мере роста ожидаемого значения изменений. Из этого следует, что наилучшим для климатической проекции является период 20–50 лет с начала расчета, поскольку на таком отрезке времени суммарная неопределённость, обусловленная всеми факторами, минимальна.

Для уменьшения неопределенности климатических проекций, связанной с особенностями моделей, широкое распространение получил ансамблевый метод. Он состоит в том, что расчеты по большому числу моделей усредняются и случайные ошибки компенсируются. До недавнего времени принято было считать, что чем больше моделей входит в ансамбль, тем более точен результат. Альтернативная точка зрения состоит в том, что нужно исключать из ансамбля модели с большими ошибками.

Для построения ансамбля необходимо иметь достаточно большое количество расчетов по различным моделям со стандартизованными начальными условиями и форсингами. Важную роль в решении этой задачи сыграл международный проект сравнения моделей CMIP (Climate Model Intercomparison Project, CMIP). Этапы этого проекта описаны в публикациях [50, 159]. Проект был создан в 1995 г. с целью предоставить широкому кругу специалистов расчёты по различным моделям со стандартизованными установками начальных и граничных условий и основных параметров, характеризующих изменение климатообразующих факторов. Главным образом это было обусловлено необходимостью получения согласованных оценок для подготовки докладов МГЭИК. В первой фазе CMIP были проведены расчёты по 18 гидродинамическим моделям с заданными значениями солнечной постоянной и атмосферной концентрации CO<sub>2</sub>. Во второй фазе был добавлен расчёт с увеличивающейся

концентрацией CO<sub>2</sub> на 1% в год, при этом другие антропогенные факторы не учитывались. На первых двух фазах CMIP данные по большинству параметров были представлены лишь для трех временных срезов в первой четверти, середине и конце 21 века, при этом ежемесячные данные были доступны лишь для ограниченного числа параметров (температура воздуха, осадки, давление). Вскоре стало ясно, что этого недостаточно, и была проведена дополнительная фаза CMIP 2+, целью которой было собрать данные расчетов уже проведенных экспериментов по более полному набору параметров. Только 12 модельных групп из 17 участвовавших в CMIP2 предоставили такие данные [159].

Существенным шагом вперед стала организация стандартизованных расчетов CMIP3 по 23 моделям [160]. В них были учтены множественные антропогенные факторы. Так, для этих расчетов были разработаны новые сценарии эмиссии парниковых газов SRES, соответствующие различным путям дальнейшего развития мировой экономики [169]. Продолжительность расчета зависела от конкретной модели, но все модели охватывали период с последней четверти 19 века до конца 21 века. Важно, что в итоге были рассчитаны среднемесячные значения большого числа параметров климата более чем за 200 лет, которые стали доступны широкому кругу пользователей через центры распространения данных<sup>4</sup> [160]. Результаты CMIP3 составили основу Четвёртого оценочного доклада МГЭИК (2007).

В процессе подготовки этого доклада в очередной раз изменились представления о том, какие модельные эксперименты необходимы для анализа изменения климата в прошлом, настоящем и будущем, а также для оценки его последствий. Эти изменения нашли отражение в дизайне экспериментов пятой фазы CMIP5, которые проводились по 39 гидродинамическим моделям, включая различные версии одних и тех же моделей [198]. В сравнении с CMIP3 улучшилось как качество самих моделей за счет использования более надежных параметризаций, так и форсингов. Несколько изменился подход к описанию сценариев будущих эмиссий парниковых газов [161]. Вместо принятых ранее SRES стали использоваться сценарии RCP (Representative Climate Pathway), характеризующие суммарной величиной дополнительного радиационного воздействия на климатическую систему. Результаты расчетов для исторического периода 1850–2005 и для периода с 2006 до конца 21 века по моделям поколения CMIP5 представлены в публикации [104]. В 2017 г. была начата подготовка следующей шестой фазы проекта CMIP6, в настоящее время появляются ее первые результаты [110, 111].

Главный вопрос в связи с проектом CMIP состоит в том, имело ли место уменьшение неопределенности расчетов на

<sup>4</sup> например, <http://www-pcmdi.llnl.gov/>

последующих фазах по отношению к предыдущим, и если да, то было ли это обусловлено совершенствованием моделей, или же в большей степени результат был достигнут за счет улучшения форсингов. В работе [182] авторы проводили сравнения расчётов по трём поколениям моделей по большому числу показателей для крупных регионов мира. Каждая модель сравнивалась с наблюдениями по 14 метеовеличинам за период 1979–1999 года, при этом использовалась сложная метрика, которая показывает сумму отклонений среднегодовых величин в каждом узле модельной сетки, а также учитывает дисперсию. Полученные в этой работе результаты свидетельствуют о прогрессирующем улучшении качества моделей. Так, расчеты CMIP3 по всем метеовеличинам лучше, чем CMIP1, и почти всегда лучше, чем CMIP2. На основании этих результатов авторы делают вывод, что улучшение воспроизведения климата достигается из-за развития моделей, а не за счёт уточнённых форсингов, которые, по их мнению, играют малую роль. Этот тезис можно поставить под сомнение, поскольку в CMIP3 в исторический период используются намного более точные форсинги, чем в предыдущих экспериментах.

В ряде работ проводилось сравнение результатов расчетов по моделям CMIP5 и CMIP3 для различных регионов. Так, в работах [46, 59, 67] сравнивались проекции температуры воздуха, осадков и испарения в Арктическом регионе. При этом, что прямое сравнение результатов расчетов по моделям CMIP5 и CMIP3 невозможно из-за различия форсингов, авторы этих публикаций констатировали качественное согласие географических распределений прогнозируемых величин.

В нескольких работах рассматривался вопрос о том, насколько хорошо гидродинамические модели CMIP3 и CMIP5 описывают климат на территории России. Первые выводы относительно CMIP3, которые были получены в работах [33, 34], оказались обескураживающими. Авторы провели сравнение расчетов средних значений и изменений температуры воздуха и осадков с наблюдениями для 6 крупных регионов России и обнаружили очень большие различия. Несколько иной вывод о пригодности использования результатов CMIP3 для описания климата России был получен в работах [33, 61]. Авторы использовали иные критерии, сравнивая расчеты в целом для территории России по ансамблю из 16 моделей с индивидуальными моделями. На основании того, что случайная погрешность ансамблевых расчетов оказалась меньше, чем у любой отдельно взятой модели, был сделан вывод, что ансамблевые проекции по моделям CMIP-3 можно использовать на территории России. Заметим, что собственно различия расчетов и наблюдений на региональном уровне в этих публикациях не рассматривались.

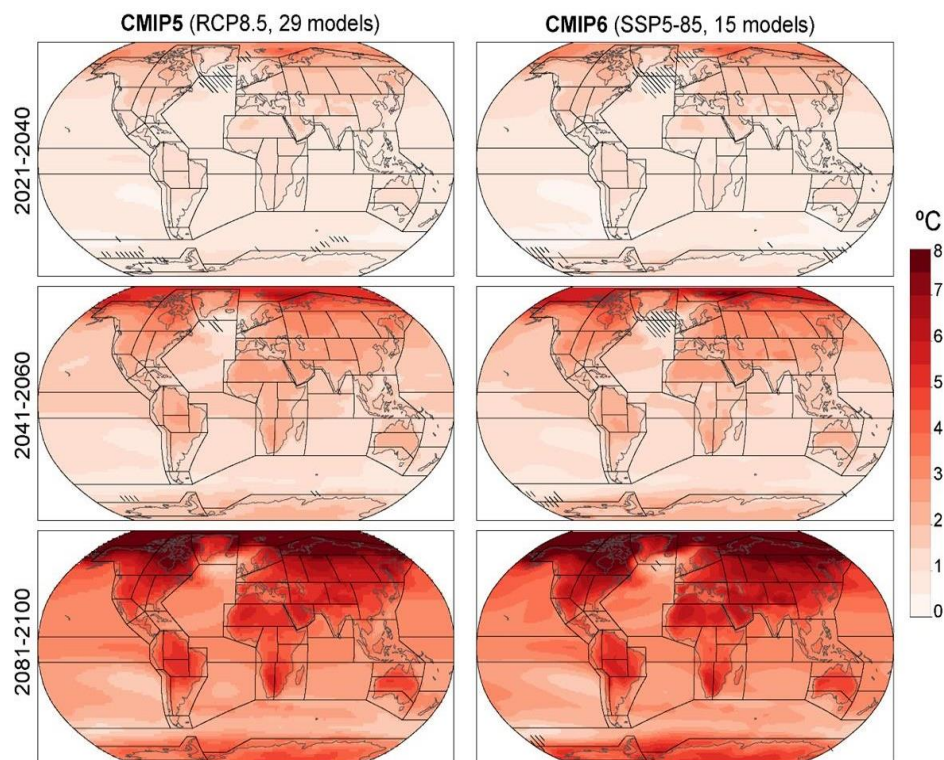
В настоящее время появились расчеты по моделям нового поколения CMIP6. Тестирование обновленных моделей, проводившееся самими разработчиками, выявило некоторые системные проблемы. Главной проблемой является необъяснимое увеличение модельной чувствительности климата к росту содержания парниковых газов в атмосфере в новых моделях по сравнению с предыдущим поколением CMIP5. Следствием явилось увеличение неопределенности прогноза климата, т.е. расширение разброса оценок будущих величин температуры воздуха и осадков, получаемых при помощи различных моделей. К концу 21 века у моделей CMIP6 он на 20% выше, чем у моделей CMIP5, причем это обусловлено большим, чем у предыдущего поколения, верхним пределом прогноза температуры. Средние по всем моделям каждого из поколений CMIP5 и CMIP6 проекции среднегодовые температуры воздуха и осадков показаны на рисунках 8 и 9. Еще одна проблема в том, что пока не все разработчики моделей CMIP6 провели расчеты по полному набору климатических сценариев. Из-за этого в настоящее время число членов ансамбля CMIP5 заметно выше, чем CMIP6 (см. рис. 5 и 6). Большее число членов модельного ансамбля CMIP5 уменьшает случайные ошибки индивидуальных моделей и сужает неопределенность прогноза.

Помимо индивидуальных особенностей моделей, на неопределенность прогноза оказывает влияние естественная изменчивость. Согласно МГЭИК, ансамблевая климатическая проекция считается надежной, если прогнозируемые изменения климатических параметров превышают их межгодовую изменчивость на декадном интервале времени [111]. К середине 21 века это условие выполняется для большинства сценариев [171].

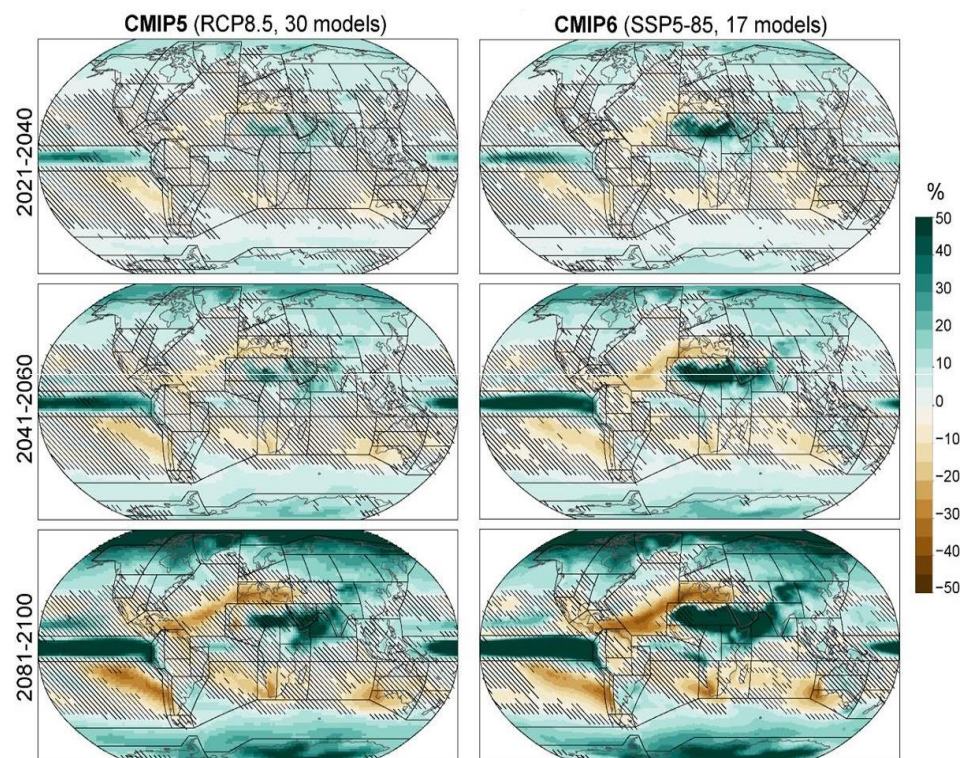
Исходя из изложенного, можно сделать вывод о необходимости тестирования моделей на региональном уровне, сравнивая с наблюдениями расчетные значения регионально осредненных трендов тех параметров и индексов, которые наиболее важны для изучаемых объектов. Следующим шагом является построение оптимального ансамбля, из которого исключаются модели с низким региональным рейтингом. При этом, что преимущества ансамблевого осреднения не вызывают сомнений [22, 31, 142], и для него уже разработаны действующие методы [83, 144, 172], вопрос об отборе моделей для включения в ансамбль остается открытым и продолжает обсуждаться [124].



**Рисунок 5** - Прогнозы увеличения среднегодовой температуры воздуха (°C), полученные осреднением результатов расчетов по 29 моделям CMIP5 (слева) и 15 моделям CMIP6 (справа) для идентичных сценариев эмиссии парниковых газов RCP8.5 и SSP5-85.



**Рисунок 6** - Прогнозы увеличения годовых сумм осадков, полученные усреднением результатов расчетов по 30 моделям CMIP5 (слева) и 17 моделям CMIP6 (справа) для идентичных сценариев эмиссии парниковых газов RCP8.5 и SSP5-85. Штриховкой обозначены районы с ненадежными данными, где прогнозируемые изменения осадков не превышают их межгодовой изменчивости.



В работах [13, 50, 51] был предложен метод построения оптимизированного по заданным критериям ансамбля моделей на основе их тестирования по данным региональных наблюдений с последующим исключением моделей, обладающих большими ошибками. В данной работе с его помощью был составлен оптимальный ансамбль моделей последнего поколения CMIP6 для Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) и построены проекции температуры воздуха и осадков для различных сценариев эмиссии парниковых газов.

## ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ЭКОСИСТЕМЫ АРКТИКИ

Арктика является одним из немногих регионов мира, где изменение климата не только несет с собой риски, но и открывает новые потенциальные возможности, в первую очередь связанные с экосистемами и выполняемыми ими функциями [73, 86, 88, 137]. В последние годы было опубликовано немало работ, в которых экосистемы рассматриваются в контексте природопользования. В Арктике растительность и многолетнемерзлые грунты (ММГ) являются основообразующими экосистемами суши. Данные наблюдений указывают на то, что они уже испытывают на себе воздействие изменения климата. В этом разделе рассматриваются современные и прогнозируемые к середине 21 века изменения растительности и ММГ. Для этого используются данные наблюдений и моделирование. Для прогностических расчетов были построены оптимизированные для АЗРФ ансамблевые проекции температуры воздуха и осадков на середину 21 века на основе климатических моделей последнего поколения CMIP6. Далее рассматриваются экологические и социально-экономические последствия изменения арктических экосистем, такие как изменение углеродного цикла, эмиссия парниковых газов, в том числе метана, изменения ресурсной базы и ареала лесной промышленности и северного земледелия, а также оцениваются риски для инфраструктуры, обусловленные таянием ММГ. В заключение приводятся количественные оценки устойчивости арктических экосистем при изменении климата.

## РАСТИТЕЛЬНОСТЬ АРКТИКИ

Большое число работ посвящено влиянию изменения климата на растительность [42, 43, 75, 117, 127]. Оно имеет две формы [9]. В первом случае происходят синхронные с климатом изменения продуктивности растений и фитомасса при неизменном составе и ареалах биомов. Так, в наиболее холодных районах Арктики увеличение температуры воздуха ведет к увеличению сомкнутости мохово-лишайникового покрова, в тайге и лесотундре основной эффект – увеличение сезонной фитомассы. Иная форма адаптации растительности к меняющимся климатическим условиям связана с запаздывающим медленным изменением видового состава и смещением ареалов биомов. При потеплении в наиболее холодных районах происходит замещение мхов и лишайников сосудистыми растениями, в первую очередь граминоидами (осоковидными и злаковыми). В типичной и южной тундре индикаторами изменения является экспансия кустарников и смещение границы леса. Так, в более теплый период среднего голоцена 5-6 тысяч лет назад граница леса была смещена по широте на 1-2° к северу по сравнению с современной [100, 112, 211]. Далее рассматриваются данные наблюдений и результаты прогностического моделирования продуктивности и смещения границ растительных зон.

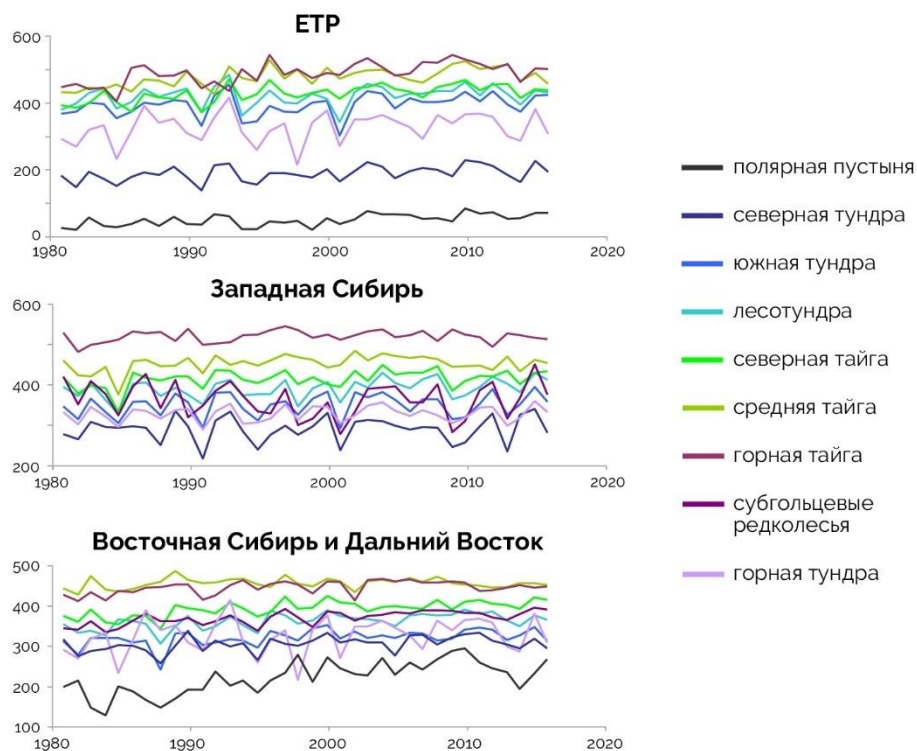
### Продуктивность растительности

Продуктивность является безинерционным индикатором влияния изменения климата на растительность. Полевые и спутниковые измерения показывают увеличение продуктивности за последние 30 лет во многих районах Арктики.[108, 178, 201] Согласно спутниковым данным, на 37% территории Арктики произошло значительное увеличение индекса NDVI, т.е. Арктика стала более «зеленой» [174, 212], в том числе и ее российская часть [23, 40, 76]. За период 1982–2008 гг. в целом по всей Арктике теплообеспеченность увеличилась на 21%, а индекс NDVI вырос на 7% [208], притом, что в последующие годы обе эти тенденции замедлились [93]. Рассматривая продуктивность растительности как экосистемный ресурс, можно констатировать, что изменения климата приводят к его увеличению в АЗРФ. Это улучшает предпосылки для многих видов экономической деятельности, основанных на природопользовании, от пастбищного земледелия и животноводства до лесобработывающих производств. Еще одним следствием является увеличение фотосинтетического стока углерода из атмосферы и накопление его в виде биомассы.

Проведенный нами анализ спутниковых данных NDVI выявил положительные статистически значимые тренды биопродуктивности в АЗРФ, показанные на рисунке 7. Наибольшие тренды имеют место в Дальневосточном секторе

Арктики вне зоны тундры с характерными величинами 9–11% за 10 лет. В остальных секторах и растительных зонах тренды имеют в среднем вдвое меньшую величину. В климатическом отношении Дальневосточный регион отличается от остальных секторов Арктики тем, что на его южную периферию оказывает воздействие муссонная циркуляция, изменения которой и могут быть главным фактором, вызвавшим отмеченные относительно большие увеличения продуктивности. Высокие тренды продуктивности имеют место повсеместно в Европейской части арктической зоны России. В наибольшей степени это обусловлено температурным фактором, который также определяет и относительно небольшие современные изменения продуктивности в Сибирских секторах. В Европейском секторе при большей, чем в Сибири средней продуктивности, межгодовая изменчивость в абсолютном выражении ниже. В Сибирских секторах широтный градиент отчетливо прослеживается в средней величине продуктивности, но не проявляется в распределении межгодовой изменчивости. Такое соотношение средней продуктивности и ее изменчивости формируется под воздействием усиливающейся континентальности климата в направлении с запада на восток и с севера на юг.

**Рисунок 7** - Динамика продуктивности арктической растительности за период 1982–2019 гг. в трех секторах России: а) ЕТР, б) Западная Сибирь, в) Восточная Сибирь и Дальний Восток.



Анализ данных 18-летних наблюдений на севере Канады (район Юкона, остров Хершел, 69,6°с.ш.), представляющих наиболее восточное продвижение высоких кустарников в Западной Арктике, показал значительное увеличение

(практически в два раза) высоты кустарников за этот период. При этом не отмечено ни значительного радиального прироста древесины, ни заметного увеличения зеленой биомассы, что противоречит данным спутниковых наблюдений. Анализ длинных рядов наблюдений позволяет сделать вывод о некотором замедлении процесса «позеленения» в Западной Арктике при положительном тренде высоты сомкнутого кустарникового покрова [94, 166]. Многие исследователи считают, что основной эффект «позеленения Арктики» связан, прежде всего, с увеличением высоты наиболее высоких кустарниковых форм при значительном увеличении сомкнутости их растительного покрова [122, 151, 206]

Данные многолетних наземных наблюдений за изменением биомассы на одной из самых северных площадок Арктической Канады (остров Элсмир, фьорд Александра, 78°53' с.ш.), показали, что начиная с середины 90-х годов, отмечается увеличение продуктивности лишайниковых и вечнозеленых кустарниковых форм и практически отсутствуют заметные изменения для опадающих кустарниковых форм, разнотравья и мхов. Также отмечается увеличение высоты вечнозеленых кустарниковых форм и увеличение сомкнутости их покрова [131].

Наблюдения в тундровой зоне на Аляске, Юконе, на северо-востоке Сибири, на Лабрадоре и в Фенноскандии (всего 117 мест обитаний) за 30-летний период позволили оценить 7 ключевых признаков в изменении тундровой растительности в ответ на современные изменения температуры воздуха и увлажненности [99]. Наибольшие изменения отмечены для высоких видов тундровых кустарников (выше 50 см), причем на всех местообитаниях влажность почвы оказалась важным фактором, определяющим реакцию растительности на изменение климата. Данные годового прироста 25 видов многолетних древесных кустарниковых форм из 37 арктических местообитаний за летний период с 1950-2010 гг. показал, что наибольшая чувствительность к внешним факторам отмечается на северо-западе Российской Арктики (Кольский п-ов и Большеземельская тундра) и в северной Европе, в то время как на севере Канады связь между летней температурой и приростом древесных колец слабая и неочевидная [165, 167, 168].

Эти исследования подтвердили выводы, сделанные в работе [99] о том, что высокие формы кустарников в тундровой зоне показывают более четкую связь с изменением температуры воздуха по сравнению с низкорослыми видами. Наиболее значительные изменения в приросте кустарниковой растительности в ответ на повышение температуры характерно для видов, обитающих во влажных условиях, по сравнению с видами, произрастающими в более сухих.

## Смещение границ растительных зон

В ряде ранних публикаций было отмечено смещение границ растительных зон под воздействием изменения климата и сокращение площади арктической тундры [114, 118]. Во всем северном полушарии происходит быстрое увеличение доли кустарников в тундровой и на севере бореальной зоны [165]. На Кольском полуострове спутниковые данные указывают на смещение к северу границы тундры и лесотундры, продвижение лесотундровой растительности вверх по склонам, замещение лишайниковой тундры кустарничковой, зарастание болот древесно-кустарниковой растительностью [52]. Прогностические расчеты по моделям указывают на то, что эти процессы будут усиливаться, и в 21 веке северная и арктическая тундра могут быть полностью вытеснены кустарничковой и кустарниковой тундрой, а также лесотундрой [41, 42, 89, 176].

В Арктике ареалы тундровой и бореальной растительности, помимо климатических, во многом лимитированы также топографическими [120] и почвенно-мерзлотными условиями (доступность элементов питания). Деградация ММГ не везде приводит к адекватному отклику растительного покрова. Так, в ряде районов западного Таймыра происходит полигонизация водораздельных арктических тундр с образованием системы бугров и ложбин [57]. Столь серьезные изменения ландшафта, являющиеся первой стадией образования байджарахов и ранее наблюдавшиеся только на склонах к речным долинам и морским берегам, пока не привели к каким-либо значительным изменениям в составе и структуре растительности [58]. В данном случае можно говорить о стабильности растительного покрова в условиях изменения климата и значительной трансформации элементов ландшафта, возможной причиной которой является отсутствие в составе естественной флоры видов, проявляющих в более южных районах повышение обилия. На основе анализа спутниковых снимков установлено, что этот феномен, наблюдаемый на Таймыре с 2003–2005 гг., выражен на большом пространстве от Ямала до низовий р. Колымы, а также на Аляске и на островах Канадского Арктического архипелага. Также на севере Швеции и Норвегии при хорошо выраженном положительном тренде температуры не отмечается заметного изменения высоты кустарниковых форм, при этом наблюдается продвижение границы их произрастания в более высокие горизонты горной тундры при одновременном снижении в биомах доли лишайниковых и моховых форм [150, 158, 207].

Иные результаты были получены в Якутии, где отмечено увеличение биоразнообразия [37]. Если в 1930-е гг. в Якутии насчитывалось 1190 видов сосудистых растений, в 1960-е их число увеличилось до 1520, а в 1970-е годы — до 1560 видов.

В начале 2000-х г. число видов растений увеличилось до 1965, а в настоящее время оно достигло 1987. Продолжают появляться новые виды, ранее встречавшиеся в Прибайкалье и Забайкалье. С большой вероятностью наблюдаемые процессы увеличения биоразнообразия обусловлены изменением климата.

Продолжительные исследования изменения видового состава экосистем и отдельных биомов в зоне тундры и лесотундры за последние 20–30 лет были проведены на геоботанических стационарах и в экспедиционных исследованиях на Аляске и на севере Канады. 18-летний ряд наблюдений в арктической части Гренландии (Цакенберг) и 25-летний ряд на севере Аляски (Тулик Лейк) показали как наличие общих закономерностей, так и различия, связанные с климатическими особенностями этих районов [126]. Если на севере Гренландии в течение последних десятилетий экстремальные летние температуры изменялись со скоростью 1.3°C/за 10 лет, то на севере Аляски в течение последних 25 лет положительный температурный тренд температуры был значительно меньше. В районе Гренландии доминирует тундра с относительно бедным видовым составом, в то время как для севера Аляски типична более разнообразная растительность с преобладанием видов, характерных для кустарничково-кочковатой тундры. Видовой состав растительности этих двух стационаров отличается почти в два раза (около 700 видов в районе Тулик Лейк против 300 на севере Гренландии). Использование всего комплекса наземных наблюдений за 18-летний период в Гренландии и за 25-летний период в районе Тулик Лейк совместно со спутниковой информацией показал, что происходит значительное снижение доли травянистой и лишайниковой растительности в районе Гренландии, в среднем на 55%. На севере Аляски по спутниковым данным отмечен положительный тренд общей биомассы с увеличением биомассы сосудистых растений на 19% и кустарниковой на 13%. В то же время на севере Гренландии отмечается увеличение биомассы только кустарниковой растительности при одновременном снижении биомассы травянистой [126, 138].

### Изменения растительности в прошлые теплые эпохи

Представляет интерес провести сравнение современных изменений границ биомов с палеоданными для теплых эпох прошлого. Анализ данных, полученных в начале 2000-х годов [95, 105, 149] показал, что около 6 тыс. лет назад, в конце длительного теплого периода, начало которого датируется ~ 8 тысяч лет назад (т.л.н.), наиболее значительное смещение к северу границы лесотундровой растительности (примерно на 200 км) отмечалось в центральной Сибири, в то время как для Северо-востока России изменения границ были относительно небольшими. В отдельных арктических районах



наблюдались противоположные тенденции. Смещение границы к югу по сравнению с современной (примерно на 200 км) было характерно для севера современной Канады (Каватин и Лабрадор). Более южное положение границ растительности для этих районов было связано с сохранением ледяного щита вплоть до позднего голоцена (5 т.л.н.). Граница древесной растительности на севере Западной Европы и в Центральной Сибири (район Лены) продвигалась к северу примерно на 70 км, в то время как на Таймыре отмечалось её значительное продвижение до 190 км. На северо-востоке России изменения не зафиксированы или они были минимальными. Обобщения большого количества наблюдений (в виде пыльцевых голоценовых спектров) показало, что такие изменения характерны для установившихся климатических условий, когда в течение более 2000 лет температура воздуха в высоких широтах превышала современные значения не менее чем на 2.0–2.5°C, а в отдельных районах на 3.0–4.0°C [24].

Наиболее высокие температуры воздуха в Российской части Арктики севернее 65 с.ш. были отмечены на границе позднеледниковья/голоцена примерно 11.7 т.л.н. [180]. По палеоботаническим данным максимальные температуры воздуха были зафиксированы на островах Арктического бассейна (моря Лаптевых и Восточносибирское), что обеспечило самое северное (до 75° с.ш.) за последние 12 тысяч лет произрастание березы высокоствольной. Фрагменты ее листьев и древесины находят на островах Котельном и Ляховском, а пыльца кустарниковых форм ольхи и березы в большом количестве встречается в континентальных и озерных осадках на Новосибирских островах, что позволяет реконструировать смещение границы этих кустарниковых видов к северу не менее чем на 600 км [140].

Во время потепления раннего голоцена (между 11 и 9 т.л.н.) макроостатки лиственницы (*Larix*) обнаружены севернее широты 72.5° с.ш. между 95–110° в.д., в то время как восточнее, около 140° в.д. северная граница лиственницы проходила значительно южнее. В западной части Арктики, в районе Большеземельской тундры, макроостатки березы (*Betula*) как индикаторного вида в раннем голоцене были обнаружены также на широте около 72° с.ш., и это самая северная граница березы за последние 10 000 лет [97].

Необычайно высокие температуры воздуха в арктических широтах в раннем голоцене, полученные по палеоботаническим данным, подтверждают и другие независимые косвенные данные. Геохимический анализ озерных осадков из трех озер на острове Свалбард, расположенных между 79.77° и 79.26° с.ш., показал, что максимальные температуры воды и воздуха наблюдались около 12–11 т.л.н. и были на 7°C выше современных [202]. Восстановленный ряд температур для Восточной Берингии (центральная часть Юкона) за последние

13000 лет, полученный на основе изотопного анализа ископаемых сингенетически-жильных льдов, показал, что максимальные температуры наблюдались в раннем голоцене, практически на границе позднеледниковья/голоцена и значительно превышали температуры, характерные для общепринятого максимума потепления среднего голоцена [92, 96, 179].

Эмпирические данные из разных частей Арктики дают основание считать, что максимальное потепление в раннем голоцене определило и максимальное за последние 12 тысяч лет продвижение к северу лесной и кустарниковой растительности. Смещение древесной растительности для таких индикаторных видов как лиственница и береза составляло от 400 до 600 км, причем максимальное продвижение к северу отмечалось в береговой зоне центральной, восточной и островной части Арктики на территории России, а также в прибрежных районах Канады и Аляски, свободных в это время от оледенения. Надо полагать, что здесь речь идет о значительном смещении к северу отдельных представителей древесных (в первую очередь березы высокоствольной), а не о формировании сплошной границы лесной растительности. Это связано, прежде всего, с временным масштабом потепления, продолжавшегося первые сотни лет. Это подтверждают палеоботанические обобщения для потепления среднего голоцена (между 7 и 5 т.л.н.), когда высокие температуры воздуха в высоких широтах сохранялись в течение нескольких тысячелетий. За этот длительный период потепления между 8 и 5.5 т.л.н. граница древесной растительности продвинулась к северу во всех секторах Арктики не более чем на 200 км [139]. При этом глобальная температура воздуха была выше современной на 1.1-1.2°C [26].

Более значительное повышение глобальной температуры на 1.5-1.8°C имело место 120–127 т.л.н. Наиболее северные разрезы, содержащие осадки этого времени, изучены на о-ве Ляховском, о-вах Северная Земля и на п-ве Таймыр [85, 91, 141, 164]. Анализ этих данных показал, что зона тундры и лесотундры на севере России практически отсутствовала, и древесные формы продвигались до самого побережья Северного Ледовитого океана. Граница древесной растительности располагалась на 600–700 км севернее современной [157].

## Прогноз изменения растительности

Для прогноза будущих изменений растительности ключевое значение имеет вопрос о временном сдвиге (задержке) ее отклика на изменение климата. Была изучена реакция 800 кустарничковых форм различных видов (более 10), в том числе таких наиболее распространенных в тундровых биомах, как *Betula nana*, *Salix arctica* и *Salix herbacea*, в 30 местообита-

ниях на побережье Восточной Гренландии (~70° с.ш.), что отвечает наиболее северной границе их произрастания. Временной сдвиг в ответ на современное потепление климата составлял в зависимости от вида от 2 до 6 лет. При этом важно отметить, что такой короткий временной сдвиг характерен только для кустарниковой растительности, произрастающей на самой северной границе. Для кустарников из южной части Гренландии таких коротких временных сдвигов не обнаружено.

Как показали исследования [145], существуют значительные различия в скорости продвижения одиночных деревьев (1 дерево примерно на 1 га) и группы деревьев, формирующих границу леса. Для одиночных деревьев характерная скорость продвижения составляет примерно 1.6 м за год, в то время как группа деревьев может передвигаться со скоростью только 0.6 м за год. Таким образом, продвижение границы леса будет все время отставать по времени по сравнению с продвижением одиночных деревьев и такое отставание будет только увеличиваться со временем.

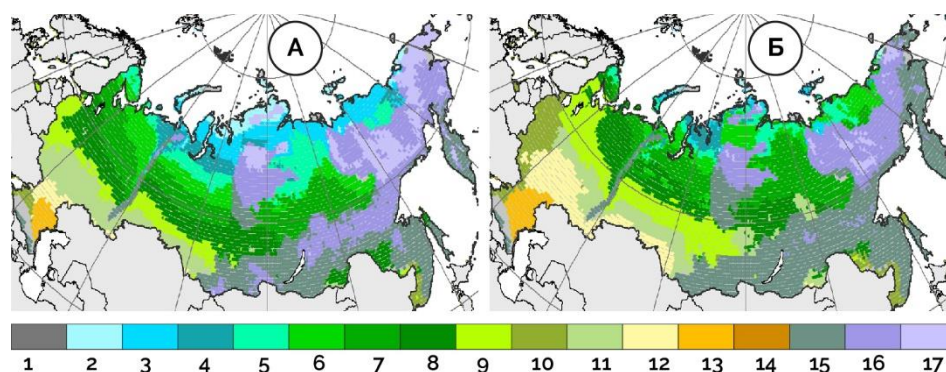
В результате исследований на Полярном Урале (горный массив Рай-Из) были получены данные о характерном вертикальном и горизонтальном сдвиге верхней границы лиственничных редколесий и сомкнутой лесной растительности в ответ на изменение климата в XX столетии [189]. Анализ крупномасштабных геоботанических карт за 90-летний период показал, что верхняя граница лиственничных редколесий поднялась в среднем на 26 м, а сомкнутый покров древесной растительности – на 35 м, горизонтальные сдвиги составили около 290 и 520 м соответственно. По мнению авторов, причиной таких сдвигов явилось потепление климата, непрерывный положительный тренд которого наблюдается на Полярном Урале с 20-х годов прошлого столетия.

Главный вывод состоит в том, что если использовать временное осреднение порядка первых десятилетий, для прогноза зональности растительности можно применять эмпирико-статистическое моделирование. Проведенный нами анализ немногочисленных исторических данных показал, что за такой период арктические биомы проявляют свою реакцию на изменение климатических факторов, скорость которого соответствует темпам современного и прогнозируемого на будущее потепления. Заметим, что при построении климатических проекций расчеты по гидродинамическим моделям земной системы также осредняются за период 2–3 десятилетия для устранения случайной составляющей, обусловленной естественной изменчивостью.

С помощью разработанной нами ранее эмпирико-статистической модели растительной зональности [41] были

построены цифровые карты ареалов биомов для территории России для современного базового периода и для середины 21-го века (среднее за период 2041–2060 гг.). Прогнозные расчеты проводились с использованием разработанной нами оптимизированной для АЗРФ ансамблевой климатической проекции на основе моделей CMIP6. На рисунке 8 показано расположение биомов, рассчитанное для базового периода и для середины 21-го века. Показаны результаты для средних по оптимизированному ансамблю моделей CMIP6 прогнозируемых изменений температуры и осадков для наиболее агрессивного сценария эмиссии парниковых газов SSP5-85.

**Рисунок 8** - Рассчитанное распределение растительных зон на территории России для современных условий (а) и середины 21-го века (б).



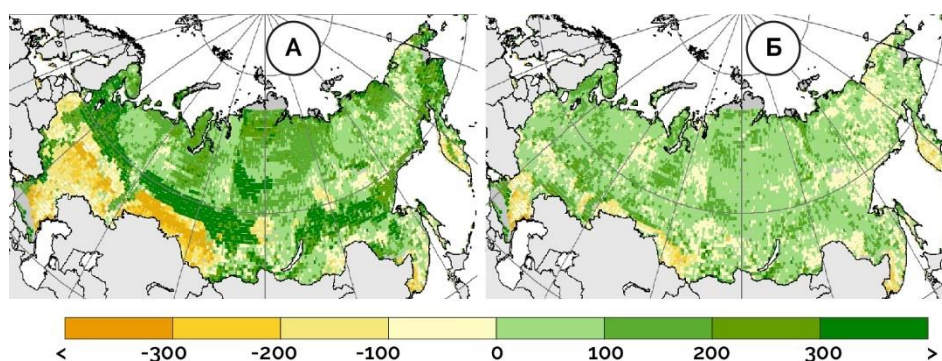
Биомы: **1** - полярная пустыня и арктическая (лишайниковая) тундра, **2** - граминоидная тундра, **3** - кустарничковая тундра, **4** - кустарниковая тундра, **5** - лесотундра, **6** - северная тайга, **7** - средняя тайга, **8** - южная тайга, **9** - смешанный лес, **10** - широколиственный лес, **11** - лесостепь, **12** - степь, **13** - полупустыня, **14** - пустыня, **15** - горная тайга, **16** - субгольцевые редколесья, **17** - альпийская тундра.

Можно видеть, что климатические изменения обуславливают значительный сдвиг ареалов биомов к северу и по высоте в горных регионах, очень сильное сокращение (практически исчезновение) зон тундры, существенное уменьшение площади лесотундры и северной тайги, некоторое уменьшение ареалов средней и южной тайги, увеличение ареалов смешанных и особенно широколиственных лесов, заметное увеличение площади степи и полупустыни. Прогнозируемые к середине 21 века изменения ареалов биомов (в тыс. км<sup>2</sup> и в % от современной площади биома на территории России) приведены в таблице 2. Нужно принимать во внимание инерционность процессов сукцессии растительных сообществ, оценка которой была дана ранее.

Для прогноза продуктивности растительности была использована статистическая модель, основанная на корреляционной зависимости индекса NDVI от климатических предикторов [8]. На рисунке 9 показан прогноз продуктивности для неизменного (современного) положения границ биомов (а) и для границ, адаптированных к новым климатическим условиям согласно рис. 8. прогнозируемое увеличение продуктивности каждой из растительных зон приведено в таблице 3.

**Таблица 2** - Прогнозируемые к середине 21 в. изменения ареалов биомов. Расчет по оптимизированной ансамблевой проекции CMIP6 для сценария SSP5-85.

Зона	км <sup>2</sup> × 10 <sup>3</sup>	%
Северная тундра	-299	-87
Граминоидная тундра	-843	-87
Кустарниковая тундра	-204	-46
Лесотундра	-503	-54
Северная тайга	-47	-5
Средняя тайга	-244	-13
Южная тайга	-100	-6
Смешанный лес	682	84
Широколиственный лес	685	407
Горная тайга	1635	66
Субгольцевые редколесья	-752	-29
Альпийская тундра	-884	-80

**Рисунок 9** - Прогнозируемое к середине 21 века изменение продуктивности растительности (г/м<sup>2</sup> в год) на территории России: а) – расчет для современных границ биомов; б) – расчет для границ биомов, адаптированных к новым климатическим условиям.**Таблица 3** - Прогнозируемые к середине 21 в. изменения продуктивности растительных зон для АЗРФ (% от современной). Расчет по оптимизированной ансамблевой проекции CMIP6 для сценария SSP5-85.

Зона	ЕТР	Западная Сибирь	Восточная Сибирь	Дальний Восток
Северная тундра	30.6	27.4	25.8	34.9
Южная тундра	20.7	27.0	20.3	34.8
Лесотундра	15.9	19.6	24.3	28.5
Северная тайга	12.4	16.3	18.9	24.9
Горная тайга	28.7	19.6	18.5	21.2
Субгольцевые редколесья	-	19.5	21.5	24.2
Альпийская тундра	28.9	32.5	26.4	36.0

## МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫЕ ГРУНТЫ

Важной частью природной среды Арктики являются многолетнемерзлые грунты (ММГ), область распространения которых называют криолитозоной. В России ММГ имеют сплошное распространение на площади в 7 млн км<sup>2</sup>, на 1.8 млн км<sup>2</sup> – прерывистое и на 2.5 млн км<sup>2</sup> – островное и редкоостровное [3, 121]. В современной науке природные феномены рассматриваются с учетом выполняемых ими функций. ММГ выполняют три главные экосистемные функции [89]: (1) служат основанием для инженерных сооружений; (2) верхний сезонно-талый слой формирует корнеобитаемое пространство для растительности; (3) содержат около 1850 Пг углерода<sup>5</sup>, что вдвое больше, чем во всей атмосфере, и в три раза больше, чем в биомассе всех лесов на планете [186]. Высвобождение даже небольшой части этого углерода в процессе таяния мерзлоты может значительно усилить глобальное потепление [132, 133, 186]. Особую озабоченность вызывают многолетнемерзлые болота и субаквальная мерзлота на арктическом шельфе, где в анаэробных условиях углерод высвобождается преимущественно в форме метана. По мнению авторов [210], высвобождение метана из газовых гидратов только лишь на шельфе Восточно-Сибирского моря приведет к экономическим потерям, обусловленным сопутствующим ростом глобальной температуры, оцениваемым в 60 триллионов долларов. Хотя с этой сенсационной оценкой не согласны большинство ученых [11, 14, 35, 116, 175], вопрос остается дискуссионным.

До недавнего времени криолитозона рассматривалась вне контекста изменения климата. Между тем, в глобально меняющемся мире сформировался общественный запрос на информацию о том, как меняются инженерные, экосистемные, био-геохимические и гидрологические функции ММГ в зависимости от климатических условий. На это указывают результаты исследования общественного восприятия изменения климата, в котором многие респонденты назвали деградацию ММГ одним из главных рисков [10].

Многочисленные наблюдения указывают на начавшиеся изменения состояния ММГ, главными факторами которых являются температура воздуха, атмосферные осадки и растительность [49]. В последнее десятилетие температура мерзлоты в Северном полушарии увеличилась на  $0.39 \pm 0.15$  °C в зоне сплошного и на  $0.20 \pm 0.10$  °C в зоне прерывистого распространения [98]. Такие различия закономерны, поскольку в более «теплых» грунтах с температурой выше -2 °C значительная часть тепла расходуется на фазовые переходы.

<sup>5</sup> 1 петаграмм, пг = 10<sup>15</sup>г = 1 миллиард тонн

Рисунок 10 - Сеть наблюдений ММГ.



Сведения о состоянии ММГ пополняются из четырех источников (Рис. 10). Самые продолжительные измерения температуры почвы до глубины 3,2 м проводятся на метеостанциях Росгидромета [78]. Еще один источник - геотермические измерения в скважинах глубиной от десятка до сотни метров. В России на конец 2020 г. задействованы 384 скважины<sup>6</sup>. С 1990 г. измерения мощности СТС проводятся в рамках международной программы мониторинга деятельного слоя (CALM). Из созданных в России 64 площадок CALM продолжительные ряды (более 10 лет) имеются менее чем на 20. Обобщение данных<sup>7</sup> дается в ежегодных Докладах Росгидромета об особенностях климата [38]. Наиболее детальные наблюдения проводятся на специализированных мерзлотных стационарах.

Определяющую роль во взаимодействии криолитозоны и атмосферы играет сезонно-талый слой (СТС). Он формирует корнеобитаемое пространство для растительности, лимитирует количество углеродосодержащего субстрата для газообмена между почвой и атмосферой, обуславливает режим надмерзлотных вод и регулирует интенсивность деструктивных геоморфологических процессов, влияющих на устойчивость инфраструктуры.

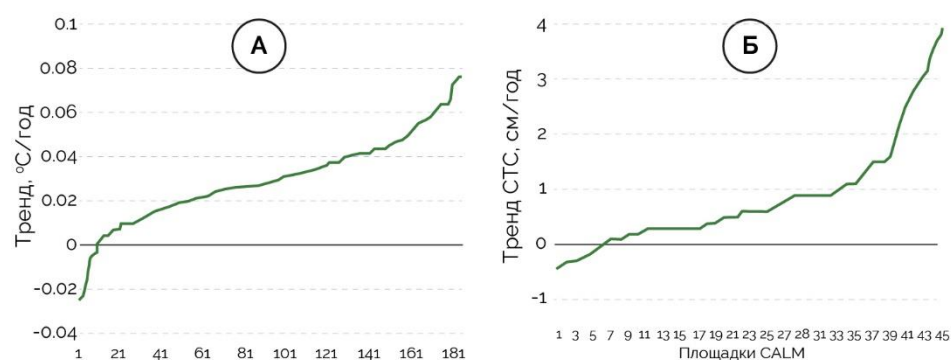
Данные наблюдений указывают на почти повсеместную деградацию многолетней мерзлоты в АЗРФ (рис. 11) [87]. На севере ЕТР за последние 40 лет на фоне большой межгодовой изменчивости произошло увеличение мощности СТС, сокращение площади приповерхностной мерзлоты, в наиболее южных районах островного распространения она полностью оттаяла [45, 66]. В Печорской низменности южная

<sup>6</sup> данные имеются на портале <http://gtnp.arcticportal.org/>

<sup>7</sup> Все данные размещены на портале [www.gwu.edu/~calm](http://www.gwu.edu/~calm)

граница мерзлоты сместилась на 30–40 км, вдвое больше – до 80 км, – на равнинах Приуралья. Возникли многочисленные новые и углубились существовавшие талики, в том числе и в области сплошного распространения мерзлоты. В равнинной тундре границы сплошных и прерывистых мерзлых грунтов сместились на 15–20 км, в Приуралье и в горах Пай-Хоя – на многие десятки километров. Почти повсеместно температура на глубинах 10–15 м увеличилась на 1–1.5 °С, активизировался термокарст [44]. Эти наблюдения согласуются с произошедшим потеплением в регионе во все сезоны года. Тренды температуры в период 1981–2020 гг. составили в среднегодовом исчислении 0.4–0.6 °С/10лет, в том числе 0.2–0.6 °С/10лет зимой, 0.4–0.6 °С/10лет весной и осенью и 0.3–0.5 °С/10лет летом [38].

**Рисунок 11** – Ранжированные тренды среднегодовой температуры грунта (а) и мощности СТС (б) для криолитозоны России. Данные 181 метеостанции и 45 наблюдательных площадок за период 1980–2020.



Были проведены расчеты динамики ММГ за исторический период на основе модельного реанализа. Суть его состоит в том, что вначале все имеющиеся данные наблюдений за каждый год используются для настройки динамической модели ММГ, после чего модель с зафиксированными оптимальными значениями параметров используется для аналитических и прогностических расчетов по всей криолитозоне [18]. Описание модели дано в публикациях [3, 53]. Рассчитанные тренды мощности СТС за аналитический период 1990–2020 гг. приведены в таблице 4. Видно, что они различаются в зависимости от типа почвы и убывают более чем в 4 раза от песков и супесей к суглинкам и торфу. Для каждого типа почвы тренды увеличиваются от наиболее холодных районов к югу.

На рис.12 показаны результаты расчета мощности СТС трех типов почв для базового периода 1981–2005 гг. и для середины 21 века (среднее за период 2041–2060). Прогностический расчет проводился с использованием оптимизированной климатической проекции CMIP6 для сценария SSP5-85. Можно отметить, что в самых северных районах мощность СТС мало зависит от типа почвы и не превышает 50 см. В центральной и южной частях криолитозоны мощность СТС значительно варьирует в зависимости от типа почвы.



Прогностические расчеты показывают полное исчезновение ММГ на севере ЕТР и значительное сокращение площади их распространения в Западной Сибири, наиболее выраженное на суглинистых почвах.

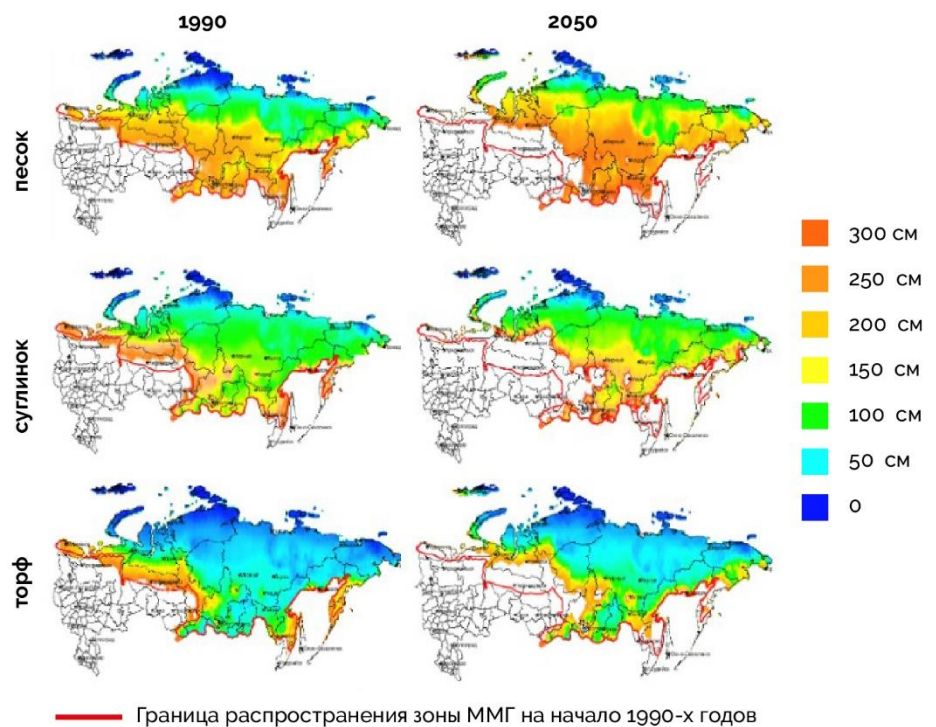
**Таблица 4** - Тренды мощности СТС (см/год) за период 1990–2020 гг. для различных регионов России и типов почв.

Регион	Тип почвы			
	песок	супесь	суглинок	торф
<b>ЕТР (30° – 65° в. д.)</b>				
Север, 70°-80° с. Ш.	0.96	0.83	0.34	0.22
Юг, 60°-70° с. Ш.	5.80	8.31	10.32	6.05
Весь регион, 60°-80° с. Ш.	5.15	6.07	8.65	6.50
<b>Западная Сибирь (65° – 90° в. д.)</b>				
Север, 70°-80° с. Ш.	1.23	0.81	0.74	0.27
Центр, 60°-70° с. Ш.	1.07	2.47	4.88	2.78
Юг, 50°-60° с. Ш.	0.09	1.95	1.31	6.21
Весь регион, 50°-80° с. Ш.	1.05	2.03	3.57	3.89
<b>Центральная Сибирь (90° – 120° в. д.)</b>				
Север, 70°-80° с. ш.	0.61	0.55	0.38	0.14
Центр, 60°-70° с. ш.	0.45	0.71	1.02	0.47
Юг, 50°-60° с. Ш.	0.21	0.96	1.85	1.18
Весь регион, 50°-80° с. ш.	0.43	0.79	1.27	0.74
<b>Восточная Сибирь (120° – 150° в. д.)</b>				
Север, 70°-80° с. ш.	0.78	0.74	0.42	0.13
Центр, 60°-70° с. ш.	0.75	0.51	0.50	0.17
Юг, 50°-60° с. ш.	1.27	2.15	3.73	2.55
Весь регион, 50°-80° с. ш.	0.90	1.21	1.77	1.22
<b>Дальний Восток (150° – 190° в. д.)</b>				
Север, 70°-80° с. ш.	0.86	0.88	0.47	0.16
Центр, 60°-70° с. ш.	1.29	0.91	1.38	0.58
Юг, 50°-60° с. ш.	5.36	12.08	11.17	5.50
Весь регион, 50°-80° с. ш.	1.66	1.92	2.06	1.19

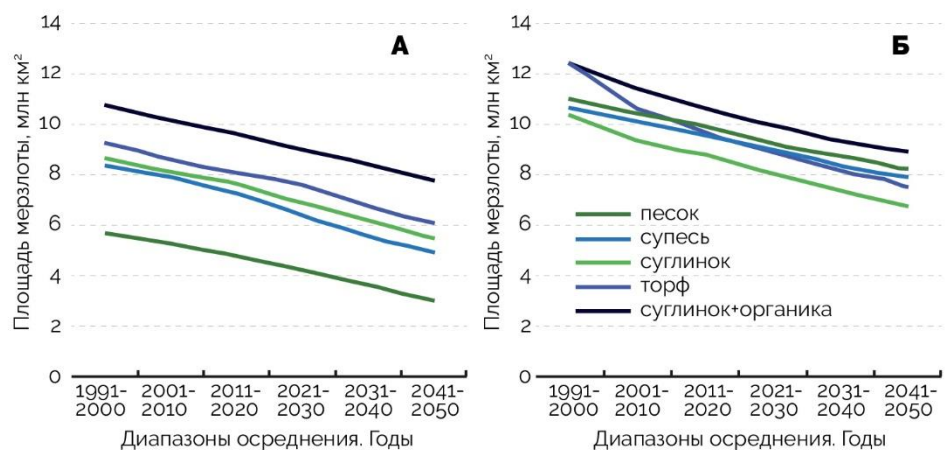
Интегральным показателем динамики всей криолитозоны является скорость уменьшения суммарной площади зон с различной мощностью СТС. Эта величина, рассчитанная для периода 1990-2050 гг., показана на рисунке 13 для двух диапазонов мощности СТС, до 1.5 м и до 3 м. Расчеты были проведены для четырех типов почвы, песок, супесь, суглинок и торф, а также для наиболее распространенного в естественных условиях варианта с верхним органическим слоем толщиной 15 см, плотностью 400 кг/м<sup>3</sup> и влажностью 0.2 дол. объёма, под которым находится суглинистая минеральная толща. Видно, что скорость сокращения

площади ММГ для всех минеральных почв практически одинакова и составляет около 5% за десятилетие. Особенностью водонасыщенных торфяников (многолетне-мерзлых болот) является отрыв кровли мерзлоты и образование талика при меньших, чем в минеральных почвах, глубинах оттаивания. Из-за этого сокращение площади мерзлых торфяников может происходить более быстро, до 8 % за десятилетие. Частичное иссушение мерзлых болот, наблюдаемое в последнее десятилетие, значительно уменьшает теплопроводность почвы в теплый период, из-за чего скорость их оттаивания замедляется, как видно из рисунка 16б.

**Рисунок 12** Мощность СТС для современных (слева) и прогнозируемых на середину 21 века (справа) климатических условий для трех типов почвы. Красной линией показана современная граница криолитозоны.



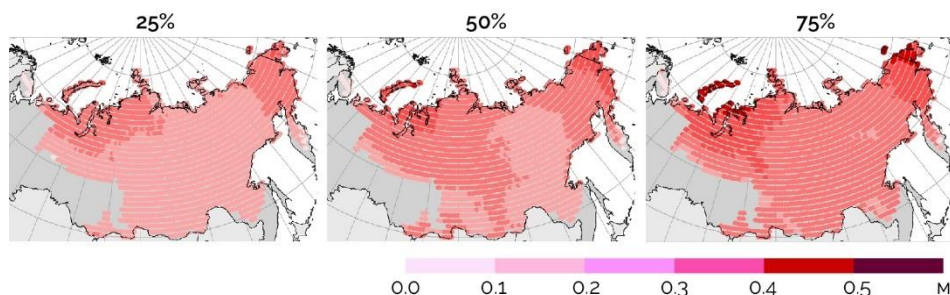
**Рисунок 13** Динамика площади ММГ для различных типов почвы и максимальных мощностей СТС. а – СТС менее 1,5 м, б – СТС менее 3 м.



Относительно недавно возник новый подход, в котором прогнозируемые изменения ММГ рассматриваются с вероятностных позиций [1]. Его суть в том, что по ансамблю равновероятных климатических проекций рассчитывается ансамбль возможных значений параметров состояния ММГ, при этом также учитывается неопределенность, обусловленная изменчивостью неклиматических факторов, в первую очередь растительности. Результаты формулируются в вероятностных метриках, таких как среднее значение (из всех имеющихся в ансамбле), медиана, стандартное отклонение, квантили распределения и т.п. В рамках этого подхода ММГ идентифицируются не детерминировано, а как вероятность того, что в заданной точке среднегодовая температура грунта отрицательна. При этом граница криолитозоны становится «размытой», и определить ее четкое положение невозможно. В работах [65, 69] с этих позиций рассматриваются оценки современного распространения ММГ и их возможного изменения в 21 веке. Аналогично можно представить и мощность СТС как вероятность того, что она превысит некоторую заданную величину, соответствующие расчеты описаны в работах [16, 82, 89].

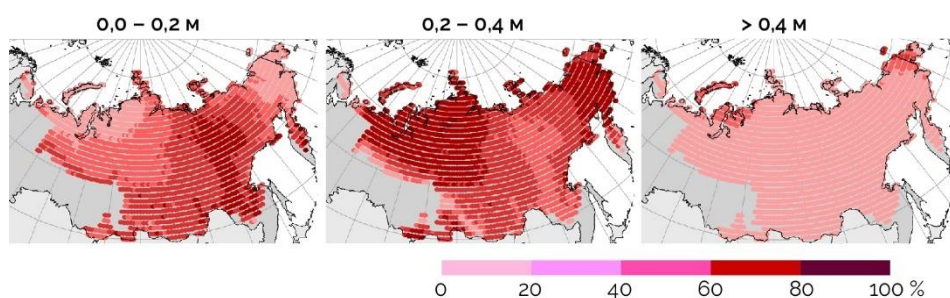
Вероятностно-стохастический прогноз иллюстрирует рисунок 14. На нем показаны квантили статистической выборки прогнозируемых к середине 21 века изменений мощности СТС по сравнению с ее современной величиной. Каждый член статистической выборки представляет собой расчет по одной климатической проекции на середину 21 века из ансамбля моделей CMIP6. Нижний (25%) и верхний (75%) квантили можно рассматривать, соответственно, как минимальную и максимальную оценки увеличения мощности СТС к середине 21 века. Медиана (50%) иллюстрирует «средний» расчет. Отметим, что медианное распределение (карта 50%) не является наиболее вероятным, поскольку все расчеты имеют равные веса, и будущее развитие климатической системы с равной вероятностью может проходить по любой из модельных траекторий. В этом заключается главное и принципиальное отличие вероятностных карт от использовавшихся ранее детерминистических, которые всегда предполагали наличие одной наиболее вероятной траектории.

**Рисунок 14** - Расчетные изменения мощности СТС для середины 21 века по отношению к базовому периоду 1961–1990 по сценарию SSP5-85. На картах показаны нижний квантиль (25%), медиана (50%) и верхний квантиль (75%) распределения расчетной величины по ансамблю моделей CMIP6.



Еще один вариант вероятностного представления перспективных оценок изменения мощности СТС представлен на рис. 15. Карты на этом рисунке показывают вероятность того, что к середине 21 века увеличение мощности СТС будет находиться в заданном интервале. Эта вероятность рассчитывается на основе частотного анализа выборки, полученной при помощи ансамблевого моделирования, при этом границы и число классов можно устанавливать произвольно. В данном случае выделены 3 класса с равномерным шагом 0,2 м. Можно видеть, что в Восточной Сибири и в Якутии к середине 21 века наиболее вероятно увеличение мощности СТС в диапазоне до 0,2 м, в то время как в Западной Сибири и на Чукотке наиболее вероятно увеличение на 0,2 – 0,4 м. Вероятность того, что мощность СТС увеличится более чем на 0,4 м почти повсеместно мала, за исключением небольшой территории арктического побережья в Ямало-Ненецком округе и на Чукотке. Отметим, что вероятностные прогнозы в наибольшей степени соответствуют требованиям инженерных расчетов геокриологических рисков, т.е. вероятности потери устойчивости сооружений, построенных на ММГ. Несмотря на это, они пока еще не получили большого распространения в инженерной геокриологии не только в России, но и в других арктических странах.

**Рисунок 15** - Вероятность (%) того, что увеличение мощности СТС к середине 21 века по отношению к базовому периоду 1961–1990 будет находиться в одном из 3-х заданных интервалов. Расчет по ансамблю моделей CMIP6 для сценария SSP5-85



## Влияние экосистем Арктики на углеродный цикл

В настоящее время широко обсуждается возможность уменьшения антропогенного воздействия на климат посредством декарбонизации, т.е. удаления из атмосферы и депонирование углерода. Арктические экосистемы играют в этом важную роль. Расчеты, результаты которых обсуждались ранее, показывают, что увеличение биопродуктивности на территории России к середине 21-го века при неизменных границах природных зон может составить около 0.72 Пг/год, а с учетом изменения ареалов биомов – около 1.41 Пг/год. Кроме того, расчеты показывают, что если на всей территории современной тундры появится лес, из атмосферы будет изъято около 18 миллиардов тонн углерода [181]. В итоге прогнозируемые изменения растительности могут заметно увеличить фотосинтетический сток углерода из атмосферы. Депонирование значительного количества углерода в биомассе деревьев на месте ныне существующей тундры и их последующее использование в деревообрабатывающей промышленности является одним из возможных методов декарбонизации.

Способность растительности депонировать углерод зависит от многих факторов, она может быть как стоком, так и источником углерода, например, при лесных пожарах [156]. Вся территория России является значительным стоком углерода, оцениваемым до 1.9 млрд т С год<sup>-1</sup>. Наблюдаемое увеличение продолжительности вегетационного периода ведет к росту аккумуляции углерода лиственными лесами. К этому ведут также изменения в землепользовании и утилизация углекислоты в виде удобрения. Наибольший среди всех исследованных биомов России сток углерода отмечен в мерзлотных лесах Якутии. Здесь он больше, чем в лугах и тундрах в 1.5 и 4.5 раза, соответственно.

Межгодовая вариация чистого газообмена лесных арктических экосистем составляет 1.7–2.4 т С га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup>, что при общей площади этих лесов в России, равной 257.1 млн. га дает верхний предел годовой депонирующей емкости углерода 450–617 млн. т С год<sup>-1</sup>. В лиственных лесах Сибири ежегодно аккумулируется от 0.4 до 1.0 млрд. т С год<sup>-1</sup>, что сопоставимо с данными по европейским и тропическим лесам. Чистая биомная продуктивность лиственных лесов Сибири оценена в 0.26–0.86 млрд. т С год<sup>-1</sup> [55, 56].

Многолетнемерзлые грунты по различным оценкам содержат 1670–1850 Пг (1 Пг = 10<sup>15</sup> г, или миллиард тонн) углерода [186]. Это в 12 раз больше, чем во всех тропических лесах, вдвое больше, чем в атмосфере, и больше, чем во всех разведанных запасах нефти. Примерно такое же количество содержат все почвы планеты, но если в почвах богатый органикой слой составляет дециметры, а органика представлена в основном медленно разлагающимся гумусом, то в криолитозоне на

половине территории это метры и десятки метров, в которых органика - хорошо сохранившиеся остатки корней трав. Большая ее часть, около 1024 Пг, находится в верхнем трехметровом слое, который в условиях изменения климата может растаять. В первые три года после оттаивания скорость декомпозиции органики может достигать 2–3% в год. При гипотетическом повсеместном таянии мерзлоты эмиссия углерода за год может составить порядка 10 Пг, что примерно равно всем антропогенным источникам [12, 87].

Этот процесс может сдерживать нехватка кислорода. Микробы в оттаявшей мерзлоте настолько активно его потребляют, что за счет диффузии кислород проникает в почву лишь на 0,5–1 м, ниже формируется анаэробная зона. Анаэробные условия имеют место также на всех обводненных территориях. На плоских территориях в просадках полигонального рельефа обычно скапливается вода. Просадки расширяются, объединяются и образуют термокарстовые озера. На равнинах севера они занимают 10–30% территории. Эродируя берега, они расширяются и мигрируют. У эрозионных берегов мерзлота тает, при этом до 30% высвобожденной органики превращается в метан [209]. В озерах вдоль эрозионных берегов в полосе в несколько десятков метров наблюдается круглогодичный выход пузырькового метана. Это самый мощный природный источник метана – сотни г·м<sup>2</sup>/год. Пузырьковые потоки настолько сильны, что над ними всю зиму во льду существуют незамерзающие колодцы, через которые метан поступает в атмосферу. В центральных частях озер, где мерзлота растаяла давно, поток метана снижается на 2–3 порядка, поскольку лабильная органика уже в основном переработана метаногенами [12, 87].

Анализ спутниковых снимков указывает на разнонаправленные тенденции динамики озер в АЗРФ [70]. В арктической тундре Западной Сибири наблюдается увеличение количества озер, в более южных районах криолитозоны – уменьшение. Можно заключить, что в зоне сплошной мерзлоты развивающийся термокарст и просадки грунта приводят к формированию новых озер. В прерывистой мерзлоте увеличение мощности СТС и термокарст способствуют термоэрозионному спуску воды из озер, на их месте образуются аласы [25]. Такое «обновление» и малые размеры новых озер ведут к уменьшению средней площади термокарстовых озер в криолитозоне [71].

С криолитозоной России часто связывают эмиссию метана и потенциальную глобальную «метановую катастрофу», ведущую к многомиллиардным экономическим потерям. Если первоначально речь шла о мерзлых болотах западной Сибири, [84, 210], то впоследствии к ним добавилась и субаквальная мерзлота на шельфе морей восточной Арктики (МВА) [188, 200]. На шельфе помимо биогенного в атмосферу

может поступать метан, образующийся при диссоциации гидратов, находящихся в донных осадках на глубинах более 150 м от уровня моря. Их запасы для всего Северного Ледовитого Океана оцениваются в 455–2500 Пг С [162].

Несмотря на достаточно большое число уже выполненных исследований, показавших, что опасения относительно «метановой катастрофы» значительно преувеличены [6, 11, 27, 36, 193], этот вопрос по многим причинам, в том числе, возможно, и геополитическим, остается в повестке дня международного научно-политического сообщества.

Объективную оценку возможности «метановой катастрофы» можно получить, ответив на два главных вопроса, (1) какое количество метана может на протяжении 21 века ежегодно поступать в атмосферу из различных источников, связанных с таянием ММГ, и (2) насколько этот дополнительный метан может увеличить глобально осредненную среднегодовую температуру воздуха. Ответы на эти вопросы были даны в серии публикаций [6, 11, 12, 14, 87]. В них были получены перспективные оценки для континентальной и субквальной мерзлоты. Основные выводы этих работ состоят в следующем.

Современная глобальная эмиссия метана из всех источников составляет около 580 Тг/год (1 Тг =  $10^{12}$  г, или миллион тонн), а его содержание в атмосфере – более 5000 Тг. Это дает радиационный («парниковый») эффект около 0,48 Вт/м<sup>2</sup>, притом, что суммарный эффект всех атмосферных газов 2,83 Вт/м<sup>2</sup> [135].

Принято считать, что современная эмиссия метана на заболоченных территориях криолитозоны России составляет 24–33 Тг/год, из которых 22–28 Тг/год приходится на Западную Сибирь. По данным моделирования, к середине 21 века приращение эмиссии составит 15,2–19,4 Тг/год. С учетом погрешности расчета можно округлить эту величину до 20 Тг/год. Поскольку среднее время жизни метана в атмосфере составляет 11 лет, дополнительная эмиссия 20 Тг/год увеличит концентрацию метана в атмосфере примерно на 80 миллиардных единиц (ppb). Обусловленное этим дополнительное радиационное воздействие («парниковый» эффект) увеличит глобально осредненную среднегодовую температуру воздуха приблизительно на 0,025 °С, что незначительно в сравнении с воздействием других факторов. При увеличении концентрации метана в атмосфере должна увеличиваться также и концентрация тропосферного озона, являющегося парниковым газом. Это должно привести к дополнительному нагреванию на величину, сопоставимую с прямым воздействием увеличения концентрации метана. Даже в этом случае максимальная оценка влияния эмиссии метана при таянии болот криолитозоны на глобальную температуру будет ниже 0,05 °С.

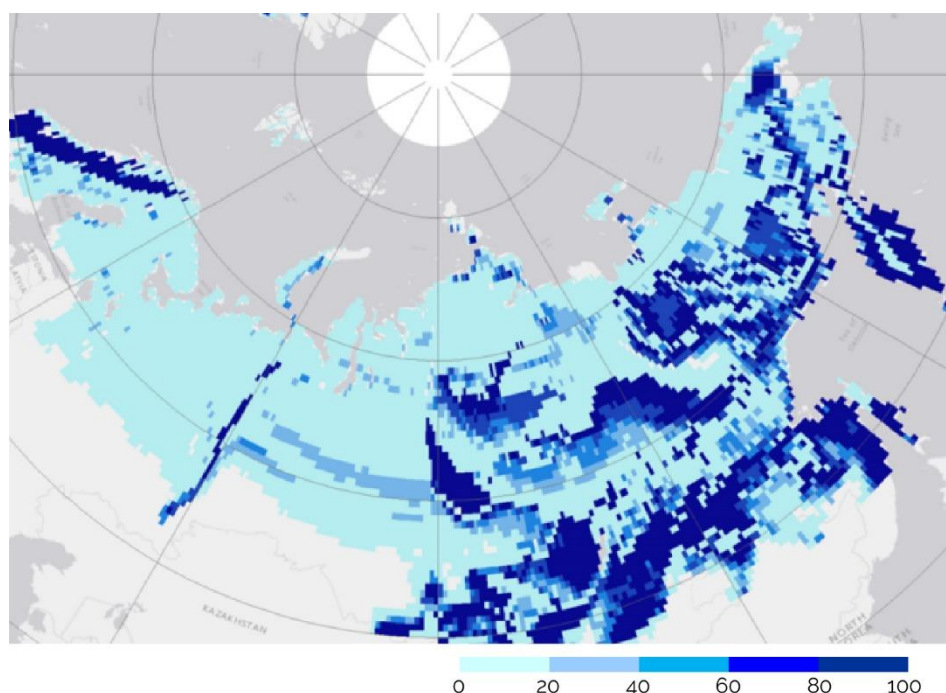
На шельфе МВА около 2 млн км<sup>2</sup> занимает реликтовая субаквальная мерзлота. Ее газовая проницаемость близка к нулю, за исключением участков, содержащих талики, где в атмосфере наблюдаются концентрации метана в несколько раз более высокие, чем фоновые. Талики существовали еще до затопления шельфа 6–9 тыс. л.н. вблизи геологических разломов, под руслами палеорек и под палеоозерами [175]. Анализ данных показывает, что повышенные концентрации метана на шельфе наблюдаются лишь вблизи таких зон [11]. За их пределами пути для высвобождения метана могут появиться, если оттаивание донных отложений достигнет верхней границы слоя устойчивого состояния гидратов, однако моделирование указывает на то, что в ближайшей перспективе это маловероятно [106, 116]. С учетом сказанного, едва ли следует ожидать в обозримом будущем увеличения эмиссии метана на шельфе, которая по оценкам составляет около 17 Тг/год, т.е. не превышает эмиссию с заболоченных территорий и не оказывает существенного влияния на глобальную температуру. Это не подтверждает гипотезу о возможности «метановой катастрофы», обусловленной современным таянием субаквальной мерзлоты.



## УСТОЙЧИВОСТЬ ЭКОСИСТЕМ АРКТИКИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА

Для планирования природопользования в Арктике важно иметь информацию об устойчивости экосистем при изменении климата. Под устойчивостью понимается способность сохранять структурную целостность и функциональные качества в меняющихся климатических условиях. Для растительности нами был разработан индекс устойчивости, в качестве метрики использовалась вероятность того, что при заданной величине климатического воздействия рассматриваемая точка будет расположена в той же растительной зоне, что и до этого воздействия. Была проведена серия расчетов растительной зональности для базового периода 1961-1990 и для каждой из климатических проекций, входящих в регионально-оптимизированный ансамбль CMIP6. Затем в каждой точке пространственной сетки с шагом 0.5 градуса по широте и долготе была определена доля проекций, согласно которым к середине 21 века данная точка будет располагаться в той же растительной зоне, что и в расчете для базового периода. На рисунке 16 показаны рассчитанные значения этой величины, которая принималась за индекс устойчивости растительности. Он учитывает кумулятивное воздействие всех влияющих климатических факторов, его прогностическая способность определяется точностью модели, используемой для расчета границ растительных зон. Карта на рисунке 16 показывает, что наибольшей устойчивостью к изменению климата обладает горная растительность, леса Западной и Восточной Сибири. В зоне арктической тундры и во всей европейской части АЗРФ индекс имеет наименьшие значения.

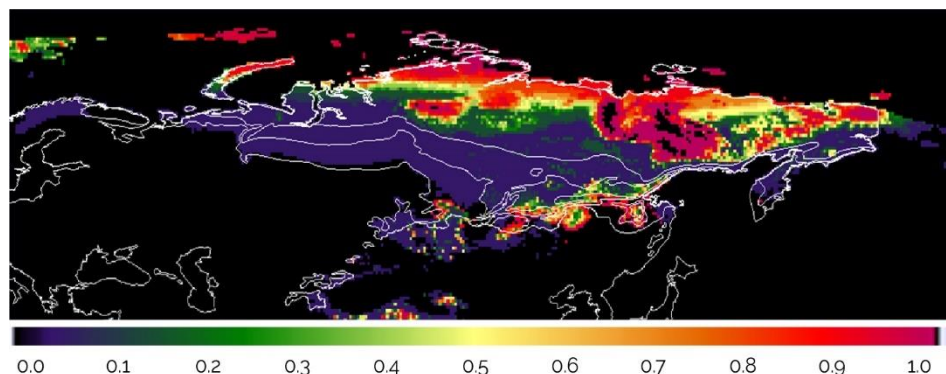
**Рисунок 16** - Индекс устойчивости растительности по отношению к прогнозируемым по ансамблю CMIP6 изменениям климата к середине 21 века.



Для многолетнемерзлых грунтов нами были разработаны два независимых индекса устойчивости. Первый использует мерзлотную зональность. В криолитозоне выделяют три типа ММГ, - сплошного, прерывистого и островного распространения. При разработке индекса мы принимали во внимание, что все виды природопользования в Арктике, а также природные системы адаптированы к специфическим условиям той зоны, где они локализованы. В соответствии с этим и по аналогии с рассмотренной ранее растительной зональностью, устойчивость многолетнемерзлых грунтов оценивалась на основании того, будет ли в заданной точке сохраняться их тип при изменении климатических условий.

Нами было проведено сравнение построенных по данным наблюдений геокриологических карт с расчетами по модели ММГ и получена эмпирическая оценка того, каким значениям мощности СТС соответствуют указанные на картах границы между зонами. Расчет проводился для мерзлого грунта с условно стандартизованными свойствами, состоящего из суглинистого грунта, перекрытого сверху органическим почвенным горизонтом, толщина которого задавалась равной 0, 5 и 10 см, соответственно, в полярной тундре, кустарничковой тундре и в тайге. Объемная влажность принималась равной 20%. Были использованы среднесезонные нормы температур и осадков за базовый период 1961–1980 гг. В этот период было проведено наибольшее число полевых исследований, результаты которых были положены в основу построения эмпирических карт ММГ. Сравнение результатов расчета с положением мерзлотных зон на эмпирической карте показало, что при таких расчетных установках южные границы сплошной, прерывистой и островной мерзлоты можно приближенно аппроксимировать изолиниями мощности СТС 1.40 м; 1.56 м и >2.50 м. Погрешность оценки площадей соответствующих зон составляет при этом менее 5%. Эти средние величины использовались в дальнейшем как предикторы для расчета положения границ мерзлотных зон в новых климатических условиях. Заметим, что эта аппроксимация не является универсальной, а применима лишь для грунтов с заданными нами свойствами. В песчаных грунтах при тех же условиях мощность СТС будет выше, а в заторфованных – ниже. В контексте решаемой нами задачи — это несущественно, поскольку состав грунта остается неизменным при новых климатических условиях.

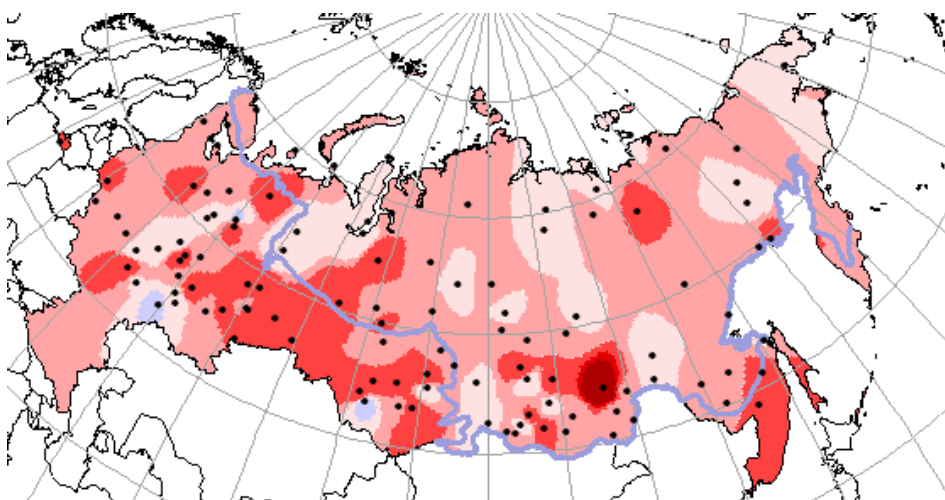
**Рисунок 17** - Индекс устойчивости многолетнемерзлых грунтов к середине 21 века по отношению к базовому периоду 1961–1980. Расчет по оптимизированной ансамблевой проекции CMIP6 для сценария RCP8.5. Белыми линиями показаны границы сплошной, прерывистой и островной мерзлоты для базового периода.



Была проведена серия расчетов для базовых и прогнозируемых на середину 21 века климатических условий по всем моделям, входящим в регионально-оптимизированный ансамбль CMIP6, по сценарию SSP5-85. Была определена доля проекций, согласно которым к середине 21 века данная точка будет располагаться в той же мерзлотной зоне, что и в базовый период. Результат расчета этой величины, принимаемой за индекс устойчивости ММГ, показан на рисунке 17.

Второй индекс ( $K_{\text{ММГ}}$ ) представляет собой отношение трендов среднегодовой температуры грунтов  $\alpha_{\text{тп}}$  на глубине 3.2 (ниже уровня сезонного оттаивания) и температуры воздуха  $\alpha_{\text{тв}}$ ,  $K_{\text{ММГ}} = \alpha_{\text{тп}} / \alpha_{\text{тв}}$ . Чем меньше значения этого индекса, тем больше устойчивость температурного режима грунтов при изменении температуры воздуха. Для расчета использовались данные метеостанций со статистически значимым (достоверность >95%) трендом температуры воздуха за период наблюдений в интервале 1981–2019 гг. Значения индекса показаны на рисунке 18.

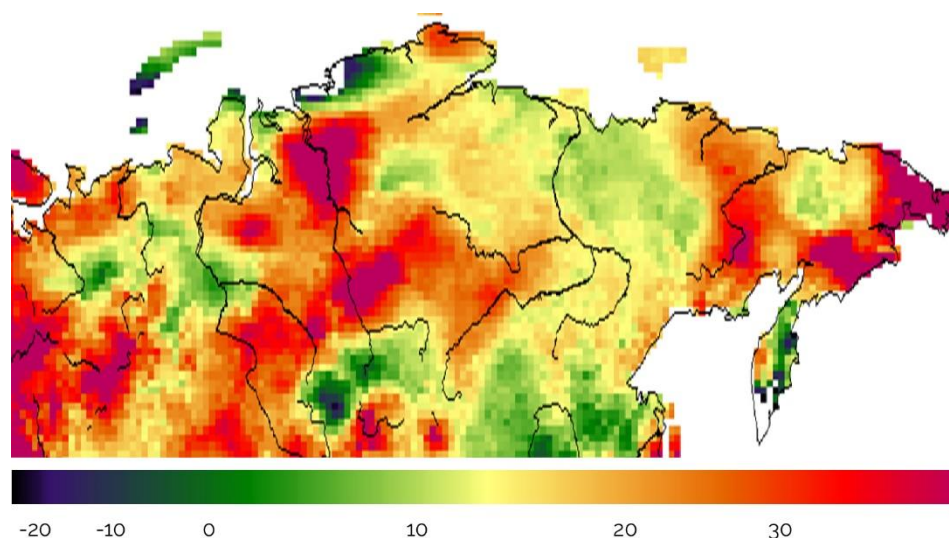
**Рисунок 18** - Отношение тренда годовой температуры почвы к тренду годовой температуры воздуха за период 1981–2019 гг. Фиолетовой линией показана южная граница криолитозоны.



Распределение второго индекса устойчивости ММГ на рисунке 18 обладает выраженной секторальностью. Диапазон значений индекса целесообразно разделить на три градации:  $0 \div 0.5$  – высокая устойчивость;  $0.5 \div 1.0$  – средняя устойчивость;  $>1.0$  – низкая устойчивость, выделив соответствующие районы ММГ России. Заметим, что этот индекс является чисто эмпирическим, в нем неявно отражены изменения снежного покрова, влияющие на температуру грунта независимо от температуры воздуха. При увеличении высоты снега его тепляющее влияние возрастает. В таких районах имеют место повышенные значения индекса устойчивости. На рисунке 19 показаны тренды сумм осадков за холодные месяцы, рассчитанные для периода 1981–2020. Во многих районах криолитозоны можно отметить соответствие повышенных значений величин на обоих рисунках.

Следует принимать во внимание, что изменения снежного покрова также оказывают влияние на ММГ, часто не меньшее, чем температура воздуха. Это подтверждает анализ данных на Колымской низменности, результаты которого представлены нами в работах [12, 87]. Увеличение высоты снега за последние три года при относительно небольшом росте среднегодовой температуры воздуха вызвали беспрецедентное увеличение мощности СТС и температуры грунта, при этом местами сезонное оттаивание превысило 4 метра и образовались талики.

**Рисунок 19** - Тренд осадков за ноябрь-апрель, мм/10 лет. Расчет для периода 1981–2020.



Рассмотренные индексы устойчивости экосистем достаточно условны, поскольку их отклик на климатическое воздействие зависит от взаимодействия друг с другом. Так, на отклик ММГ оказывает влияние демпфирование вариаций атмосферного климата напочвенными покровами, прежде всего, снегом и растительностью, которые сами являются климатозависимыми и подвержены изменениям. Отклик растительности, в частности смещение растительных зон, также часто

лимитирован мощностью СТС и, таким образом, зависит от ММГ.

Обобщая результаты опубликованных исследований и характеризуя перспективный экосистемный ресурс ММГ, можно отметить следующее. В 21 веке улучшатся условия для растительности за счет увеличения корнеобитаемого сезонно-талого слоя почвы. Уменьшится механическая несущая способность мерзлоты, что может привести к опасным последствиям для инфраструктуры и экономическим потерям, если не будут приняты превентивные меры по стабилизации фундаментов и оснований сооружений. Для перспективного планирования развития Арктики необходимы количественные оценки этих противоположных, с экономической точки зрения, тенденций изменения экосистемного ресурса и связанных с предстоящими изменениями экономических рисков для инфраструктуры.

## ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Актуальным вопросом является экономическая оценка последствий изменения климата. Она позволяет выбрать оптимальное соотношение между мерами по адаптации и по ограничению воздействия на климат посредством сокращения выброса парниковых газов, декарбонизации и геоинженеринга. В настоящее время общепринято осуществлять такой выбор путем сравнения стоимости потенциальных потерь и выгод (cost-benefit analysis). По данным, опубликованным в [107], при сохранении текущего тренда повышения температуры и невыполнении Парижского соглашения к 2050 г. глобальная температура повысится на 3,2°C, а совокупные экономические потери могут составить 18% мирового ВВП. В странах Европы они составят 10,5%, в Северной Америке 9,5% и в России до 12%. При более мягких сценариях повышения температуры на 2°C и 2,6°C глобальные потери составят 11–14%, при этом в России они будут ниже среднемировых и составят, соответственно, от 1% до 10% [103].

Риски при переходе к низкоуглеродной экономике определяются тем, как общество разрабатывает ресурсы, использует технологии и внедряет регулирование. Они могут проявиться в значительных изменениях стоимости активов и повышении затрат на ведение бизнеса. Возникновение «неэффективных» активов, таких как залежи ископаемого топлива или запасы угля, несет в себе риск системной девальвации для индустрии. Это непосредственно затрагивает российскую Арктику, экономика которой в значительной степени имеет сырьевую направленность.

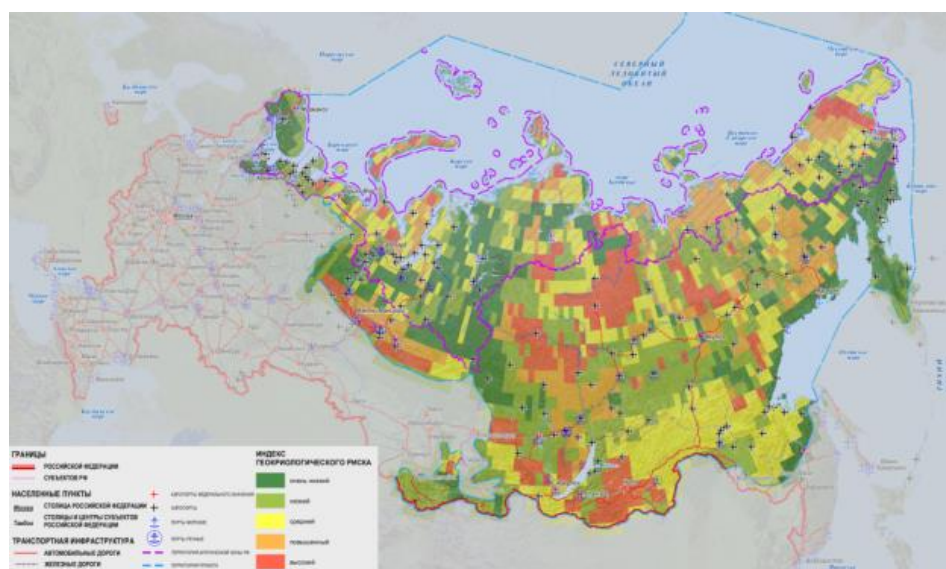
Высокие риски связаны с финансовыми рынками, в первую очередь – с рынком страхования. Отрасль страхования требует достаточного наличного капитала для преодоления разрыва между среднегодовыми убытками, покрываемыми страховыми взносами, и теми убытками, которые приходится на наиболее «экстремальные» годы. Ожидается, что среднегодовые убытки увеличатся на меньшие суммы, по сравнению с максимальными, в результате чего сумма капитала, которую страховщики должны держать, чтобы справиться с экстремальными ситуациями, возрастает. В Арктике эти риски в первую очередь повлияют на перспективу развития перевозок по Северному морскому пути.

Многие социально-экономические риски, характерные для российской части Арктики, связаны с ее высокой урбанизированностью. В работе [173] проводится анализ 46 арктических городов по 128 показателям устойчивого развития. Развитая инфраструктура обуславливает высокие значения многих ключевых показателей российских городов по сравнению с зарубежными. На душу населения

потребление энергии ниже в 5 раз, воды ниже на 30%, прежде всего за счет централизованного газо-тепло- и водоснабжения; питьевым водоснабжением обеспечено 99% населения, что на 20% выше, чем в зарубежной Арктике; число больничных коек выше в 3 раза; в 2 раза больше учреждений культуры и спорта, на них выделяется в 3 раза большая доля муниципального бюджета; в 1.5 раза больше подключений к интернету и мобильных телефонных соединений; на 25% больше протяженность маршрутов общественного транспорта. Инфраструктура, обеспечивающие эти показатели, подвержена рискам в связи с таянием многолетнемерзлых грунтов.

В работе в [170] впервые была дана оценка геокриологического риска для инфраструктуры криолитозоны северного полушария. Для этого был использован расчетный индекс, который характеризует изменение мощности СТС и потенциальную просадку грунта при оттаивании. В последующих работах проводилось картирование этого индекса, рассчитанного для различных климатических проекций [2, 4, 7, 17, 19]. На рисунке 20 показана одна из таких карт, рассчитанная с использованием ансамблевой климатической проекции CMIP5 на середину 21 века. На карте показана федеральная транспортная сеть криолитозоны России. Большинство линейных объектов транспортной инфраструктуры построены на насыпях. Деградация ММГ приводит к неравномерной осадке грунтов вдоль полотна таких линейных объектов.

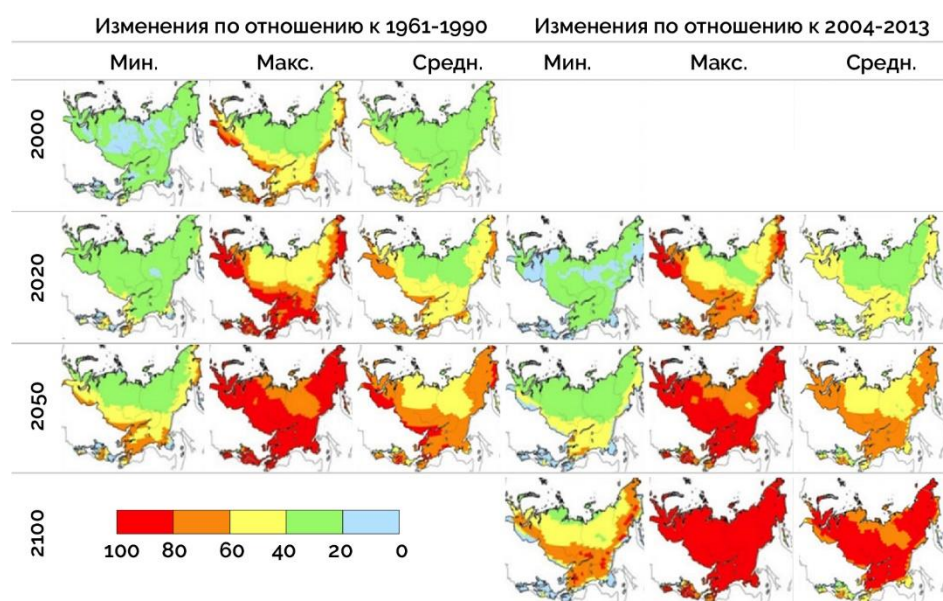
**Рисунок 20** - Индекс геокриологического риска, рассчитанный по ансамблевой климатической проекции CMIP5 для середины 21 века.



Для точечных объектов, таких как жилые и промышленные здания, был разработан другой индекс геокриологического риска, основанный на температуре грунта [194]. Здания в криолитозоне стоят на свайных фундаментах и опорах. Образующийся на боковой поверхности свай лед-цемент скрепляет их с мерзлым грунтом и несет до 80% нагрузки.

Прочность этой связи уменьшается при увеличении температуры грунта. На рисунке 21 приведены расчетные карты, показывающие уже произошедшие и прогнозируемые к середине 21 века изменения несущей способности свай. Видно, что по сравнению с базовым периодом 1961–1990 она повсеместно уменьшилась на 20%–40%, притом, что запас прочности по СНИП должен быть не менее 40%. В ближайшее десятилетие на большей части криолитозоны он будет превышен, а к середине 21 века этот показатель будет превышен повсеместно.

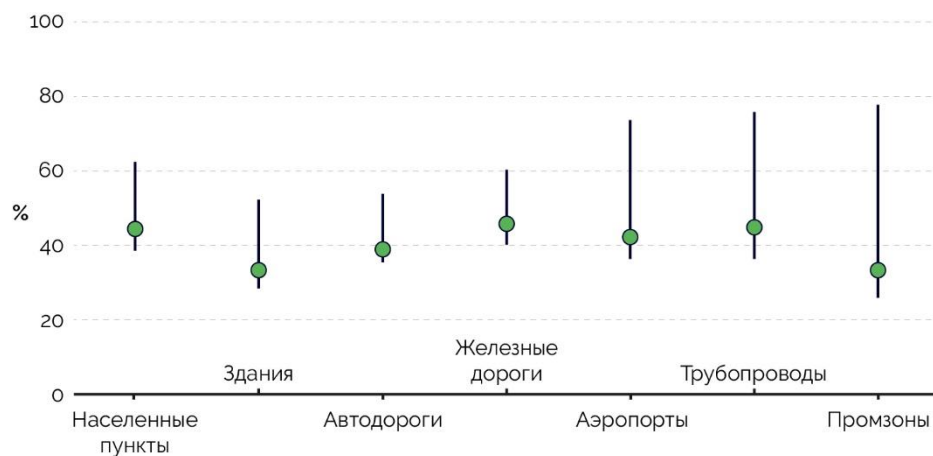
**Рисунок 21** - Относительные изменения несущей способности свайных фундаментов, обусловленные увеличением температуры вечной мерзлоты [195]. Расчет по ансамблевой климатической проекции CMIP5.



В работе [125] индекс геокриологического риска был дополнен показателями, характеризующими тип грунта (скальный или минеральный), изменение его свойств при промерзании, содержание льда и близость мерзлоты к началу оттаивания. Были рассчитаны значения комплексного показателя геокриологического риска для середины 21 века и определены районы с низкими, средними и высокими его значениями. В каждом районе были даны оценки экономической составляющей. Для этого по опубликованным данным была проведена оценка стоимости объектов инфраструктуры, попадающих в различные зоны риска. На рисунке 22 показаны результаты для климатического сценария RCP8.5 с дифференциацией по следующим типам инфраструктуры: населенные пункты, отдельные здания, автомобильные и железные дороги, аэропорты, трубопроводы и промышленные зоны.



**Рисунок 22** - Доли инфраструктуры в криолитозоне Евразии, подверженной высокому геокриологическому риску к середине 21 в. Вертикальными линиями обозначен диапазон изменения, обусловленный неопределенностями прогнозируемых по ансамблевому климатическому сценарию RCP8.5 значений среднегодовой температуры грунта и мощности СТС.



Было показано, что в зону высокого риска попадают экономически важные объекты, в том числе 1590 км трубопровода «Восточная Сибирь – Тихий океан», соединяющего г. Тайшет в Иркутской области и нефтеналивной порт Козьмино в заливе Находка; 1260 км магистральных трубопроводов в ЯНАО; 280 км железной дороги Обская – Бованенково. В зону наибольшего риска попадают города Воркута и Новый Уренгой.

В работе [196] были рассчитаны риски возможного повреждения инфраструктуры в криолитозоне Северного полушария и России и даны стоимостные оценки. Оценки возможного ущерба от деградации многолетней мерзлоты к середине 21 века для объектов промышленной, транспортной и жилой инфраструктуры приведены в таблице 5. Расчеты были основаны на данных Росстата о стоимости существующей инфраструктуры в административных регионах АЗРФ. По состоянию на 2016 г. она оценивается в \$248.6 миллиарда, что составляет около 7.5% ВВП России за этот год. Жилая инфраструктура дает вклад менее четверти всей суммы и оценивается в \$56.2 миллиарда. Для оценки стоимости прогнозируемого ущерба была рассчитана доля инфраструктуры, которая без мер по адаптации будет повреждена или утрачена из-за уменьшения несущей способности и неравномерной просадки мерзлоты к середине 21 века. Полученные оценки обладают значительной неопределенностью, поскольку в расчетах предполагалось линейная зависимость между плотностью размещения инфраструктуры и численностью населения. В действительности это не так. Основной вклад в инфраструктуру вносит промышленность, подотрасли которой сильно отличаются между собой по показателям трудоемкости и фондоемкости.

**Таблица 5** - Прогнозируемый ущерб (средняя, мин./макс. оценки) от деградации многолетней мерзлоты к середине 21 века для жилой, промышленной и транспортной инфраструктуры ( $\$ \times 10^9$ ), а также его доля в ВРП (на 2016 г.) в административных регионах России.

Регион	Ущерб для различных видов инфраструктуры			Доля от ВРП (2016)
	жилая	промышленная	транспортная	
Коми	2.17 (2.17/2.17)	0.83 (0.79/0.88)	5.51 (5.51/5.51)	2.2 (2.2/2.2)
НАО	1.75 (0.01/1.75)	0.86 (0.77/0.95)	6.04 (5.46/6.61)	5.0 (3.6/5.4)
ХМАО	0.05 (0.0/0.82)	0.0 (0.15/0.0)	1.41 (1.41/1.41)	0.1 (0.1/0.1)
ЯНАО	9.11 (7.22/9.11)	5.26 (4.23/6.28)	37.96 (30.88/45.05)	4.0 (3.2/4.6)
Красноярский край	5.87 (0.01/7.83)	0.11 (0.0/0.72)	3.97 (3.94/4.00)	0.8 (0.3/1.1)
Якутия	1.69 (0.0/25.3)	8.65 (5.48/11.82)	10.93 (9.63/12.23)	3.7 (2.6/8.5)
Камчатский край	0.0 (0.0/0.0)	0.04 (0.01/0.07)	0.02 (0.01/0.03)	0.1 (0.0/0.1)
Магаданская область	0.08 (0.0/2.77)	0.07 (0.0/0.56)	0.82 (0.77/0.87)	1.0 (0.8/4.2)
Чукотка	0.01 (0.01/0.88)	0.87 (0.48/1.17)	1.02 (0.99/1.05)	4.2 (3.3/6.9)
Все регионы	20.71 (9.41/50.63)	16.69 (11.77/22.60)	67.67 (58.59/76.75)	1.8 (1.3/2.5)

Согласно данным таблицы 5, средняя оценка суммарного ущерба для всей инфраструктуры к середине 21 века составляет \$105.07 миллиарда, наибольшие доли вносят ЯНАО (\$52.33 миллиарда) и Якутия (\$21.26 миллиарда). Способность противостоять этим рискам и компенсировать прогнозируемый ущерб в значительной степени зависят от благосостояния конкретных регионов, в качестве его метрики можно использовать выпуск региональной продукции (ВРП). Данные для административных регионов о том, какую долю ВРП составляет прогнозируемый ущерб, также приведены в таблице 2.3.8.2. Она изменяется в значительном диапазоне от 0.1 в Х-МАО и Камчатском Крае до 4.0–5.0 в НАО, ЯНАО и Чукотском АО.

В работе [197] рассматривалось изменение среднегодовых затрат на поддержание и воспроизводство инфраструктуры за счет сокращения периода ее эксплуатации в связи с деградацией многолетней мерзлоты. Согласно полученным оценкам, к середине 21 века в России они увеличатся на 27.5% и составят 6,63 миллиарда долларов. Деструктивному воздействию будет подвержено 32% всей инфраструктуры, стоимость которой оценивается в \$40.339 миллиарда.

В работе [63] был оценен ущерб инфраструктуре в муниципальных образованиях на части криолитозоны, расположенной в АЗРФ. Согласно полученным оценкам,

к середине 21 века ущерб для всей инфраструктуры составит 5–7 трлн руб., для жилищного фонда – на порядок меньше, около 700 млрд руб.

Недостатком перечисленных работ является ограниченность первичной статистической информации о наличии и стоимости инфраструктуры. Из-за этого прогнозируемые величины ущерба заметно различаются даже в работах одного авторского коллектива, в зависимости от выбранных методик дооценки недостающих данных. Кроме того, учитывается лишь текущая стоимость инфраструктуры притом, что ее количество и стоимость неизбежно изменится за прогнозный период при реализации крупных инвестиционных проектов в криолитозоне. Другим значимым упущением представляется неучет экономических механизмов снижения величины ожидаемого ущерба, например инвестиций в создание систем термостабилизации грунтов.

## ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА В КОНТЕКСТЕ МИРОВОЙ И НАЦИОНАЛЬНОЙ ПОЛИТИКИ

Любая научная проблема, если признан ее глобальный характер и влияние на интересы государств, бизнеса и населения, с неизбежностью требует политических мер для своего решения. В отношении изменения климата такое «признание» пришло в начале 1990-х годов, во многом благодаря деятельности МГЭИК, которая в 1991 г. опубликовала свой Первый оценочный доклад. Прямым следствием этого стало заключение в 1992 г. Рамочной Конвенции ООН по изменению климата (РКИК). Ее главной целью было обеспечить возможность международных переговоров высокого уровня о путях предотвращения опасного антропогенного воздействия на климат. Вторым оценочным докладом МГЭИК (1995) стал научной основой правительственных переговоров, завершившихся принятием в 1997 г. Киотского протокола. Это было первое международное соглашение, выработанное в рамках РКИК. Ратифицировавшие его государства приняли на себя обязательства по сокращению выброса парниковых газов. Заметим, что ценой распада страны, последующего экономического коллапса и уничтожения большей части промышленности, Россия стала и до настоящего времени остается мировым лидером в этом вопросе, одномоментно уменьшив эмиссии примерно на 37% по сравнению с 1990 г., принимаемым за точку отсчета.

На международном уровне уже в середине 1990-х годов были пройдены этапы осмысления неизбежности дальнейшего изменения климата, неотвратимости последствий для природных, экономических и социальных систем. Это нашло отражение в многочисленных научных статьях, которые были обобщены в третьем оценочном докладе МГЭИК [102]. В 2000-х наступил этап анализа дилеммы между адаптацией к предстоящему изменению климата и уменьшением антропогенного воздействия на климат, в первую очередь посредством уменьшения эмиссии парниковых газов. Это породило серию хорошо скоординированных комплексных научных проектов по изучению климатического влияния на природные системы, секторы экономики и крупные регионы (например, Средиземноморский, Скандинавский и т.п.). В 2008 комиссии Евросоюза был представлен научный отчет [109], в котором анализировались последствия изменения климата для природных и социально-экономических систем стран Западной Европы при различных уровнях потепления. При этом, что полученные оценки содержали большой диапазон неопределенности, на их основе была сформулирована стратегическая цель единой государственной политики европейских стран по ограничению глобального потепления уровнем не более 2 градусов по отношению к доиндустриальному. В России же до сих пор

отсутствует согласованная научная и государственная позиция по вопросу о том, каково соотношение потерь и выгод, и какой уровень потепления является приемлемым при понимании потенциальных выгод и дилеммы между затратами на адаптацию к последствиям и на ограничение изменения климата. Это существенно и не в лучшую сторону отличает Россию от Европейских стран.

В России ситуация на государственном уровне начала меняться, когда в декабре 2009 г. была принята Климатическая доктрина, а в ноябре 2011 году по поручению правительства РФ Росгидрометом при участии РАН, Всемирной метеорологической организации, Всемирного банка и других институтов, была проведена первая в России международная конференция "Проблемы адаптации к изменениям климата" (ПАИК-2011). Труды этой конференции дают исчерпывающую картину современного состояния проблемы в стране, свидетельствуя о ее высокой актуальности и наличии запросов со стороны общества, государства и бизнеса, с одной стороны, а с другой, - о глубочайшем отставании от мирового уровня. На конференции были сформулированы приоритетные задачи по устранению этого отставания, которые предусматривают трехуровневый подход, а именно, (1) детализация и уменьшение неопределенности климатических проекций для территории России, (2) изучение влияния изменения климата на природные системы и отрасли экономики с получением количественных оценок и выявлением опасных уровней воздействия, и (3) разработка стратегий адаптации к изменениям различного уровня.

До недавнего времени эти задачи, в особенности третья группа, во многом оставались декларативными по нескольким причинам. Имеющиеся в России профильные исследовательские группы разобщены не только на уровне ведомств, но и научных коллективов. Между учреждениями Росгидромета (ГГО, ГГИ, ААНИИ, ИГКЭ, ВНИИСХМ, ВНИИГМИ-МЦД) практически нет взаимодействия, как и между учреждениями РАН (ИВМ, институт физики атмосферы, институт географии, БИН) и университетами (МГУ, СПбГУ, в Томске и в Казани), где ведутся фрагментарные исследования. Вследствие этого отсутствует согласованное понимание исходных предпосылок, в частности возможностей и ограничений современных гидродинамических моделей, при помощи которых строятся климатические проекции; нет единой методической базы решения даже тех задач, которые на международном уровне уже давно отработаны; из-за специализации коллективов на отдельных видах задач и недостатке междисциплинарного опыта отсутствует комплексность в подходе и понимание того, что всегда имеет место баланс между климатообусловленными потерями и потенциальными выгодами, которые, вопреки распростра-

ненному мнению, для России могут быть ощутимы, особенно при небольших уровнях потепления.

Заметным шагом вперед стал анализ экономической составляющей изменения климата для России, который впервые был дан в монографии [47]<sup>8</sup> Ее расширенное резюме дано в публикации [48]. Эта основополагающая работа объединила усилия профессиональных климатологов и экономистов, в результате удалось сформулировать ряд важных рекомендаций по конкретным способам адаптации к изменению климата. Вместе с тем, она отчасти «опередила время», появившись до того, как были получены оценки воздействия изменений климата на весь комплекс ключевых природных и социально-экономических процессов по показателям, на основе которых выбираются меры адаптации. Притом, что такие исследования ведутся и уже получены фрагментарные результаты, до настоящего времени нет оценок соотношения потерь и потенциальных выгод, неясен вопрос о критических уровнях воздействия на различные системы и вероятности их превышения в XXI веке. Фактически это исключает возможность эффективной адаптации, общие принципы которой были сформулированы в [47].

В декабре 2015 г. на всемирной климатической конференции в Париже была подтверждена стратегическая задача ограничить рост глобальной температуры максимальной величиной 2 °С по сравнению с доиндустриальным уровнем. Это обозначило «особую точку» прогностических исследований климата и его последствий, в которых ранее традиционно рассматривались три временных интервала в первой четверти, в середине и в конце 21 века. С учетом Парижских договоренностей, вступивших в силу в 2020 г., наибольшую актуальность приобрели вопросы о том, как на региональном уровне проявится глобальное 2-х градусное потепления, и каковы будут его последствия. Последствия на территории России при реализации Парижских договоренностей остаются не изучены.

Важным вопросом при разработке национальной климатической политики является соотношение мер по адаптации и уменьшению изменения климата. Возможности адаптации имеют естественные, финансовые и социально-экономические ограничения, поэтому необходимо также снижать антропогенное воздействие на климат. Целевым показателем стало достижение «углеродной нейтральности», и несколько стран уже объявили о готовности его достичь на промежутке времени между 2050 и 2100 гг.

До недавнего времени для уменьшения воздействия на климат рассматривали лишь сокращение эмиссии парниковых газов. В этом состояла суть Киотского протокола РКИК (1997). Но из-за большого времени жизни CO<sub>2</sub>

<sup>8</sup> доступна на веб-портале, <http://voeikovmgo.ru/download/publikacii/2011/Mokryk.pdf>

в атмосфере, составляющего более 100 лет, эти меры не могут немедленно остановить увеличение его концентрации. Она будет продолжать расти пока суммарная эмиссия будет превышать суммарный сток [163]. Даже при нулевой эмиссии глобальная температура будет снижаться медленно со скоростью, определяемой временем жизни уже находящихся в атмосфере парниковых газов. В последних исследованиях было показано, что для достижения целей Парижского соглашения по ограничению роста глобальной температуры не более чем на 1,5–2,0°C недостаточно только лишь уменьшать эмиссию, необходимы меры по удалению уже находящегося в атмосфере углерода, которые получили название декарбонизация [196, 204]. Были предложены различные методы декарбонизации, но до сих пор неясен вопрос об их эффективности, в особенности на больших пространственных и временных масштабах [119, 184].

Тренды международной климатической политики нашли отражение и в России. В июне 2021 г. был принят федеральный закон об ограничении выбросов парниковых газов, разработан законопроект о вечной мерзлоте, начата разработка рекомендаций по адаптации к изменению климата в части экосистемного природопользования. Все эти действия учитывают уже имеющиеся ключевые документы стратегического социально-экономического развития территорий и текущее состояние региональных отраслей экономики. Представляет интерес, как в этих документах учтены особенности Арктики.

Проблема деградации вечной мерзлоты отражена в Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года<sup>9</sup> и Стратегии пространственного развития Российской Федерации (СПР) на период до 2025 года<sup>10</sup>, а также в Национальном Плане Мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 года<sup>11</sup>.

Показательны данные таблицы 6, составленной по данным официального сайта Минэкономразвития РФ<sup>12</sup>. Она характеризует освещенность проблемы климатических изменений и природного риска в действующих Стратегиях социально-экономического развития регионов АЗРФ до 2025 (2030 / 2035) года. Видно, что проблема изменения климата упоминается лишь вскользь, в некоторых документах игнорируется, как, например, в Ямало-Ненецком автономном

<sup>9</sup> Утверждена Указом Президента России от 26 октября 2020 г. № 645. URL: <http://docs.cntd.ru/document/566091182>, дата обращения: 30.03.2021

<sup>10</sup> Утверждена распоряжением Правительства России от 13 февраля 2019 г. № 207-р. URL: <http://static.government.ru/media/files/UVAIqUtT08o60RktoOXL22JjAe7irNxc.pdf>, дата обращения: 30.03.2021

<sup>11</sup> Утвержден распоряжением Правительства России от 25 декабря 2019 г. № 3183-р. URL: <http://static.government.ru/media/files/OTrFMr1Z1sORh5Nlx4gLUsdgGHyWIAqy.pdf>, дата обращения: 30.03.2021

<sup>12</sup> <http://economy.gov.ru/minec/activity/sections/strategterplanning/komplstplanning/stsubject/straterupdate>

округе. Лишь в некоторых отдельно взятых регионах и отраслях предполагаются конкретные механизмы адаптации к климатическим изменениям. В их числе создание научных центров по изучению глобального изменения климата на Арктических территориях, ужесточение требований к жилищному строительству с учетом угрозы оттаивания многолетней мерзлоты (Якутия); создание системы мониторинга и контроля геокриологической обстановки как мера сохранения и обеспечения безопасной эксплуатации существующего жилищного фонда (Красноярский край). Важно отметить, что в некоторых региональных стратегиях имеется более широкое видение перспектив климатических изменений. Например, в Архангельской области и Якутии говорится не только о негативных, но и о положительных последствиях, новых возможностях. Также Якутия в числе первых регионов приняла Закон об охране вечной мерзлоты в Республике Саха (Якутия) (от 22 мая 2018 года N 2006-3 N 1571-V), в котором изложены правовые основы регулирования отношений в области охраны многолетней мерзлоты в целях ее сохранения в регионе.

**Таблица 6** - Освещенность проблемы климатических изменений в Стратегиях социально-экономического развития регионов АЗРФ до 2025 (2030 / 2035) года

Регион АЗРФ	1	2	3	4	5
Архангельская область	+	+	+	+	-
Мурманская область	-	+	-	-	-
Республика Карелия	-	+	+	-	-
Республика Коми	+	+	+	+	++
Ненецкий автономный округ	+	+	-	+	-
Ямало-Ненецкий автономный округ	+	+	+	-	+
Красноярский край	+	+	+	+	+
Республика Саха (Якутия)	+	+	-	++	++
Чукотский автономный округ	+	-	-	-	-

Цифрами в таблице обозначены:

1. указание экстремальных природно-климатических условий как фактора повышения издержек / фактора ограничения возможности ведения определенных видов хозяйственной деятельности / вызова социально-экономического развития / слабая сторона в SWOT-анализе и пр.
2. защита населения региона от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера как один из приоритетов социально-экономической политики



3. наличие государственной программы по защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций (ссылка на нее в тексте стратегии)
4. обозначение проблемы климатических изменений и их вероятного влияния на социально-экономическое развитие региона (в том числе – проблема деградации многолетней мерзлоты в регионах ее распространения)
5. развитие новых научных центров, связанных с изучением климатических изменений и их последствий, адаптации населения и отраслей экономики

Как видно из таблицы 6, практически во всех стратегиях развития регионов Арктики упомянуто о суровости природно-климатических условий, в основном в контексте повышенных издержек, миграционного оттока населения, реже – ограничений для некоторых отраслей экономики (сельского хозяйства и др.), показателей здоровья населения. При этом отсутствуют численные оценки изменения климата и его влияния на индикаторы социально-экономического развития. Примеры индикаторов, требующих введения поправок на изменение климата:

- коэффициенты рождаемости и смертности (на 1 000 человек населения) – учет вероятности повышения смертности с учетом волн жары;
- жилищное хозяйство – корректировка с учетом повышения аварийности при деградации многолетней мерзлоты;
- коммунальный комплекс – корректировка с учетом изменения градусо-дней отопительного периода и его продолжительности;
- валовой региональный продукт – корректировка с учетом вероятных стихийных бедствий, обусловленных климатическими изменениями;
- показатели по виду экономической деятельности «Лесозаготовки» – в более отдаленной перспективе (после 2035) за счет смещения северной границы леса к северу и замещения менее продуктивных пород более продуктивными;
- объем и индекс производства сельскохозяйственной продукции (растениеводства и животноводства) в хозяйствах всех категорий – сокращение поголовья северных оленей из-за волн жары, эпизоотий, обусловленных оттаиванием многолетней мерзлоты (как в случае на Ямале летом 2017 г.);
- региональные и межрегиональные перевозки грузов и пассажиров внутренним водным транспортом – увеличение навигационного периода (например, по Енисею).

Проблема осложняется недостаточной методической проработкой вопроса о влиянии климатических изменений на социально-экономические параметры регионального развития. Также различаются и горизонты планирования: региональные стратегии рассчитаны на срок до 2025–2035 г., то есть на весьма долгосрочный в экономическом, но очень короткий в природно-климатическом отношении период.

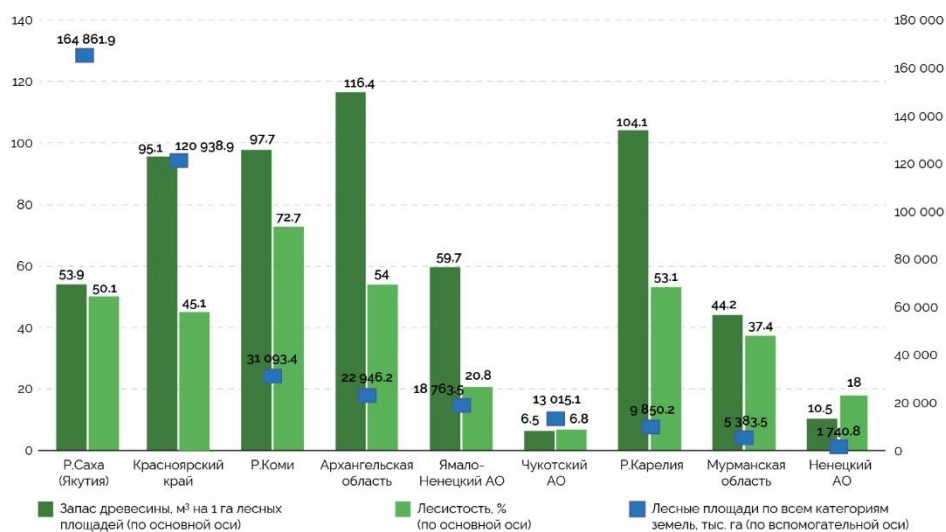
## ОСНОВНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В АРКТИКЕ ДЛЯ ЭКОНОМИКИ

Ниже приведены экономические показатели, которые нужно принимать во внимание при разработке мер адаптации, касающихся природопользования и строительства в АЗРФ.

### Последствия, обусловленные изменением растительности

Изменения растительности повлияют на отрасли экономики, в первую очередь лесное хозяйство, а также смежные отрасли промышленности, многие из которых экспортно ориентированы. Некоторые количественные показатели показаны на рисунке 23. Ключевые показатели лесопромышленного комплекса по России в целом по состоянию на 2019 г. таковы: плата в бюджетную систему Российской Федерации за использование лесов – 52,7 млрд рублей; производство продукции лесного комплекса на единицу площади эксплуатационных лесов составляет 1023 рубля за гектар; добавленная стоимость, создаваемая лесным комплексом – 697 млрд рублей (0,7 % от совокупной ВДС по всем отраслям); налоговые поступления от предприятий лесного комплекса – 134 млрд. рублей.

**Рисунок 23** – Ключевые характеристики лесных ресурсов регионов АЗРФ на начало 2020 г. (по данным ЕМИСС).



Общая площадь лесов в арктических регионах России составляет порядка 388.6 млн га. (45% от общероссийского значения). При этом свыше 70% рассматриваемых лесов приходится на Р. Саха (Якутию) и Красноярский край, значительная часть территории которых расположена в зоне сплошного распространения мерзлоты. Общий запас древесины лесных насаждений по всем категориям земель в пределах рассматриваемых регионов составляет 28.6 млрд кубических метров (35% от общероссийских запасов). По удельным запасам ввиду более мягких почвенно-климатических условий лидируют регионы европейского

сектора АЗРФ – Архангельская область и Р. Карелия, где запасы древесины на 1 га лесных площадей превышают 100 м<sup>3</sup> (среднероссийское значение показателя составляет 95 м<sup>3</sup> на 1 га). Минимальные удельные запасы характерны для Чукотского и Ненецкого автономных округов – 6.5 и 10. м<sup>3</sup> на 1 га лесных площадей соответственно. Показатель лесистости (отношению площади покрытых лесной растительностью земель к их общей площади) также максимален в европейских арктических регионах: Р. Коми (73%), Архангельской области (54%), Р. Карелии (53%) и превышает среднероссийское значение (46%).

География лесной промышленности в АЗРФ полностью соответствует показателям обеспеченности лесными ресурсами. Она представлена всеми ключевыми подотраслями: лесозаготовительной, деревообрабатывающей, целлюлозно-бумажной, лесохимической. В 2020 году в Архангельской области объем валового производства в лесоводстве и лесозаготовках составил 8.2 млрд рублей, ежегодно производится около 10 млн м<sup>3</sup> необработанной древесины, в Р. Коми – порядка 7 млн м<sup>3</sup> необработанной древесины. Обработка древесины и производство изделий из дерева, кроме мебели, производство бумаги и бумажных изделий являются отраслями специализации в регионах европейского сектора Российской Арктики. На этот вид деятельности в структуре обрабатывающей промышленности приходится 63% в Р. Карелии, 58% в Архангельской области, 47% в Р. Коми. Всего эти 3 региона концентрируют около 23% общероссийского производства. Если рассматривать только арктические территории, как показано в табл. 7, в совокупности на всей территории АЗРФ ключевыми подотраслями лесопромышленного комплекса в 2019 году было произведено товаров и услуг на сумму 50.4 млрд рублей – 4% от общероссийского показателя. В товарной структуре экспорта России в 2020 г. древесина и целлюлозно-бумажные изделия занимали 3.7% (12.4 млрд дол. США).

Предприятия крупнейших лесопромышленных компаний России локализованные в Арктических регионах: Котласский целлюлозно-бумажный комбинат в Архангельской области (Группа «Илим») – в 2019 г. прибыль до налогообложения составила 18.6 млрд рублей (налог на прибыль – главный региональный налог, формирующий собственные доходы регионального бюджета (см. п. 1 ст. 284 НК РФ)); Сыктывкарский лесопромышленный комплекс в Р. Коми (Группа «Монди») – 19.4 млрд рублей; предприятия группы компаний «Сегежа Групп» в Р. Карелии, Красноярском крае, Архангельской области – 6.8 млрд рублей по всем регионам деятельности; Архангельский ЦБК – порядка 10 млрд рублей и т.д. Помимо налоговых отчислений, инвестиций в развитие инфраструктуры и пр., данные предприятия формируют занятость десятков тысяч человек в своих регионах, поэтому

их вклад в социально-экономическое развитие арктических территорий весьма значителен.

**Таблица 7** - Отгружено товаров собственного производства, выполнено работ и услуг собственными силами (без НДС, акцизов и других аналогичных платежей) предприятиями лесопромышленного комплекса, 2019 млн рублей

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Обработка древесины и производство изделий из дерева и пробки, кроме мебели, производство изделий из соломки и материалов для плетения, в том числе:</b>									
30937	118	-	16715	31196	-	19038	-	115	19151
- Распиловка и строгание древесины:									
30035	118	-	11688	12842	-	15504	-	-	15504
- Производство изделий из дерева, пробки, соломки и материалов для плетения.									
902	-	-	5027	18354	-	3534	-	115	3647
<b>Производство бумаги и бумажных изделий, в том числе:</b>									
23	-	-	61075	64539	-	90554	15	-	31219
- Производство целлюлозы, древесной массы, бумаги и картона:									
-	-	-	54927	60743	-	7092	-	-	9523
- Производство изделий из бумаги и картона.									
23	-	-	6149	3796	-	462	5	-	696

**1** – Красноярский край; **2** – Р. Саха (Якутия); **3** – Чукотский АО; **4** – Р. Карелия; **5** – Р. Коми; **6** – Ненецкий АО; **7** – Архангельская область; **8** – Мурманская область; **9** – Ямало-Ненецкий автономный округ; **10** - сухопутные территории Арктической зоны Российской Федерации.

Создание преференциального режима в Арктической зоне РФ (Федеральный закон от 13 июля 2020 г. № 193-ФЗ «О государственной поддержке предпринимательской деятельности в Арктической зоне Российской Федерации») создает условия для развития предприятий лесопромышленного комплекса, в том числе новых. Так, с начала действия режима до 1 февраля 2021 г. из 42 зарегистрированных резидентов 3 имеют принадлежность к лесной промышленности

В Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года отмечено, что адаптация к изменениям климата является одним из основных направлений программы научных исследований по лесам. Сформулированы следующие задачи:

- повышение эффективности государственного управления лесами;
- гарантированное обеспечение экономики и общества лесными ресурсами, в том числе через интенсивное использование и воспроизводство лесов;
- повышение эффективности охраны лесов от пожаров, защиты лесов от вредных организмов и других неблагоприятных факторов, сохранение экологического потенциала лесов;

- повышение продуктивности и улучшение породного состава лесов на землях различного целевого назначения;
- обеспечение доступности существующей сырьевой базы;
- поддержка проектов развития перерабатывающих производств;
- стимулирование спроса и развитие рынков сбыта;
- обеспечение достоверной актуальной информации о лесных ресурсах в интенсивной (перспективной) зоне освоения лесов;
- формирование лесопромышленных кластеров;
- повышение научно-технического, технологического и кадрового потенциала лесного комплекса.

Фактически перечисленные мероприятия мало связаны с адаптацией к климатическим изменениям. Таким образом, можно отметить, что, если экономические механизмы развития отрасли прописаны в Стратегии достаточно подробно, то меры адаптации лесопромышленного комплекса к климатическим изменениям ограничены лишь весьма общими формулировками, как например, «мероприятия по охране, защите и воспроизводству лесов» и пр. Не указаны ключевые закономерности, связанные с климатическими изменениями (изменение продуктивности, скорости роста, возможность замены при лесовосстановлении прежних пород на более продуктивные и пр.), в том числе, неясно, были ли они учтены при прогнозировании ключевых индикаторов сценарных прогнозов, например, объемов поглощения лесами углерода, производства продукции лесного комплекса на единицу площади эксплуатационных лесов и пр. Сведения, приведенные в этом докладе, позволяют внести конкретику и могут быть использованы при корректировке данной Стратегии.

С учетом всего отмеченного выше, можно утверждать, что основной мерой адаптации лесного хозяйства к изменению климата является упреждающее лесозамещение породами деревьев, ареалы которых соответствуют прогнозируемым на середину 21 века биоклиматическим показателям. Изменение продуктивности растительности было представлено ранее в докладе на рис. 9. Дополнительную информацию дает карта на рисунке 16, показывающая территории, на которых с высокой вероятностью к середине 21 века произойдет смена биомов под влиянием изменения климата.

### **Последствия, обусловленные изменением мерзлоты**

Для разработки мер по адаптации к изменениям многолетнемерзлых грунтов важно понимать каков объем возможного ущерба. По нашим оценкам, в АЗРФ

сконцентрировано жилищного фонда на 2.8 трлн рублей (в рыночных ценах 2020 года) и зданий и сооружений ключевых отраслей экономики (сельского и лесного хозяйства, промышленности, транспорта, сектора рыночных и нерыночных услуг) на 10 трлн рублей (табл. 8). Непосредственно на многолетнемерзлых грунтах находятся здания и сооружения общей стоимостью порядка 7 трлн рублей, т.е. свыше половины всей арктической инфраструктуры.

**Таблица 8** - Расчетная стоимость зданий и сооружений в регионах АЗРФ, 2020.

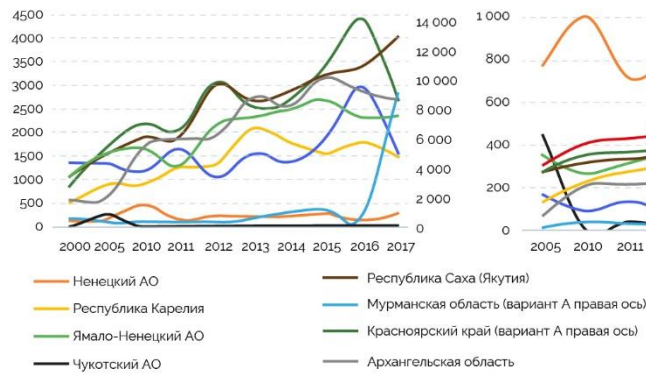
Регион АЗРФ	Жилищный фонд, млн рублей	Иные сооружения, млн рублей
Р. Коми	94 102.97	271 399
Красноярский край	136 168.4	862 264.5
Мурманская область	73 0211	1185 742
Ненецкий АО	55 548.85	533 931.8
Ямало-Ненецкий АО	782 669.9	6 540 256
Р. Саха (Якутия)	39 467.1	58 009.44
Чукотский АО	11 1097.7	90 489.6
Р. Карелия	45 857.64	52 107.41
Архангельская область	844 679.5	462 691.2
<b>Сумма</b>	<b>2 839 803</b>	<b>10 056 891</b>

**Источник:** рассчитано авторами для муниципальных образований АЗРФ

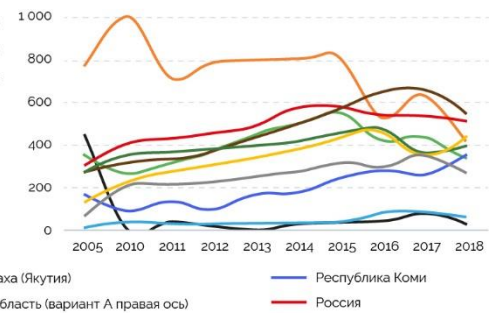
Важно отметить, что новое строительство зачастую ведется по старым СНиПам, не всегда учитываются прогнозы изменения геокриологических условий. Учитывая темпы нового строительства, показанные на рис. 24а, ущерб к середине XXI может быть еще выше. Суммарный объем зданий регионов АЗРФ составляет около 30.1 млн м<sup>3</sup>. Это 5% от суммы по всем регионам России, при этом эти регионы производят 10% суммарного ВРП страны. Максимально этот показатель в Мурманской области и Красноярском крае. На рис. 24б показан ввод в действие жилых домов на 1000 человек населения. Можно отметить картину, характерную для Арктических регионов: практически повсеместно душевой ввод жилых домов ниже среднероссийских значений за счет низкого спроса. Высокие показатели продемонстрировал Ненецкий АО за счет реализации финансируемых из бюджетов разного уровня государственных программ, связанных с развитием жилищного строительства.

**Рисунок 24**

**А.** Динамика общего строительного объема зданий (тыс. м<sup>3</sup>) по регионам АЗРФ;



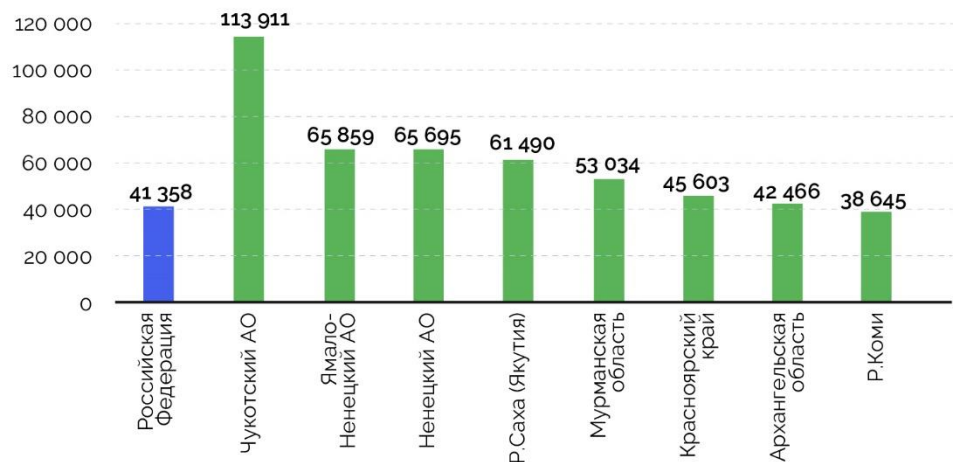
**Б.** Ввод в действие жилых домов на 1000 человек населения (м<sup>2</sup> общей площади жилых помещений)



**Источник:** составлено авторами по данным Росстата

Во всех арктических регионах, кроме Р. Коми, стоимость строительства 1 кв. метра выше среднероссийского значения (Рис. 25). Удорожание связано не только с особенностями строительства в условиях криолитозоны, но и с высокими транспортными издержками, поскольку промышленность строительных материалов на арктических территориях крайне слабо развита. В связи с этим потенциальные ущербы проявятся не только в разрушении жилого фонда, но и косвенно – в дополнительных высоких издержках на новое строительство. С другой стороны, стоимость строительства на оттаявших грунтах существенно снизится, в связи с этим, при написании адаптационных программ необходимо учитывать, до каких пределов с экономической точки зрения целесообразно сохранять мерзлоту (издержки на установку систем термостабилизации грунтов), и, напротив, при каких условиях оптимальным решением будет являться снос здания (с учетом его ликвидационной стоимости) и строительство нового, замещающего его, уже на оттаявших участках.

**Рисунок 25** - Стоимость строительства 1 кв. метра, руб., 2018 (Кузнецова, Бадина 2020)

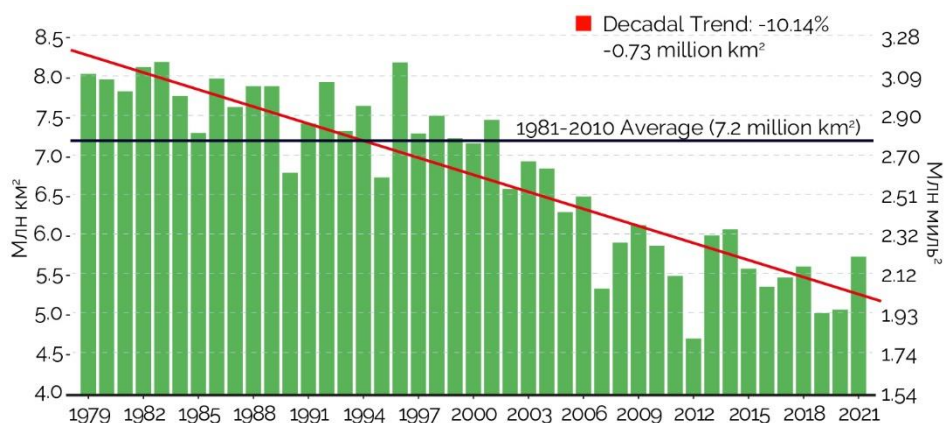




## Изменения морского льда и развитие северного морского пути

Изменения климата оказывают влияние на все элементы криосферы. На рисунке 26 показаны изменения минимальной площади морских льдов в Северном полушарии за период 1979–2021 на основе данных спутниковых измерений NOAA. Средняя скорость их сокращения составила 10.14% за 10 лет, а в период до 2014 г. в среднем  $13.3 \pm 2.8\%$  за каждые 10 лет. Часть льда тает в пределах арктического бассейна, а до 10% от общей площади выносится через пролив Фрама в Атлантику [20, 146, 205]. Помимо сокращения площади, арктический лед становится более тонким и «молодым». Значительно уменьшается доля многолетнего льда и растет доля льда, сформированного за один годовой цикл таяния/замерзания. Расчеты по моделям CMIP6 указывают на то, что при любых сценариях изменения климата морской лед в Арктике хотя бы один раз к сентябрю полностью растает [153].

**Рисунок 26** - Изменения площади морских льдов в Северном полушарии за период 1979–2021



**Источник:** по данным NOAA (<https://www.ncdc.noaa.gov/snow-and-ice/extent/>)

Если увеличение температуры и таяние мерзлоты ведет к разрушительным последствиям для инфраструктуры и экономики Российской Арктики, с изменениями морского льда связаны новые потенциальные возможности. Это прежде всего возможность более интенсивного и продолжительного использования северного морского пути (СМП, рис. 27). С ней связан целый ряд обсуждаемых сейчас масштабных проектов, от строительства новых ледоколов для сопровождения судов в сложной ледовой обстановке и создания сети береговой инфраструктуры для технического обеспечения и безопасности судоходства, до финансовых, правовых и геополитических вопросов навигации [187]. Этим проектам уделяется в настоящее время значительное внимание. Принимаемые на государственном уровне постановления, регламентирующие условия использования СМП описаны в многочисленных публикациях, анализ которых выходит за рамки данного оценочного Доклада. В контексте рассматри-

ваемых в Докладе задач наиболее важным аспектом развития СМП является экологический, связанный с интенсификацией движения судов и появлением новых для Арктики источников парниковых газов и загрязнений воды и атмосферы.

**Рисунок 27** - Маршруты транспортировки грузов между Западной Европой и Азией через Суэцкий канал (красная линия, протяженность более 23 тыс. км) и по СМП (синяя линия, более 14 тыс. км).



Развитие судоходства не должно нарушать биогеосистемную устойчивость в Арктике. Факторами риска являются эмиссии продуктов сгорания судовых двигателей, интродукция новых видов водной флоры и фауны, переносимых на корпусах судов, аварийные разливы топлива и перевозимых судами продуктов. Снизить экологические риски можно за счет применения новых видов топлива, технологического совершенствования конструкций и оборудования, обеспечивающих пониженное воздействие на окружающую среду.

Требования к качеству топлива и объему выбросов постоянно ужесточаются для всех видов транспорта. Морской транспорт долго оставался в относительно комфортной зоне, но с 1 января 2020 г вступили в силу требования по снижению содержанию серы с 3.5% до 0.5% в любых видах судового топлива. В период до 2050 года ожидается введение в действие дополнительных ограничений по выбросам и требований к качеству топлив для судоходства.

В контексте этих перемен важно, что сама Арктика может выступить в качестве поставщика перспективных низкоуглеродных и безуглеродных энергоносителей, таких как сжиженный природный газ (СПГ), метанол, аммиак, водород. Доступность и экологичность альтернативных видов топлива в сочетании с более коротким расстоянием между Азией и Европой являются факторами, обеспечивающими долгосрочную привлекательность СМП для судоходных компаний и владельцев грузов.

Преимуществом СМП по сравнению с традиционным маршрутом перевозки из Европы в Азию через Суэцкий канал является уменьшение углеродного следа. Использование СМП снижает выбросы парниковых газов при торговле между Китаем, Японией, Кореей и ЕС на 23 %, при использовании СПГ – на 38 %, при использовании безуглеродного аммиака, водорода или атомного флота – на 100 % (Таблица 9).

**Таблица 9** - Сравнение углеродного следа для грузоперевозок по Суэцкому каналу и СМП

		миль	Выбросы CO <sub>2</sub> , млн.т
Шанхай Роттердам	Суэцкий канал	10486	22,3
	СМП	8087	17,2
Объем перевозок, млн.т			150
Эмиссия CO <sub>2</sub> , г/т миль			14,2
сокращение маршрута		%	23%
		млн.т	5,1
Сокращение выбросов	использование СПГ плюс к сокращению для маршрута	%	15% (+ 23 %)
		млн.т	3,4 (+ 5,1)
использование атомного флота и аммиака		%	100%
		млн.т	22,3

Развитие СМП потребует значительных инвестиций в инфраструктурные проекты, главными объектами которых являются ледокольный флот, связь и коммуникации, аварийно-спасательные средства, гидрометеорологическое сопровождение, порты, транспортно-логистические и бункеровочные центры.

При переоборудовании флота большую роль будет играть развитие инфраструктуры хранения (бункеровки) и поставки альтернативных видов топлива. В настоящее время в Арктике можно обеспечить поставки только СПГ с крупных арктических проектов «НОВАТЭКа». В качестве потенциальных поставщиков могут выступать предполагаемые СПГ проекты в Архангельске и Дудинке. Фактором, ограничивающим применение альтернативных видов топлива, является инфраструктура бункеровки судов. При строительстве СПГ завода в Дудинке бункеровка может осуществляться с использованием береговой системы хранения или автомобильных цистерн. Аналогичная схема бункеровки может применяться в Архангельске. Ожидается, что бункеровочная инфраструктура для СПГ будет создаваться в Сабетте для заправки ледоколов на СПГ ЛК-40. Бункеровочный центр может быть создан на терминале в Мурманске. Можно ожидать, что в ближайшие 10 лет СПГ как топливо будет доступен на всем протяжении морских маршрутов Западного сектора Арктики.

При любом сценарии изменения климата на протяжении большей части года на акватории СМП будут присутствовать дрейфующие льды. Сохранится опасность сильных ледовых сжатий, и по-прежнему будут затруднять плавание тяжелые торосистые льды в холодный период года. Таким образом, в течение многих десятилетий для обеспечения проводки судов по арктическим морям будет необходим ледокольный флот. На АО «Балтийский завод» осуществляется одновременное строительство трех ледоколов проекта 22220: «Арктика», «Сибирь», «Урал». Но полноценная навигация по СМП станет возможна только после строительства трехатомных ледоколов «Лидер».

Концепция развития СМП заключается в реализации комплексного проекта с международным статусом, одна из целей которого состоит в том, чтобы сделать маршрут конкурентоспособным с точки зрения мировой глобальной логистики. Сейчас стоимость программы развития Северного морского пути оценивается в 734,9 млрд рублей до 2024 года. В этой сумме 274 млрд рублей бюджетных средств. Остальное – инвестиции «Росатома» и недропользователей – НОВАТЭКа, «Роснефти» и т. д. Согласно оценкам экспертов KPMG, вклад Северного морского пути в ВВП России составит до 2% в год (к 2050 году), а выигрыш для бюджета – 4,4 трлн рублей от налоговых поступлений и увеличения дивидендов.

Распоряжением Правительства Российской Федерации № 3120-р от 21 декабря 2019 года утвержден план развития инфраструктуры СМП до 2035 года. В него включены мероприятия по подготовке кадров, обеспечению медицинской помощи и медицинской эвакуации, навигационно-гидрографическому обеспечению навигации. Они позволяют сформировать эффективное судоходство и навигацию во все сезоны. План предусматривает развитие российского судостроения для обеспечения круглогодичного судоходства, включая строительство судов различных типов и назначения (аварийно-спасательный и вспомогательный флот, гидрографические суда, контейнеровозы, грузовые суда), в том числе использующих СПГ в качестве топлива.

Мероприятия по стимулированию транзитного грузопотока включают в себя развитие портов-хабов за пределами СМП: порты Мурманск (или Архангельск) и Петропавловск-Камчатский, обоснование создания контейнерного оператора, который, по замыслу, будет обеспечивать не только транзит, но и мультимодальные перевозки для внутренних нужд.

К 2035 году правительство и дирекция СМП (ГК «Росатом») планируют создать так называемый Северный морской транзитный коридор (СМТК), в который, помимо портов СМП, войдут еще порты Мурманск, Архангельск, Онега, Кандалакша –

на западе и Петропавловск-Камчатский – на востоке. Данный проект предполагает создание регулярной контейнерной линии между Мурманском и Петропавловском-Камчатским, до которых из Европы и Азии грузы будут доставляться фидерными судами, там консолидироваться на отечественных контейнеровозах и доставляться под гарантии государства. Стоит отметить, что данные порты находятся в относительно благоприятном климатическом поясе и не подвержены затоплению и эрозии почвы ввиду таяния вечной мерзлоты.

Порты проекта СМП можно условно разделить на три группы. К первой относятся порты Мурманск, Архангельск, Витино и Кандалакша, имеющие железнодорожные подходы, связанные с транспортной системой страны, порты с инфраструктурой по перевалке грузов. Ко второй – порты, обслуживающие потребности компании ПАО «Новатэк». Это Варандей, Сабетта и Дудинка. К третьей группе относятся порты, которые расположены в местностях, где отсутствуют сухопутные коммуникации. Они в настоящее время обеспечивают перевалку грузов для обеспечения жизнедеятельности населенных пунктов и ближайших окрестностей. Их пропускная способность используется на 5-50 %, и предпосылок для увеличения грузовой базы и роста грузооборота нет.

**Таблица 10** - Изменение роли арктических портов

	до 2024	до 2035
<b>1 группа</b>	Мурманск, Архангельск, Витино, Кандалакша	Мурманск, Архангельск, Витино, Кандалакша, Сабетта, Индига, Провидения
<b>2 группа</b>	Варандей, Сабетта, Дудинка	Варандей, Дудинка, Диксон (включая терминал Чайка и бухта Север), Хатанга, Певек
<b>3 группа</b>	Онега, Мезень, Нарьян-Мар, Амдерма, Диксон, Игарка, Хатанга, Тикси, Певек, Провидения	Онега, Мезень, Нарьян-Мар, Амдерма, Игарка, Тикси

В таблице 10 показаны прогнозируемые к 2035 г. перераспределения портов по группам. Эти изменения связаны с развитием новых проектов и их определяющей ролью в деятельности отдельных портов, например, Баимская для Певека и Томтор для Хатанги, а также с реализацией схем комбинированной поставки продукции на суда ледового класса с перевалкой на суда конвенционального класса с целью снижения логистических затрат.

## РЕКОМЕНДУЕМЫЕ МЕРЫ ПО АДАПТАЦИИ К ИЗМЕНЕНИЮ КЛИМАТА В АРКТИКЕ

Ранее в докладе были даны перспективные оценки рисков для инфраструктуры, обусловленные таянием многолетнемерзлых грунтов (геокриологические риски). Эти данные позволяют дифференцировать риски по Федеральным округам (ФО). Максимальный уровень геокриологического риска характерен для северо-восточной части Северо-Западного ФО, южной и северо-западной части Уральского ФО, северо-восточной части Дальневосточного ФО, юга Сибирского ФО. Более детализированный анализ использует два критерия, - индекс геокриологического риска, характеризующий деструктивные процессы, связанные с просадкой грунта и термокарстом, и относительные изменения несущей способности многолетнемерзлых грунтов, определяющие устойчивость свайных фундаментов. Расчеты их изменения к середине 21 века по отношению к базовому периоду 2004-2013 проводились по ансамблевой климатической проекции CMIP6, оценивались средние, минимальные и максимальные по ансамблю результаты.

**Северо-Западный ФО** (регионы АЗРФ, Северо-восточная часть Мурманской области, Мезенский район и Новая Земля Архангельской области, Ненецкий АО, северо-восточная часть Р. Коми). Индекс риска варьирует от низкого и очень низкого в западной части криолитозоны ФО, до повышенного и высокого в восточной части. Уменьшение несущей способности на 80-100% по максимальному сценарию; 60-80% по среднему сценарию; 0-40% по минимальному сценарию

**Уральский ФО** (Ямало-Ненецкий АО, северная часть Ханты-Мансийского АО). Индекс риска от низкого и очень низкого в северо-восточной и центральной частях криолитозоны ФО, до повышенного и высокого в южной и северо-западной частях. Уменьшение несущей способности на 80-100% по максимальному сценарию; 60-80% по среднему сценарию; 0-40% по минимальному сценарию

**Сибирский ФО** (Красноярский край, Р. Алтай, южная часть Кемеровской области и Р. Хакасии, Р. Тува и Алтай, Иркутская обл.). Практически во всех регионах криолитозоны ФО присутствуют ареалы всего диапазона индекса риска, от очень низкого до высокого. Уменьшение несущей способности на севере 60-100% по максимальному сценарию; 40-80% по среднему сценарию; 20-60% по минимальному сценарию. На юге 40-100% по максимальному сценарию; 20-80% по среднему сценарию; 0-40% по минимальному сценарию.

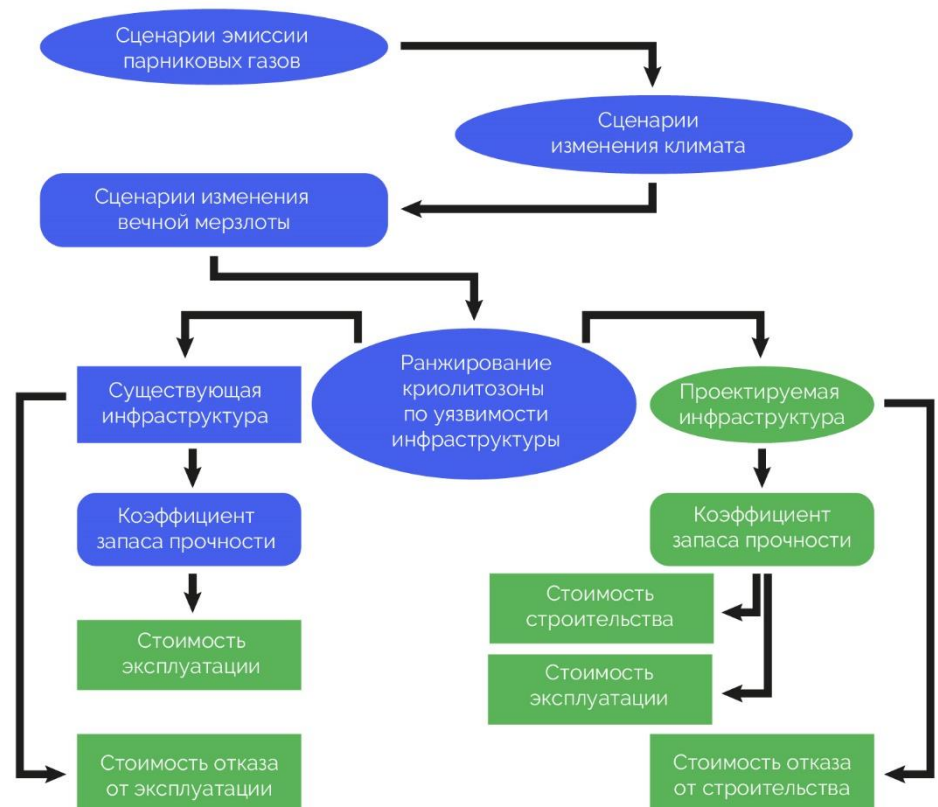
**Дальневосточный ФО** (Р. Бурятия, Забайкальский край, Амурская обл., Р. Якутия, Хабаровский край, Магаданская обл., Чукотский АО, Камчатский край). В северных территориях ФО,

входящих в состав АЗРФ, уровень риска выше среднего. Высокий риск характерен также для центральных районов Якутии и Забайкальского края. Территория, прилегающая к побережью Тихого океана, отличается низким уровнем риска. Уменьшение несущей способности на 40–100% по максимальному сценарию; 40–80% по среднему сценарию; 0–60% по минимальному сценарию.

Рисунок 28 иллюстрирует разработанную нами схему принятия решений по мерам адаптации инфраструктуры к таянию ММГ. Элементы, заключенные в закругленные фигуры, содержат неопределенности. К таковым относятся:

- сценарии эмиссии парниковых газов, поскольку они во многом зависят от будущего мировой экономики и политики в отношении ограничения антропогенного воздействия на климат;
- сценарии изменения климата, большие неопределенности связаны с ограниченной точностью используемых для их построения климатических моделей;
- ранжирование криолитозоны по степени уязвимости при таянии вечной мерзлоты, поскольку нет единого критерия для оценки такого рода рисков;
- проектируемая (еще не построенная) инфраструктура, поскольку конкретные решения зависят от меняющихся условий.

**Рисунок 28** - Схема принятия адаптационных решений на основе оценки экономического ущерба от таяния вечной мерзлоты



Неопределенность связана также со сценариями изменения многолетнемерзлых грунтов, которые при заданных условиях зависят от выбора модели, и с коэффициентом запаса прочности каждого конкретного сооружения, который выбирается на этапе его проектирования и определяет способность конструкции сохранить свою целостность при изменении условий внешней среды. Заметим, что в строительной практике этот коэффициент для большинства ординарных сооружений принимают равным 1.4, т.е., упрощая ситуацию, можно сказать, что фундамент должен выдержать нагрузку, на 40% превышающую фактический вес объекта. Остальные элементы, заключенные в прямоугольники, полностью предсказуемы и их параметры могут быть определены расчетами по существующим методикам. Например, стоимость нового строительства полностью определяется проектной сметой и в достаточной степени предсказуема.

На рисунке 28 салатовым цветом обозначены элементы, на которые изменение вечной мерзлоты оказывает непосредственное влияние и которые могут быть модифицированы, в том числе и с учетом величины этого влияния. Все остальные элементы либо не испытывают такого влияния, либо не могут быть изменены, и по этой причине их можно исключить из анализа. Следует пояснить, что элементы «Существующая инфраструктура» и заложенный в ней «коэффициент запаса прочности» исключены, поскольку все их свойства уже predeterminedены, а возможность их модификации с целью адаптации к изменениям вечной мерзлоты неявно учтена в элементе схемы «Стоимость эксплуатации».

Таким образом, для принятия решений о мерах адаптации на основе баланса рисков и потенциальных выгод, обусловленных таянием вечной мерзлоты, формируются две независимые линии. Одна из них связана с существующей инфраструктурой и содержит лишь два элемента:

- стоимость эксплуатации конкретного объекта, которая включает также и цену его преобразования, например усиления фундамента сооружения с тем, чтобы он мог выдержать вес объекта при ослаблении несущей способности вечной мерзлоты;
- стоимость отказа от эксплуатации объекта, т.е. совокупные потери, которые возникнут в случае, если данный объект перестанет существовать и выполнять свои функции.

Вторая линия связана с еще не построенной инфраструктурой и, кроме вышеуказанных, содержит еще два элемента:



- коэффициент запаса прочности, увеличивая который можно строить объекты, которые будут сохранять стабильность даже в районах с относительно «слабой» мерзлотой. Например, увеличение вдвое числа свай фундаментов или увеличение длины их части, погруженной в мерзлоту, при том же расчетном весе конструкции вдвое уменьшает нагрузку на каждую из них, в результате фундамент сможет выполнять свои функции при более высоких температурах грунта;
- стоимость строительства объекта, которая помимо прочих факторов определяется также и величиной коэффициента запаса прочности.

Представленную на рисунке 26 схему можно применять как к отдельным элементам инфраструктуры, т.е. жилой дом, взлетно-посадочная полоса аэропорта, трубопровод и т.п., так и к локализованным группам функционально связанных объектов, таким, как населенный пункт. В анализе важно принимать во внимание, что помимо принятия решения о строительстве нового объекта (или реконструкции существующего), всегда имеется альтернативная возможность отказа от строительства (ликвидации существующего) объекта, при том, что выполняемые им функции либо прекращаются, либо передаются другим аналогичным объектам. Обоснованный выбор состоит в сравнении стоимости реализации прямого и альтернативного решения.

Особую группу составляют сооружения, выполняющие уникальные функции, наличие которых абсолютно необходимо, невзирая на экономическую сторону вопроса. К сооружениям такого рода, построенным на мерзлоте, можно отнести Билибинскую атомную электростанцию, Вилюйский, Усть-Хантайский, Усть-Среднеканский, Колымский, Курейский (вблизи Туруханска), Зейский, Эвенкийский (Нижняя Тунгуска) и Мамаканский (первый построенный на мерзлоте) гидротехнические узлы, построенный в 2009 году в крайне сложных мерзлотных условиях мост через реку Юрибей и проектируемый в настоящее время мост через реку Лена вблизи Якутска. К этой категории относятся и линейные объекты федеральной транспортной сети (автомобильные и железные дороги). По гидротехническим сооружениям имеется обширная литература, обзор которой показывает, что при относительно малом их количестве в криолитозоне, на них приходится 48% всех аварий. Основной причиной аварий является неучет криогенных процессов в теле плотин, их основаниях и в районах примыкания. Надо отметить, что до настоящего времени не климат, а собственно строительство сооружений оказывало влияние на изменения мерзлоты. При том, что в ближайшие десятилетия климатическая составляющая таких изменений, согласно прогнозам, будет заметно увеличивать-

ся, следует ожидать увеличения аварийности. В условиях, когда отсутствуют альтернативы существующим сооружениям, следует предусмотреть увеличение эксплуатационных расходов, включив в них стоимость дополнительных мероприятий по предупреждению аварийных ситуаций. При этом дать какую-либо объективную экономическую оценку дополнительных расходов, связанных с единственным выделенным фактором, например, с таянием мерзлоты, невозможно, поскольку указанные сооружения уникальны, заведомо сложны в эксплуатации, с одной стороны, а с другой – несмотря на все это отдача от них превышает и еще долго будет превышать затраты на их содержание.

К этой группе относятся и проекты нового строительства с безальтернативным использованием неустойчивой мерзлоты, часто характеризующейся высоким содержанием льда, засоленностью грунтов и наличием **криопегов**, несущая способность которой минимальна. Так обстоит дело со многими сооружениями нефтегазовой отрасли. В частности, это относится к инженерным сооружениям вдоль газопровода «Бованенково-Ухта», при проектировании которых принималась во внимание не только крайне низкая несущая способность мерзлоты вдоль многих участков трассы, но и прогнозируемые изменения климата. Проект, разработка которого была закончена коллективом ОАО «ВНИПИГаздобыча» в 2008 г., предусматривал различные варианты строительства, в том числе с применением термосифонов [72]. Была рассчитана стоимость нулевого цикла строительства с учетом термостабилизации грунтов и установки термосифонов для гипотетического сценария изменения климата, предусматривающего увеличение температуры воздуха во все месяцы года на 2 °С за 40 лет. По этим расчетам удельные затраты для стандартных свайных фундаментов с проветриваемым подпольем в расчете на 1 м<sup>2</sup> застройки дополнительно возрастают на 3–20 тысяч рублей в зависимости от числа устанавливаемых термосифонов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Природным и социально-экономическим системам Арктики присуща изменчивость, их состояние всегда меняется, и это не подлежит сомнению. Содержательными вопросами являются следующие:

- как велико изменение в системе за данный промежуток времени,
- с какой определенностью оно известно,
- какая его часть может быть связана с изменением климата, а какая – с другими факторами,
- в какой степени изменения можно предсказать,
- какие возможны меры адаптации для того, чтобы минимизировать риски и использовать потенциальные выгоды.

В докладе эти вопросы были рассмотрены применительно к проблеме воздействия изменения климата на природные, хозяйственные и экономические системы АЗРФ и на них, по крайней мере частично, были даны ответы. Выводы доклада согласуются с позицией, высказываемой многими специалистами по проблеме климата, которая заключается в следующем.

Изменения климата, уже произошедшие на территории АЗРФ, заметно затронули природные и хозяйственные системы. Отмечены и позитивные, и негативные последствия, при этом катастрофических последствий, обусловленных изменением климатических факторов, до настоящего времени отмечено не было. В первой половине XXI века также ожидается, что изменения климата не будут лимитирующим фактором для устойчивого экономического развития АЗРФ. Однако разработка ответных стратегий адаптации для ряда регионов, систем и секторов необходима и должна стать приоритетной государственной задачей.

В настоящее время парадигма «рискового мышления» при оценке последствий изменения климата становится общепринятой нормой. Риск всегда носит априорный, прогностический характер, вследствие чего оценка риска не может быть точной. В настоящее время не существует единой теории риска и общепринятой терминологии. Принципиальная разница в подходах к оценке риска состоит в трактовке риска либо как детерминированной величины (чаще всего, ожидаемого ущерба), либо как случайной величины (вероятностного распределения степени вреда/ущерба). Вероятностный подход к оценке риска наилучшим образом обеспечивает реалистичность оценок, которые недостижимы для детерминированных методов. Он также позволяет учесть кумулятивный эффект множественных источников неопределенности. Однако применение

вероятностного подхода требует дополнительных знаний и данных.

Разработать стратегию адаптации инфраструктуры в условиях изменения климата и многолетнемерзлых грунтов можно при условии, что имеются экономическая мотивация и методы для количественного прогноза геокриологических рисков. Такие методы и полученные с их помощью результаты были приведены в докладе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Анисимов О.А. Вероятностно-статистическое моделирование мощности сезонно-талого слоя в условиях современного и будущего климата // Криосфера Земли. 2009, Т.VIII, № 3, с.36-44.
2. Анисимов О.А. Основные природные и социально-экономические последствия изменения климата в районах распространения многолетнемерзлых пород: прогноз на основе синтеза наблюдений и моделирования. Москва: Гринпис, 2010, 44 с.
3. Анисимов О.А., Анохин Ю.А., Лавров С.А., Малкова Г.В., Павлов А.В., Романовский В.Е., Стрелецкий Д.А., Холодов А.Л., Шикломанов Н.И. Континентальная многолетняя мерзлота / Методы изучения последствий изменений климата для природных систем. С.М. Семенов. М. изд. ВНИИГМИ, 2012а. 268-328 с.
4. Анисимов О.А., Белолуцкая М.А. Оценка влияния изменения климата и деградации вечной мерзлоты на инфраструктуру в северных регионах России // Метеорология и гидрология. 2002, № 6, с.15-22.
5. Анисимов О.А., Борзенкова И.И., Жильцова Е.Л., Захарова О.К., Кокорев В.А., Ренева С.А., Стрельченко Ю.Г. Гидрометеорологические условия Волжского региона и современные изменения климата // Метеорология и гидрология. 2011а, № 5, с.33-42.
6. Анисимов О.А., Борзенкова И.И., Лавров С.А., Стрельченко Ю.Г. Современная динамика подводной мерзлоты и эмиссия метана на шельфе морей Восточной Арктики в контексте прошлых и будущих изменений климата. // Лед и Снег. 2012b, Т.118, № 2, с.97-105.
7. 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. С.М. Семенов, В.М. Катцов. Москва, 2014а, 246 с.
8. Анисимов О.А., Жильцова Е.Л., Разживин В.Ю. Моделирование биопродуктивности в арктической зоне России с использованием спутниковых наблюдений // Исследования Земли из Космоса. 2015а, № 3, с.60-70.
9. Анисимов О.А., Жильцова Е.Л., Ренева С.А. Оценка критических уровней воздействия изменения климата на природные экосистемы суши на территории России // Метеорология и гидрология. 2011b, № 11, с.31-42.
10. Анисимов О.А., Жильцова Е.Л., Шаповалова К.О., Ершова А.А. Анализ индикаторов изменения климата. Часть 2. Северо-Западный регион // Метеорология и гидрология. 2020а, № 1, с.23-35.

11. Анисимов О.А., Забойкина Ю.Г., Кокорев В.А., Юрганов Л.Н. Возможные причины эмиссии метана на шельфе морей Восточной Арктики // Лед и Снег. 2014b, Т.54, № 2, с.69-81.
12. Анисимов О.А., Зимов С.А., Володин Е.М., Лавров С.А. Эмиссия метана в криолитозоне России и оценка ее воздействия на глобальный климат // Метеорология и гидрология. 2020b, № 5, с.131-143.
13. Анисимов О.А., Кокорев В.А. Об оптимальном выборе гидродинамических моделей для оценки влияния изменений климата на криосферу. // Лед и Снег. 2013, Т.121, № 1, с.83-92.
14. Анисимов О.А., Кокорев В.А. Сравнительный анализ наземных, морских и спутниковых измерений метана в нижней атмосфере российской части Арктики в условиях изменения климата // Исследования Земли из Космоса. 2015b, № 2, с.20-33.
15. Анисимов О.А., Кокорев В.А. Климат в арктической зоне России: анализ современных изменений и модельные проекции на XXI век // Вестник МГУ. 2016a, № 1, с.61-69.
16. Анисимов О.А., Кокорев В.А. Моделирование мощности сезонноталого слоя с учетом изменений климата и растительности: прогноз на середину XXI века и анализ неопределенностей // Криосфера Земли. 2017, Т.21, № 2, с.3-10.
17. Анисимов О.А., Лавров С.А. Глобальное потепление и таяние вечной мерзлоты: оценка рисков для производственных объектов ТЭК // Технологии ТЭК. 2004, № 3, с.78-83.
18. Анисимов О.А., Лавров С.А., Жирков А.Ф., Каверин Д.А. Модельная ассимиляция и реанализ геокриологических данных: постановка задачи и валидация модели для Европейского Севера и Восточной Сибири // Метеорология и гидрология. 2020c, № 4, с.85-94.
19. Анисимов О.А., Стрелецкий Д.А. Геокриологические риски при таянии многолетнемерзлых грунтов // Арктика XXI век. Естественные науки. 2015c, № 2(3), с.60-74.
20. Анисимов О.А., Шерстюков А.Б. Оценка роли природно-климатических факторов в изменениях криолитозоны России // Криосфера Земли. 2016b, Т.20, № 2, с.90-99.
21. Бедрицкий А.И., Блинов В.Г., Гершинкова Д.А., Голицин Г.С., Дымников В.П., Израэль Ю.А., Катцов В.М., Котляков В.М., Мелешко В.П., Осипов В.И., Семенов С.М., ред. (2008). Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том 1. Изменения климата. Москва, Росгидромет.

22. Бекряев Р.В. Дискриминация климатических моделей. Вероятностный подход. / Труды главной геофизической обсерватории. В.М. Катцов, В.П. Мелешко. С.Петербург, 2010, 561. 47-67 с.
23. Белоновская Е.А., Тишков А.А., Вайсфельд М.А., Глазов П.М., Кренкемл А.Н., Морозова О.В., Покровская И.В., Царевская Н.Г., Тертицкий Г.М. "Позеленение" российской Арктики и современные тренды изменения ее биоты // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2016, № 3, с.28-39.
24. Борзенкова И.И. История оледенения Арктического бассейна: взгляд из прошлого для оценки возможных изменений в будущем // Лёд и Снег. 2016, Т.56, № 2, с.221-234.
25. Брыксина Н.А., Полищук Ю.М. Анализ изменения численности термокарстовых озер в зоне многолетней мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков // Криосфера Земли. 2015, Т.19, № 2, с.114-120.
26. Величко А.А., Ed. (2010). Климаты и ландшафты Северной Евразии в условиях глобального потепления. Ретроспективный анализ и сценарий. Москва, ГЕОС.
27. Володин Е.М. Влияние источников метана в высоких широтах Северного Полушария на межполушарную асимметрию его концентрации в атмосфере и климат // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2015, Т.51, № 3, с.287-295.
28. Володин Е.М., Дианский Н.А. Моделирование изменений климата в 20-22 столетиях с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана // Изв. РАН. Физика Атмосферы и Океана. 2006, Т.42, № 3, с.291-306.
29. Володин Е.М., Дианский Н.А., Гусев А.В. Воспроизведение современного климата с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана INMCM 4.0 // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2010, Т.46, № 4, с.448-466.
30. Володин Е.М., Дианский Н.А., Гусев А.В. Воспроизведение и прогноз климатических изменений в XIX-XXI веках с помощью модели земной климатической системы ИВМ РАН // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2013, Т.49, № 4, с.379-400.
31. Генихович Е.Л., Павлова Т.В., Катцов В.М. О комплексировании климатических моделей. / Труды главной геофизической обсерватории. В.М. Катцов, В.П. Мелешко. С.Петербург, 2010, 561. 28-46 с.
32. Говоркова В.А., Катцов В.М., Мелешко В.П., Павлова Т.В., Школьник И.М. Оценка пригодности моделей общей циркуляции атмосферы и океана CMIP3 для расчетов

- будущих изменений климата России // Метеорология и гидрология. 2008, № 8, с.5-20.
33. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Оценка предстоящих изменений климата на территории Российской Федерации // Метеорология и гидрология. 2009, № 11, с.5-29.
  34. Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Аристова Л.Н., Клещенко Л.К. О неопределенности некоторых сценарных климатических прогнозов температуры воздуха и осадков на территории России // Метеорология и гидрология. 2006, № 10, с.5-23.
  35. Денисов С.Н., Аржанов М.М., Елисеев А.В., Мохов И.И. Оценка отклика субаквальных залежей метангидратов на возможные изменения климата в XXI веке // Доклады Академии Наук. 2011, Т.441, № 5, с.1-4.
  36. Денисов С.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И. Изменения климата в глобальной модели ИФА РАН с учетом взаимодействия с метановым циклом при антропогенных сценариях семейства RCP // Метеорология и гидрология. 2013, № 11, с.30-41.
  37. Десяткин Р.В. Изменение климата и динамика мерзлотных экосистем центра материковой криолитозоны северного полушария // Вестник Российской академии наук. 2018, Т.88, № 12, с.1113-1121.
  38. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. Москва: Росгидромет, 2021. 104 с..
  39. Дымников В.П., Лыкосов В.Н., Володин Е.М., Галин В.Я., Глазунов А.В., Грицун А.С., Дианский Н.А., Толстых М.А., Чавро А.И. Моделирование климата и его изменений / Современные проблемы вычислительной математики и математического моделирования. М.: Наука, 2005, 173 с.
  40. Елсаков В.В. Материалы спутниковых съемок в анализе значений хлорофилльного индекса тундровых фитоценозов // Исследования Земли из космоса. 2013, № 1, с.60-70.
  41. Жильцова Е.Л., Анисимов О.А. Эмпирико-статистическое моделирование растительной зональности в условиях изменения климата на территории России / Проблемы экологического моделирования и мониторинга экосистем. Ю.А. Израэль. М.: "Планета", 2013, 25. 360-374 с.
  42. Жильцова Е.Л., Анисимов О.А. Динамика растительности Северной Евразии: анализ современных наблюдений и прогноз на 21 век // Арктика XXI век. Естественные науки. 2015, № 2(3), с.48-59.
  43. Каверин Д.А., Кулюгина Е.Е., Шахтарова О.В., Щанов В.М. Влияние растительного покрова на глубину сезонного протаивания в тундровых почвах предгорных ландшафтов кряжа Пай-Хой (юго-запад Югорского полуострова) // Криосфера Земли. 2016, Т.20, № 4, с.69-78.



44. Каверин Д.А., Пастухов А.В., Мажитова Г.Г. Температурный режим тундровых почв и подстилающих многолетнемерзлых пород (европейский Северо-Восток России) // Криосфера Земли. 2014, Т.18, № 3, с.23-32.
45. Каверин Д.А., Пастухов А.В., Новаковский А.Б. Динамика глубины сезонного протаивания тундровых мерзлотных почв (на примере площадки циркумполярного мониторинга деятельного слоя в Европейской России) // Криосфера Земли. 2017, Т.21, № 6, с.35-44.
46. Катцов В.М., Павлова Т.В. Ожидаемые изменения приземной температуры воздуха в Арктике в 21-м веке: результаты расчетов с помощью ансамблей глобальных климатических моделей (CMIP5 и CMIP3) // Труды ГГО. 2015, № 579, с.7-21.
47. Катцов В.М., Порфирьев Б.Н., Eds. (2011a). Оценка макроэкономических последствий изменений климата на территории Российской Федерации на период до 2030 г. и дальнейшую перспективу. Москва, ООО РИФ "Д'АРТ".
48. Катцов В.М., Порфирьев Б.Н. Оценка макроэкономических последствий изменений климата на территории Российской Федерации на период до 2030 г. и дальнейшую перспективу (резюме доклада) / Труды главной геофизической обсерватории. В.М. Катцов, В.П. Мелешко. С.Петербург, 2011b, 563. 7-59 с.
49. Катцов В.М., Семенов С.М. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. Москва: ФГБУ "НИЦ "Планета", 2014, 58 с.
50. Кокорев В.А., Анисимов О.А. Построение оптимизированной ансамблевой климатической проекции для оценки последствий изменений климата на территории России / Проблемы экологического моделирования и мониторинга экосистем. Ю.А. Израэль. М.: "Планета", 2013, 25. 131-153 с.
51. Кокорев В.А., Шерстюков А.Б. О метеорологических данных для изучения современных и будущих изменений климата на территории России // Арктика XXI век. Естественные науки. 2015, № 2(3), с.5-23.
52. Кравцова В.И., Лошкарева А.Р. Исследование северной границы леса по космическим снимкам разного разрешения // Вестник МГУ, сер. Геогр. 2010, № 6, с.49-57.
53. Лавров С.А., Анисимов О.А. Моделирование гидротермического режима грунтов: описание физически полной динамической модели и сравнение расчетов с наблюдениями / Проблемы экологического моделирования и мониторинга экосистем. Ю.А. Израэль. М.: "Планета", 2011, 24. 241-255 с.

54. Лексин В.Н., Порфирьев Б.Н. Российская Арктика: логика и парадоксы перемен // Проблемы прогнозирования. 2019, Т.30, № 6(177), с.4-21.
55. Максимов Т.Х., Долман А.Й., Мурс Э.Й., Ота Т., Сугимото А., Иванов Б.И. Параметры круговоротов углерода и воды в лесных экосистемах криолитозоны // Доклады РАН. 2005а, Т.408, № 8, с.684–686.
56. Максимов Т.Х., Максимов А.П., Кононов А.В., Долман А.Й., Сугимото А., Мурс Э.Й., ван дер Молен М.К., Иванов Б.И. Эколого-физиологические особенности фотосинтеза лиственницы *Larix sibirica* в условиях многолетней мерзлоты Якутии // Лесоведение. 2005b, № 6, с.3-10.
57. Матвеева Н.В., Заноха Л.Л. Изменения во флоре сосудистых растений в окрестностях пос. Диксон (Западный Таймыр) с 1980 г. по 2012 г. // Ботанический журнал. 2017а, Т.102, № 6, с.812-846.
58. Матвеева Н.В., Заноха Л.Л. Изменения во флоре сосудистых растений в окрестностях пос. Диксон (Западный Таймыр) с 1980 по 2012 г. // Ботанический журнал. 2017b, Т.102, № 6, с.812-846.
59. Мелешко В.П., Говоркова В.А. Успешность расчета современного регионального климата с помощью ансамбля моделей CMIP3 и CMIP5 // Труды ГГО. 2013, № 568, с.26—50.
60. Мелешко В.П., Катцов В.М., Байдин А.В., Павлова Т.В., Говоркова В.А. Ожидаемые изменения гидрологического режима в Северной Евразии в результате исчезновения многолетнего морского льда в Арктике // Метеорология и гидрология. 2016, № 11, с.5-21.
61. Мелешко В.П., Катцов В.М., Говоркова В.А., Спорышев П.В., Школьник И.М., Шнееров Б.Е. Климат России в XXI веке. Часть 3. Будущие изменения климата, рассчитанные с помощью ансамбля моделей общей циркуляции атмосферы и океана CMIP3 // Метеорология и гидрология. 2008, № 9, с.5-22.
62. Мелешко В.П., Матюгин В.А., Спорышев П.В., Павлова Т.В., Говоркова В.А., Школьник И.М., Байдин А.В. Модель общей циркуляции атмосферы ГГО (версия MGO-03 T63L25) // Труды ГГО. 2014, № 571, с.5—87.
63. Мельников В.П., Осипов В.И., Брушков А.В., Бадина С.В., Дроздов Д.С., Дубровин В.А., Железняк М.Н., Садуртдинов М.Р., Сергеев Д.О., Остарков Н.А., Фалалеева А.А., Шелков Я.Ю. Оценка ущерба жилым и промышленным зданиям и сооружениям при изменении температур и оттаивании многолетнемерзлых грунтов в Арктической зоне Российской Федерации к середине XXI века // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2021, № 1, с.14-31.

64. Мирвис В.М., Мелешко В.П., Львова Т.Ю., Матюгин В.А., Байдин А.В. Прогностические эксперименты на основе совместной модели океан-атмосфера ГГО // Труды ГГО. 2016, № 583, с.129-148.
65. Надежина Е.Д., Орленко Л.Р., Пикалева А.А. Оценки эволюции теплового состояния многолетнемерзлых грунтов на побережье Арктических морей с использованием системы моделей разного пространственного масштаба // Труды ГГО. 2013, № 569, с.62-74.
66. Оберман Н.Г., Шеслер И.Г. Прогнозирование деградации многолетнемерзлых пород (на примере Европейского Северо-Востока страны). // Разведка и охрана недр. 2009, № 7, с.20-30.
67. Павлова Т.В., Катцов В.М. Ожидаемые изменения осадков и испарения в Арктике в 21-м веке: результаты расчетов с помощью ансамбля глобальных климатических моделей (CMIP5) // Труды ГГО. 2015, № 579, с.22-36.
68. Павлова Т.В., Катцов В.М., Мелешко В.П., Школьник И.М., Говоркова В.А., Надежина Е.Д. Новое поколение климатических моделей // Труды ГГО. 2014, № 575, с.5—64.
69. Павлова Т.В., Катцов В.М., Пикалева А.А., Спорышев П.В., Говоркова В.А. Снежный покров и многолетняя мерзлота в моделях CMIP5: оценки современного состояния и его возможных изменений в 21-м веке // Труды ГГО. 2013, № 569, с.38—61.
70. Полищук Ю.М., Куприянов М.А., Брыксина Н.А. Дистанционное исследование динамики площади озер в сплошной криолитозоне Сибири // География и природные ресурсы. 2017, № 3, с.164-170.
71. Полищук Ю.М., Полищук В.Ю. Использование геоимитационного моделирования для прогноза изменения размеров термокарстовых озер на севере Западной Сибири // Криосфера Земли. 2016, Т.20, № 2, с.32-40.
72. Попов А.П., Милованов В.И., Жмулин В.В., Рябов В.А., Бережной М.А. К вопросу о типовых технических решениях по основаниям и фундаментам для криолитозоны // Инженерная геология. 2008, № 3, с.22-40.
73. Порфирьев Б.Н. Природа и экономика: риски взаимодействия. М.: Анкил, 2011, 352 с.
74. Спорышев П.В., Катцов В.М., Говоркова В.А. Эволюция температуры в Арктике: достоверность модельного воспроизведения и вероятностный прогноз на близкую перспективу // Труды ГГО. 2016, № 583, с.45-84.
75. Титкова Т.Б., Виноградова В.В. Отклик растительности на изменение климатических условий в бореальных и субарктических ландшафтах в начале XXI века //

- Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015, Т.12, № 3, с.75-86.
76. Тишков А.А., Кренке-мл А.Н. Позеленение Арктики в XXI веке как эффект синергизма действия глобального потепления и хозяйственного освоения // Арктика: экология и экономика. 2015, № 4, с.28-38.
77. Толстых М.А., Дианский Н.А., Гусев А.В., Киктев Д.Б. Воспроизведение сезонных аномалий атмосферной циркуляции при помощи совместной модели атмосферы и океана // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2014, Т.50, № 2, с.131—142.
78. Шерстюков А.Б., Шерстюков Б.Г. Пространственные особенности и новые тенденции в изменениях термического состояния почвогрунтов и глубины их сезонного протаивания в зоне многолетней мерзлоты // Метеорология и гидрология. 2015, № 2, с.5-12.
79. Школьник И.М., Ефимов С.В. Региональная климатическая модель нового поколения для территории северной Евразии // Труды ГГО. 2015, № 576, с.201-211.
80. Школьник И.М., Мелешко В.П., Ефимов С.В., Стафеева Е.Н. Изменения экстремальности климата на территории Сибири к середине XXI века: ансамблевый прогноз по региональной модели ГГО // Метеорология и гидрология. 2012а, № 2, с.5-23.
81. Школьник И.М., Мелешко В.П., Кароль И.Л., Киселев А.А., Надежина Е.Д., Говоркова В.А., Павлова Т.В. Ожидаемые изменения климата на территории Российской Федерации в 21-м веке / Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Москва: Росгидромет, 2014. 320-349 с.
82. Школьник И.М., Надежина Е.Д., Павлова Т.В., Хлебникова Е.И., Семиошина А.А., Молькентин Е.К., Стафеева Е.Н. Моделирование региональных особенностей слоя сезонного протаивания в зоне вечной мерзлоты на территории Сибири // Криосфера Земли. 2012b, Т.16, № 2, с.52-59.
83. Abramowitz G., Heger N., Gutmann E., Hammerling D., Knutti R., Leduc M., Lorenz R., Pincus R., Schmidt G.A. ESD Reviews: Model dependence in multi-model climate ensembles: weighting, sub-selection and out-of-sample testing // Earth System Dynamics. 2019, v.10, № 91-105.
84. Ahmed N. Seven facts you need to know about the Arctic methane timebomb. The Guardian, 2013.
85. Andreev A.A., Grosse G., Schirrmeister L., Kuzmina S.A., Novenko E.Y., Bobrov A.A., Tarasov P.E., Kuznetsova T.V., Krbetschek M., Meyer H., Kunitsky V. Late Saalian and Eemian palaeoenvironmental history of the Bol'shoy Lyakhovsky Island (Laptev Sea region, Arctic Siberia) // Boreas. 2008, v.33, № 4, p.319 - 348.

86. Anisimov O., Kokorev V.A. Cities of the Russian North in the Context of Climate Change / Sustaining Russia's Arctic Cities: Resource Politics, Migration, and Climate Change. R. Ortung. New York: Berghahn Books, 2017a, 2. 141-174 p.
87. Anisimov O., Zimov S. Thawing permafrost and methane emission in Siberia: Synthesis of observations, reanalysis, and predictive modeling // *Ambio*. 2020, v.,N<sup>o</sup>
88. Anisimov O.A. Challenges of the Changing Climate: A Case Study of Russia // *Russian Analytical Digest*. 2016, v.,N<sup>o</sup> 185, p.2-5.
89. Anisimov O.A., Kokorev V.A., Zhiltcova E.L. Arctic ecosystems and their services under changing climate: predictive modelling assessment // *Geographical Review*. 2017b, v.107,N<sup>o</sup> 1, p.108-124.
90. Arrhenius S. *Das Werden der Welten*. Leipzig, 1908, 108 p.
91. Axford Y., Briner J.P., Francis D.R., Miller G.H., Walker I.R., Wolfe A.P. Chironomids record terrestrial temperature changes throughout Arctic interglacials of the past 200,000 yr. // *Geological Society of America Bulletin*. 2011, v.123,N<sup>o</sup> 7-8, p.1275-1287.
92. Bartlein P.J., Edwards M.E., Hostetler S.W., Shafer S., Anderson P.M., Brubaker L.B., Lozhkin A.V. Early-Holocene warming in Beringia and its mediation by sea-level and vegetation changes // *Climate of the Past*. 2015, v.11,N<sup>o</sup> 1197-1222.
93. Bhatt U.S., Walker D.A., Raynolds M.K., Bieniek P.A., Epstein H.E., Comiso J.C., Pinzon J.E., Tucker C.J., Polyakov I.V. Recent declines in warming and arctic vegetation greening trends over pan-Arctic tundra // *Remote Sensing*. 2013, v.(Special NDVI issue), N<sup>o</sup> 5, p.4229-4254.
94. Bhatt U.S., Walker D.A., Raynolds M.K., Bieniek P.A., Epstein H.E., Josefino C.C., Pinzon J.E., Tucker C.J., Steele M., Ermold W., Zhang J. Changing seasonality of panarctic tundra vegetation in relationship to climatic variables // *Environmental Research Letters*. 2017, v.12:055003,N<sup>o</sup>
95. Bigelow N.H., Brubaker L.B., Edwards M.E., Harrison S.P., Prentice I.C., Anderson P.M., Andreev A.A., Bartlein P.J., Christensen T.R., Cramer W., Kaplan J.O., Lozhkin A.V., Matveyeva N.V., Murray D.F., McGuire A.D., Razzhivin V.Y., Ritchie J.C., Smith B., Walker D.A., Gajewski K., Wolf V., Holmqvist B.H., Igarashi Y., Kremenetskii K., Paus A., Pisaric M.F.J., Volkova V.S. Climate change and Arctic ecosystems: 1. Vegetation changes north of 55°N between the last glacial maximum, mid-Holocene, and present // *Journal of Geophysical Research*. 2003, v.108,N<sup>o</sup> 19, p.
96. Binney H., Edwards M., Macias-Fauria M., Lozhkin A., Anderson P., Kaplan J.O., Andreev A., Bezrukova E., Blyakharchuk T., Jankovska V., Khazina I., Krivonogov S., Kremenetski K., Nield J., Novenko E., Ryabogina N., Solovieva N., Willis K., Zernitskaya V. Vegetation of Eurasia from the last glacial maximum to present: Key biogeographic patterns // *Quaternary Science Reviews*. 2016, v.157,N<sup>o</sup> 80-97.

97. Binney H., Willis K., Edwards M., Bhagwat S., Anderson P., Andreev A., Blaauw M., Damblon F., Haesaerts P., Kienast F., Kremenetski K., Krivonogov S., Lozhkin A., MacDonald G., Novenko E., Oksanen P., Sapelko T., Väliranta M., Vazhenina L. The distribution of late-Quaternary woody taxa in northern Eurasia: evidence from a new macrofossil database // *Quaternary Science Reviews*. 2009, v.28, N° 2445-2464.
98. Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzli J., Matthes H., Vieira G., Streletskiy D.A., Schoeneich P., Romanovsky V.E., Lewkowicz A.G., Abramov A., Allard M., Boike J., Cable W.L., Christiansen H.H., Delaloye R., Diekmann B., Drozdov D., Etzel Müller B., Grosse G., Guglielmin M., Ingeman-Nielsen T., Isaksen K., Ishikawa M., Johansson M., Johannsson H., Joo A., Kaverin D., Kholodov A., Konstantinov P., Kröger T., Lambiel C., Lanckman J.-P., Luo D., Malkova G., Meiklejohn I., Moskalenko N., Oliva M., Phillips M., Ramos M., Sannel A.B.K., Sergeev D., Seybold C., Skryabin P., Vasiliev A., Wu Q., Yoshikawa K., Zheleznyak M., Lantuit H. Permafrost is warming at a global scale // *Nature Communications*. 2019, v.10, N° 1, p.264.
99. Bjorkman A.D., Myers-Smith I.H., Thomas H.J.D., Elmendorf S.C., sTundra, ITEX, Team T.T. Changes in plant functional traits across a warming tundra biome // *Nature*. 2018 v.562, N° 57–62.
100. Burke K.D., Williams J.W., Brewer S., Finsinger W., Giesecke T., Lorenz D.J., Ordonez A. Differing climatic mechanisms control transient and accumulated vegetation novelty in Europe and eastern North America // *Philosophical Transactions of The Royal Society B Biological Sciences*. 2019, v., N°
101. Callendar G.S. The Artificial Production of Carbon Dioxide and its Influence on Climate // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 1938, v.64, N° 3, p.223-240.
102. *Climate Change 2001: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of the Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* (2001). Cambridge, Cambridge University Press.
103. *Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts: McKinsey Global Institute, 2020.*
104. Collins M., Knutti R., Arblaster J., Dufresne J.-L., Fichefet T., Friedlingstein P., Gao X., Gutowski W.J., Johns T., Krinner G., Shongwe M., Tebaldi C., Weaver A.J., Wehner M. Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility / *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013. 1029–1136 p.

105. Dallmeyer A., Claussen M., Ni J., Cao X., Wang Y., Fischer N., Pfeiffer M., Jin L., Khon V., Wagner S., Haberkorn K., Herzsuh U. Biome changes in Asia since the mid-Holocene – an analysis of different transient Earth system model simulations // *Climate of the Past*. 2017, v.13, № 107–134.
106. Dmitrenko I.A., Kirillov S.A., Tremblay B., Kassens H., Anisimov O.A., Lavrov S.A., Razumov S.O., Grigoriev M.N. Recent changes in shelf hydrography in the Siberian Arctic: Potential for subsea permafrost instability. // *Journal of Geophysical Research*, doi:10.1029/2011JC007218. 2011, v., № 116, C10027, p.
107. The economics of climate change: no action not an option: Swiss Re Institute, 2021.
108. Elmendorf S.C., Henry G.H.R., Hollister R.D., Bjork R.G., Boulanger-Lapointe N., Cooper E.J., Cornelissen J.H.C., Day T.A., Dorrepaal E., Elumeeva T.G., Gill M., Gould W.A., Harte J., Hik D.S., Hofgaard A., Johnson D.R., Johnstone J.F., Jonsdottir I.S., Jorgenson J.C., Klanderud K., Klein J.A., Koh S., Kudo G., Lara M., Levesque E., Magnusson B., May J.L., Mercado-Diaz J.A., Michelsen A., Molau U., Myers-Smith I.H., Oberbauer S.F., Onipchenko V.G., Rixen C., Schmidt M.N., Shaver G.R., Spasojevic M.J., Orhallsdottir O.E., Tolvanen A., Troxler T., Tweedie C.E., Villareal S., Wahren C.-H., Walker X., Webber P.J., Welker J.M., and Wipf S. Plot-scale evidence of tundra vegetation change and links to recent summer warming // *Nature Climate Change*. 2012, v.2, № 453–457.
109. EU Climate change expert group "EG Science". The 2 C target. Information reference document, 2008. 55.
110. Eyring V., Bony S., Meehl G.A., Senior C.A., Stevens B., Stouffer R.J., Taylor K. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // *Geoscientific Model Development*. 2016a, v.9, № 1937–1958.
111. Eyring V., Gleckler P.J., Heinze C., Stouffer R.J., Taylor K.E., Balaji V., Guilyardi E., Joussaume S., Kindermann S., Lawrence B.N., Meehl G.A., Righi M., Williams D.N. Towards improved and more routine Earth system model evaluation in CMIP // *Earth System Dynamics*. 2016b, v.7, № 4, p.813–830.
112. Finsinger W., Giesecke T., Brewer S., Leydet M. Emergence patterns of novelty in European vegetation assemblages over the past 15 000 years // *Ecology Letters*. 2017, v.20, № 3, p.336–346.
113. Flato G., Marotzke J., Abiodun B., Braconnot P., Chou S.C., Collins W., Cox P., Driouech F., Emori S., Eyring V., Forest C., Gleckler P., Guilyardi E., Jakob C., Kattsov V., Reason C., Rummukainen M. Evaluation of Climate Models / *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley.

- Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013. 741–866 p.
114. Forbes B.C., Fauria M.M., Zetterberg P. Russian Arctic warming and "greening" are closely tracked by tundra shrub willows // *Global Change Biology*. 2010, v.,N° 16, p.1542-1554.
  115. Frame D.J., Stone D.A. Assessment of the first consensus prediction on climate change // *Nature Climate Change*. 2012, v.,N° December, p.10-12.
  116. Frederick J.M., Buffett B.A. Taliks in relict submarine permafrost and methane hydrate deposits: Pathways for gas escape under present and future conditions // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2014, v.119,N° 2, p.106-122.
  117. Frost G.V., Epstein H.E. Tall shrub and tree expansion in Siberian tundra ecotones since the 1960s // *Global Change Biology*. 2014, v.,N° 20, p.1264-1277.
  118. Gonsalez P., Neilson R.P., Lenihan J.M., Drapek R.J. Global patterns in the vulnerability of ecosystems to vegetation shifts due to climate change // *Global Ecology and Biogeography*. 2010, v.,N° 19, p.755-768.
  119. González M.F., Ilyina T., Sonntag S., Schmidt H. Enhanced Rates of Regional Warming and Ocean Acidification After Termination of Large-Scale Ocean Alkalinization // *Geophysical Research Letters*. 2018, v.45,N° 7120–7129.
  120. Grant R.F., Mekonnen Z.A., Riley W.J., Wainwright H.M., Graham D., Torn M.S. Mathematical modelling of arctic polygonal tundra with ecosys: 1. Microtopography determines how active layer depths respond to changes in temperature and precipitation // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2017, v.,N° 122, p.3161-3173.
  121. Gruber S. Derivation and analysis of a high-resolution estimate of globalpermafrost zonation // *The Cryosphere*. 2012, v.6,N° 221-233.
  122. Harsch M.A., Hulme P.E., McGlone M.S., Duncan R.P. Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming // *Ecology Letters*. 2009, v.,N° 12, p.1040-1049.
  123. Hawkins E., Sutton R. The Potential to Narrow Uncertainty in Regional Climate Predictions // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2009, v.90,N° 8, p.1095-1107.
  124. Herger N., Abramowitz G., Knutti R., Angélil O., Lehmann K., Sanderson B.M. Selecting a climate model subset to optimise key ensemble properties // *Earth System Dynamics*. 2018, v.9,N° 135–151.
  125. Hjort J., Karjalainen O., Aalto J., Westermann S., Romanovsky V.E., Nelson F.E., Eitzelmüller B., Luoto M. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century // *Nature Communications*. 2018, v.9,N° 1, p.5147.



126. Hobbie J.E., Shaver G.R., Rastetter E.B., Cherry J.E., Goetz S.J., Guay K.C., Gould W.A., Kling G.W. Ecosystem responses to climate change at a Low Arctic and a High Arctic long-term research site // *Ambio*. 2017, v.46 (Suppl. 1), N° 160–173.
127. Hollister R.D., May J.L., Kremers K.S., Tweedie C.E., Oberbauer S.F., Liebig J.A., Botting T.F., Barrett R.T., Gregory J.L. Warming experiments elucidate the drivers of observed directional changes in tundra vegetation // *Ecology and Evolution*. 2015, v., N° 5, p.1881-1895.
128. Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., Van der Linden P.J., Dai X., Maskell K., Johnson C.A., Eds. (2001). *Climate change 2001: The scientific basis Contribution of working group I to the Third assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge, Cambridge University Press.
129. Houghton J.T., Meira Filho L.G., Callander B.A., Harris N., Kattenberg A., Maskell K., Eds. (1996). *Climate change 1995: the science of climate change Contribution of working group I to the second assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge, Cambridge University Press.
130. Hourdin F., Grandpeix J.-Y., Rio C., Bony S., Jam A., Cheruy F., Rochetin N., Fairhead L., Idelkadi A., Musat I., Dufresne J.-L., Lahellec A., Lefebvre M.-P., Roehrig R. LMDZ5B: the atmospheric component of the IPSL climate model with revisited parameterizations for clouds and convection // *Climate Dynamics*. 2013, v.40, N° 9-10, p.2193-2222.
131. Hudson J.M.G., Henry G.H.R. Increased plant biomass in a High Arctic heath community from 1981 to 2008 // *Ecology*. 2009, v., N° 90, p.2657-2663.
132. Hugelius G., Strauss J., Zubrzycki S., Harden J.W., Schuur E.A.G., Ping C.L., Schirmer L., Grosse G., Michaelson G.J., Koven C.D., O'Donnell J.A., Elberling B., Mishra U., Camill P., Yu Z., Palmtag J., Kuhry P. Improved estimates show large circumpolar stocks of permafrost carbon while quantifying substantial uncertainty ranges and identifying remaining data gaps // *Biogeosciences Discuss*. 2014, v.11, N° 4771-4822.
133. Hugelius G., Virtanen T., Kaverin D., Pastukhov A., Rivkin F., Marchenko S., Romanovsky V., Kuhry P. High-resolution mapping of ecosystem carbon storage and potential effects of permafrost thaw in periglacial terrain, European Russian Arctic // *Journal of Geophysical Research*. 2011, v.116, N° G03024.
134. Huskey L., Maenpaa I., Pelyasov A. *Economic Systems / Arctic Human Development Report: Regional Processes and Global Linkages (AHDR-II)*. J. Larsen, G. Fondahl. Copenhagen: Rosendahls-Schultz Grafisk, 2014, ll. 151-182 p.
135. IPCC *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge,

- United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013a, 1535 p.
136. IPCC Summary for Policymakers / Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013b. 1–30 p.
137. IPCC Summary for Policymakers / Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, L.L. White. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014, 2. 1–32 p.
138. Jorgenson J.C., Reynolds M.K., Reynolds J.H., Benson A.-M. Twenty-five year record of changes in plant cover on tundra of northeastern Alaska // Arctic, Antarctic, and Alpine Research. 2015, v.47, N° 785–806.
139. Kaplan J.O., Bigelow N.H., Prentice I.C., Harrison S.P., Bartlein P.J., Christensen T.R., Cramer W., Matveyeva N.V., McGuire A.D., Murray D.F., Razzhivin V.Y., Smith B., Walker D.A., Anderson P.M., Andreev A.A., Brubaker L.B., Edwards M.E., Lozhkin A.V. Climate change and Arctic ecosystems: 2. Modeling, paleodata-model comparisons, and future projections // Journal of Geophysical Research. 2003, v.108, N° D19, p.8171, doi:8110.1029/2002JD002559.
140. Kaufman D.S., Axford Y.L., Henderson A.C.G., McKay N.P., Wyatt Oswald W., Saenger C., Anderson R.S., Bailey H.L., Clegg B., Gajewski K., Hu F.S., Jones M.C., Massa C., Routson C., Werner A., Wooller M.J., Yu Z. Holocene climate changes in eastern Beringia (NW North America) – A systematic review of multi-proxy evidence // Quaternary Science Reviews. 2016, v.147, N° 312–339.
141. Kienast F., Wetterich S., Kuzmina S., Schirmermeister L., Andreev A.A., Tarasov P., Nazarova L., Kossler A., Frolova L., Kunitsky V.V. Paleontological records indicate the occurrence of open woodlands in a dry inland climate at the present-day Arctic coast in western Beringia during the Last Interglacial // Quaternary Science Reviews. 2011, v.30, N° 2134–2159.
142. Knutti R. The end of model democracy? // Climatic Change. 2010, v.102, N° 395–404.
143. Knutti R., Allen M.R., Friedlingstein P., Gregory J.M., Hegerl G.C., Meehl G.a., Meinshausen M., Murphy J.M., Plattner G.-K., Raper S.C.B., Stocker T.F., Stott P.A., Teng H., Wigley T.M.L. A Review of

- Uncertainties in Global Temperature Projections over the Twenty-First Century // *Journal of Climate*. 2008, v.21,N<sup>o</sup> 11, p.2651-2663.
144. Knutti R., Sedláček J., Sanderson B.M., Lorenz R., Fischer E.M., Eyring V. A climate model projection weighting scheme accounting for performance and interdependence // *Geophysical Research Letters*. 2017, v.44,N<sup>o</sup> 1909–1918.
  145. Kruse S., Gerdes A., Kath N.J., Epp L.S., Stoof-Leichsenring K.R., Pestryakova L., Herzschuh U. Dispersal distances and migration rates at the arctic treeline in Siberia – a genetic and simulation based study // *Biogeosciences Discussions*. 2018, v.,N<sup>o</sup>
  146. Kwok R., Cunningham G. F., Wensnahan M., Rigor I., Zwally H. J., and Yi D. Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003-2008 // *Journal of Geophysical Research-Oceans*. 2009, v.114,N<sup>o</sup> C7, p.
  147. Lee J.Y., J. Marotzke, G. Bala, L. Cao, S. Corti, J. P. Dunne, F. Engelbrecht, E. Fischer, J. C. Fyfe, C. Jones, A., Maycock J.M., O. Ndiaye, S. Panickal, T. Zhou Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information / *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2021. 41 p.
  148. Leggett J., Pepper W.J., Swart R.J., Edmonds J., Meira Filho L.G., Mintzer I., Wang M.X., Watson J. Emissions Scenarios for the IPCC: an Update / *Climate Change 1992: The Supplementary Report to The IPCC Scientific Assessment*. UK: Cambridge University Press, 1992. 68-95 p.
  149. MacDonald G.M., Kremenetski K.V., Beilman D.W. Climate changes and the northern treeline zone // *Philosophical Transactions of The Royal Society*. 2008, v.363,N<sup>o</sup> 2285-2299.
  150. Maliniemi T., Kapfer J., Saccone P., Skog A., Virtanen R. Long-term vegetation changes of treeless heath communities in northern Fennoscandia: links to climate change trends and reindeer grazing // *Journal of Vegetation Science*. 2018, v.29,N<sup>o</sup> 3, p.469– 479.
  151. Martin A.C., Jeffers E.S., Petrokofsky G., Myers-Smith I., Macias-Fauria M. Shrub growth and expansion in the Arctic tundra: an assessment of controlling factors using an evidence-based approach // *Environmental Research Letters*. 2017, v.12:085007,N<sup>o</sup>
  152. Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M.I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J.B.R., Maycock T.K., Waterfield K., Yelekçi O., Yu R., Zhou B., Eds. (2021a). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to*

- the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge, UK, Cambridge University Press.
153. Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M.I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J.B.R., Maycock T.K., Waterfield K., Yelekçi O., Yu R., Zhou B. Summary for policymakers / Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2021b. 41 p.
  154. Masui T., Matsumoto K., Hijioka Y., Kinoshita T., Nozawa T., Ishiwatari S., Kato E., Shukla P.R., Yamagata Y., Kainuma M. An emission pathway for stabilization at 6 Wm<sup>-2</sup> radiative forcing // Climatic Change. 2011, v.109, N° 1-2, p.59-76.
  155. Mauritsen T., Stevens B., Roeckner E., Crueger T., Esch M., Giorgetta M., Haak H., Jungclaus J., Klocke D., Matei D., Mikolajewicz U., Notz D., Pincus R., Schmidt H., Tomassini L. Tuning the climate of a global model // Journal of Advances in Modeling Earth System. 2012, v.4, N° 3, p.3-9.
  156. Maximov T.C., Ohta T., Dolman A.J. Water and energy exchange in East Siberian forest: A synthesis // Agricultural and Forest Meteorology. 2008, v.148, N° 12, p.2013-2018.
  157. McFarlin J.M., Axford Y., Osburn M.R., Kelly M.A., Osterberg E.C., Farnsworth L.B. Pronounced summer warming in northwest Greenland during the Holocene and Last Interglacial // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2018, v.115, N° 25, p.6357-6362.
  158. McLaren J.R., Buckeridge K.M., Van De Weg M.J., Shaver G.R., Schimel J.P., Gough L. Shrub encroachment in Arctic tundra: *Betula nana* effects on above- and below-ground litter decomposition // Ecology. 2017, v.98, N° 1361-1376.
  159. Meehl G.A., Covey C., McAvaney B., Latif M., Stouffer R.J. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project // Bulletin of the American Meteorological Society. 2005, v.86, N° 1, p.89-93.
  160. Meehl G.A., Covey C., Taylor K.E., Delworth T., Stouffer R.J., Latif M., McAvaney B., Mitchell J.F.B. THE WCRP CMIP3 Multimodel Dataset: A New Era in Climate Change Research // Bulletin of the American Meteorological Society. 2007, v.88, N° 9, p.1383-1394.
  161. Meinshausen M., Smith S.J., Calvin K., Daniel J.S., Kainuma M.L.T., Lamarque J.-F., Matsumoto K., Montzka S.a., Raper S.C.B., Riahi K., Thomson A., Velders G.J.M., Vuuren D.P.P. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300 // Climatic Change. 2011, v.109, N° 1-2, p.213-241.

162. Methane A.S. Methane as an Arctic climate forcer: Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, Norway, 2015. 139 p.
163. Millar R.J., Fuglestedt J.S., Friedlingstein P., Rogelj J., Grubb M.J., Matthews H.D., Skeie R.B., Forster P.M., Frame D.J., Allen M.R. Emission budgets and pathways consistent with limiting warming to 1.5 degrees C // *Nature Geoscience*. 2017, v.10, N° 741–748.
164. Möller P., Alexanderson H., Funder S., Hjort C. The Taimyr Peninsula and the Severnaya Zemlya archipelago, Arctic Russia: a synthesis of glacial history and palaeo-environmental change during the Last Glacial cycle (MIS 5e-2) // *Quaternary Science Reviews*. 2015, v.107, N° 149-181.
165. Myers-Smith I.H., Elmendorf S.C., Beck P.S.A., Wilmsking M., Hallinger M., Blok D., Tape K.D., Rayback S.A., Macias-Fauria M., Forbes B.C., Speed J.D.M., Boulanger-Lapointe N., Rixen C., Lévesque E., Martin Schmidt N., Baittinger C., Trant A.J., Hermanutz L., Sieqwart Collier L., Dawes M.A., Lantz T.C., Weijers S., Halfdan Jørgensen R., Buchwal A., Buras A., Naito A.N., Ravolainen V., Schaepman-Strub G., Wheeler G.A., Wipf S., Guay K.C., Hik D.S., Vellend M. Climate sensitivity of shrub growth across the tundra biome // *Nature Climate Change*. 2015, v., N° 5, p.887–891.
166. Myers-Smith I.H., Grabowski M.M., Thomas H.J.D., Angers-Blondin S., Daskalova G.N., Bjorkman A.D., Cunliffe A.M., Assmann J.J., Boyle J., McLeod E., McLeod S., Joe R., Lennie P., Arey D., Gordon R., Eckert C. Eighteen years of ecological monitoring reveals multiple lines of evidence for tundra vegetation change // *Ecological Monographs*. 2019, v.89, N° 2, p.
167. Myers-Smith I.H., Hik D.S. Climate warming as a driver of tundra shrubline advance // *Journal of Ecology*. 2018a, v.106, N° 547–560.
168. Myers-Smith I.H., Thomas H.J.D., Bjorkman A.D. Plant traits inform predictions of tundra responses to global change // *New Phytologist*. 2018b, v.221, N° 4, p.
169. Nakicenovic N., Alcamo J., Davis G., de Vries B., Fenham J., Gaffin S., Gregory K., Grubler A., Jung T.Y., Kram T., La Rovere E.L., Michaelis L., Mori S., Morita T., Pepper W., Pitcher H., Price L., Raihi K., Roehrl A., Rogner H.-H., Sankovski A., Schlesinger M., Shukla P., Smith S., Swart R., van Rooijen S., Victor N., Dadi Z., Eds. (2000). Emissions Scenarios A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, and New York, Cambridge University Press.
170. Nelson F.E., Anisimov O.A., Shiklomanov N.I. Subsidence risk from thawing permafrost. // *Nature*. 2001, v., N° 410, p.889-890.

171. O'Neill B.C., Tebaldi C., Van Vuuren D.P., Eyring V., Friedlingstein P., Hurtt G., Knutti R., Kriegler E., Lamarque J.F., Lowe J., Meehl G.A., Moss R., Riahi K., Sanderson B.M. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6 // *Geoscientific Model Development*. 2016, v.9, N° 9, p.3461-3482.
172. Olson R., An S.-I., Fan Y., Evans J.P., Caesar L. North Atlantic observations sharpen meridional overturning projections // *Climate Dynamics*. 2018, v.50, N° 4171-4188.
173. Orttung R.W., Anisimov O., Badina S., Burns C., Cho L., DiNapoli B., Jull M., Shaiman M., Shapovalova K., Silinsky L., Zhang E., Zhiltcova Y. Measuring the sustainability of Russia's Arctic cities // *Ambio*. 2020, v., N°
174. Osborne E., Richter-Menge J., Jeffries M. Arctic Report Card 2018, 2018.
175. Overduin P.P., Liebner S., Knoblauch C., Günther F., Wetterich S., Schirrmeister L., Hubberten H.-W., Grigoriev M.N. Methane oxidation following submarine permafrost degradation: Measurements from a central Laptev Sea shelf borehole // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2015, v.120, N° 5, p.965-978.
176. Pearson R.G., Phillips S.J., Lorant M.M., Beck P.S.A., Damoulas T., Knight S.J., and Goetz S.J. Shifts in Arctic vegetation and associated feedbacks under climate change // *Nature Climate Change*. 2013, v.3, N° 673-677.
177. Pepper W.J., Leggett R.J., Swart R.J., Wasson J., Edmonds J., Mintzer I. (1992). *Emission Scenarios for the IPCC An Update, Assumptions, Methodology, and Results*, Washington, D.C., US Environmental Protection Agency.
178. Piao S., Wang X., Park T., Chen C., Lian X., He Y., Bjerke J., Chen A., Ciais P., Tømmervik H., Nemani R., Myneni R. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening // *Nature Reviews Earth & Environment*. 2019, v., N° 1, p.14-27.
179. Porter T.J., Schoenemann S.W., Davies L.J., Steig E.J., Bandara S., Froese D.G. Recent summer warming in northwestern Canada exceeds the Holocene thermal maximum // *Quaternary Science Reviews*. 2019, v.10, N° 1, p.1-10.
180. Rasmussen S.O., Bigler M., Blockley S.P., Blunier T., Buchardt S.L., Clausen H.B., Cvijanovic I., Dahl-Jensen D., Johnsen S.J., Fischer H., Gkinis V., Guillevic M., Hoek W.Z., Lowe J.J., Pedro J.B., Popp T., Seierstad I.K., Steffensen J.P., Svensson A.M., Vallelonga P., Vinther B.M., Walker M.J.C., Wheatley J.J., Winstrup M. A stratigraphic framework for abrupt climatic changes during the Last Glacial period based on three synchronized Greenland ice-core records: refining and extending the INTIMATE event stratigraphy // *Quaternary Science Reviews*. 2014, v.106, N°14-28.

181. Raynolds M.K., Walker D.A., Epstein H.E., Pinzon J.E., Tucker C.J. A new estimate of tundra-biome phytomass from trans-Arctic field data and AVHR-NDVI // *Remote Sensing Letters*. 2012, v.3, N° 5, p.403-411.
182. Reichler T., Kim J. How Well Do Coupled Models Simulate Today's Climate? // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2008, v.89, N° 3, p.303-311.
183. Riahi K., Rao S., Krey V., Cho C., Chirkov V., Fischer G., Kindermann G., Nakicenovic N., Rafaj P. RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions // *Climatic Change*. 2011, v.109, N° 33-57.
184. Rickels W., Reith F., Keller D., Oeschle A., Quaas M.F. Integrated Assessment of Carbon Dioxide Removal // *Earth's Future*. 2018, v.6, N° 565-582.
185. Rogelj J., Meinshausen M., Knutti R. Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates // *Nature Climate Change*. 2012, v., N° 2, p.248—253.
186. Schuur E.A.G., McGuire A.D., Schädel C., Grosse G., Harden J.W., Hayes D.J., Hugelius G., Koven C.D., Kuhry P., Lawrence D.M., Natali S.M., Olefeldt D., Romanovsky V.E., Schaefer K., Turetsky M.R., Treat C.C., Vonk J.E. Climate change and the permafrost carbon feedback // *Nature*. 2015, v.520, N° 9 April 2015, p.171-179.
187. Sergunin A.A., Gjørv G.H. Russian Arctic shipping: evolving security and geopolitical factors // *The Polar Journal*. 2020, v.10, N° 2, p.251-272.
188. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Rekant P., Salyuk A., Kosmach D. Geochemical and geophysical evidence of methane release from the inner East Siberian Shelf // *Journal of Geophysical Research*. 2013, v.115, N° C08007, doi:08010.01029/02009JC005602.
189. Shiyatov S.G., Terent'ev M.M., Fomin V.V., Zimmermann N.E. Altitudinal and horizontal shifts of the upper boundaries of open and closed forests in the polar Urals in the 20th Century // *Russian Journal of Ecology*. 2007, v.38, N° 243-248.
190. Simola H., Solanko L. Overview of Russia's Oil and Gas Sector. BOFIT Policy Brief 5/2017, 2017.
191. Smith P., Davis S.J., Creutzig F., Fuss S., Minx J., Gabrielle B., et al. Biophysical and economic limits to negative CO<sub>2</sub> emissions // *Nature Climate Change*. 2016, v.6, N° 42-50.
192. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. Technical Summary / *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013. 33-115 p.

193. Streletskiy D.A., Anisimov O.A., Vasiliev A.A. Permafrost Degradation / Snow and ice-related hazards, risks, and disasters. W. Haeberli, C. Whiteman: Elsevier, 2014. 303-344 p.
194. Streletskiy D.A., Shiklomanov N.I., Nelson F.E. Permafrost, infrastructure and climate change: A GIS-based landscape approach to geotechnical modeling // Arctic, Antarctic and Alpine Research. 2012, v.44, N° 3, p.368-380.
195. Streletskiy D.A., Shiklomanov N.I. Russian Arctic cities through the prism of permafrost / Sustaining Russia's Arctic cities. R. Ortung. New-York - Oxford: Berghahn, 2017. 201-220 p.
196. Streletskiy D.A., Suter L., Shiklomanov N.I., Porfiriev B.N., Eliseev D.O. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost // Environmental Research Letters. 2019, v.14, N° 2, p.025003.
197. Suter L., Streletskiy D., Shiklomanov N. Assessment of the cost of climate change impacts on critical infrastructure in the circumpolar Arctic // Polar Geography. 2019, v.42, N° 4, p.267-286.
198. Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design // Bulletin of the American Meteorological Society. 2011, v.93, N° 4, p.485-498.
199. Thomson A.M., Calvin K.V., Smith S.J., Kyle G.P., Volke A., Patel P., Delgado-Arias S., Bond-Lamberty B., Wise M.a., Clarke L.E., Edmonds J.a. RCP4.5: A pathway for stabilization of radiative forcing by 2100 // Climatic Change. 2011, v.109, N° 77-94.
200. Thornton B.F., Geibel M.C., Crill P.M., Humborg C., Mörth C.-M. Methane fluxes from the sea to the atmosphere across the Siberian shelf seas // Geophysical Research Letters. 2016, v., N° 43, p.5869-5877.
201. Urban M., Forkel M., Eberle J., Huettich C., Schmulius C., and Herold M. Pan-Arctic Climate and Land Cover Trends Derived from Multi-Variate and Multi-Scale Analyses (1981-2012) // Remote Sensing. 2014, v.6, N° 2296-2316.
202. van der Bilt W.G.M., D'Andrea W.J., Werner J.P., Bakke J. Early Holocene temperature oscillations exceed amplitude of observed and projected warming in Svalbard lakes // Geophysical Research Letters. 2019, v.46, N° 2, p.
203. van Vuuren D.P., Stehfest E., den Elzen M.G.J., Kram T., van Vliet J., Deetman S., Isaac M., Goldewijk K.K., Hof A., Beltran A.M., Oostenrijk R., van Ruijven B. RCP2.6: Exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C // Climatic Change. 2011, v.109, N° 95-116.
204. van Vuuren D.P., van Soest H., Riahi K., Clarke L., Krey V., Kriegler E., Rogelj J., Schaeffer M., Tavoni M. Carbon budgets and energy transition pathways // Environmental Research Letters. 2016, v.11, N° 7, p.075002.



205. Vaughan D.G., Comiso J.C., Allison I., Carrasco J., Kaser G., Kwok R., Mote P., Murray T., Paul F., Ren J., Rignot E., Solomina O., Steffen K., Zhang T. Observations: Cryosphere / Climate Change 2013: the physical science basis. Contribution of Working group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley. Cambridge: Cambridge University Press, 2013, 1. 317-382 p.
206. Vowles T., Björk R.G. Implications of evergreen shrub expansion in the Arctic // *Journal of ecology*. 2019, v.107, N° 2, p.650-655.
207. Vuorinen K.E.M., Oksanen L., Oksanen T., Pyykonen A., Olofsson J., Virtanen R. Open tundra persist, but Arctic features decline- Vegetation changes in the warming Fennoscandian tundra // *Global Change Biology*. 2017, v.23, N° 3794-3807.
208. Walker D.A., Epstein H.E., Reynolds M.K., Kuss P., Kopecky M.A., Frost G.V., Daniels F.J.A., Leibman M.O., Moskalenko N.G., Matyshak G.V., Khitun O.V., Khomutov A.V., Forbes B.C., Bhatt U.S., Kade A.N., Vonlanthen C. Environment, vegetation and greenness (NDVI) along the North America and Eurasia Arctic transects // *Environmental Research Letters*. 2012, v.7, N° 015504, p.1-17.
209. Walter Anthony K.M., Zimov S.A., Grosse G., Jones M.C., Anthony P.M., Chapin III F.S., Finlay J.C., Mack M.C., Davydov S., Frenzel P., Frolking S. A shift of thermokarst lakes from carbon sources to sinks during the Holocene epoch. // *Nature*. 2014, v.511, N° 452-456.
210. Whiteman G., Hope C., Wadhams P. Vast cost of Arctic Change // *Nature*. 2013, v.499, N° 25 July 2013, p.401-403.
211. Williams J.W., Tarasov P.A., Brewer S., Notaro M. Late-Quaternary variations in tree cover at the northern forest-tundra ecotone // *Journal of Geophysical Research – Biogeosciences*. 2011, v.116, N° G01017, p.
212. Xu L., Myneni R.B., Chapin F.S., Callaghan T.V., Pinzon J.E., Tucker C.J., Zhu Z., Bi J., Ciais P., Tommervik H., Euskirchen E.S., Forbes B.C., Piao S.L., Anderson B.T., Ganguly S., Nemani R.R., Goetz S.J., Beck P.S.A., Bunn A.G., Cao C., and Stroeve J.C. Temperature and vegetation seasonality diminishment over northern lands // *Nature Climate Change*. 2013, v.3, N° 581-586.