

Прогноз регионального изменения климата на 2023–2064 годы в западной и центральной части Российской Арктики

А.Г. Костяной, Гвишиани А.Д., Лебедев С.А.,
Розенберг И.Н., Красноперов Р.И., Дубчак И.А.,
Гвоздик С.А., Шевалдышева О.О., Сергеев В.Н.,
Николова Ю.И.

Геофизический центр РАН, Российский университет
транспорта, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

Мотивация

Наблюдаемое изменение климата оказало значительное влияние на инфраструктуру наземного транспорта, включая автомобильные и железные дороги, мосты, морские порты, взлетно-посадочные полосы. Оно также влияет на управление дорожным движением и эффективность транспортной системы, влияя на расходы на техническое обслуживание, безопасность поездок и скорость транспортных потоков. Эта проблема особенно актуальна для Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ), которая переживает бурное экономическое развитие. Несмотря на расширение технологической инфраструктуры, регион остается крайне уязвимым к последствиям изменения климата. Наблюдаемые и прогнозируемые изменения температуры воздуха и почвы и некоторых других метео параметров, как правило, оказывают негативное влияние на состояние и функционирование транспортной инфраструктуры. Основные виды негативных последствий, связанных с изменением климата, уже проявились, и ожидается, что эти тенденции усилятся к середине XXI века. В данном докладе представлена оценка регионального изменения климата в западной и центральной частях Российской Арктики на основе климатических прогнозов и социально-экономических сценариев на 2023–2064 годы.

Предпосылки

Грант РФФИ N 21-77-30010 (2021-2024) «Системный анализ динамики геофизических процессов в российской Арктике и их воздействие на развитие и функционирование инфраструктуры железнодорожного транспорта»

Продолжение - Грант № 21-77-30010-П (2025-2027)

Партнеры:

Научно-исследовательский институт автоматизации, информатизации и связи на железнодорожном транспорте (ОАО «НИИАС» РЖД) – головной институт отрасли железнодорожного транспорта в создании комплексов и систем обеспечения безопасности движения, управления движением, геоинформационного обеспечения, мониторинга состояния подвижного состава и инфраструктуры железных дорог.

Российский университет транспорта (РУТ)

Научная основа

Gvishiani A.D., Rozenberg I.N., Soloviev An.A., Kostianoy A.G., Gvozdik S.A., Serykh I.V., Krasnoperov R.I., Sazonov N.V., Dubchak I.A., Popov A.B., Kostianaia E.A., Gvozdik G.A. Electronic atlas of climatic changes in hydrometeorological parameters of the western part of the Russian Arctic for 1950–2021 as geoinformatic support of railway development. – Applied Sciences, 2023, 13, 5278, <https://doi.org/10.3390/app13095278>

Gvishiani A.D., Rozenberg I.N., Soloviev A.A., Krasnoperov R.I., Shevaldysheva O.O., Kostianoy A.G., Lebedev S.A., Dubchak I.A., Nikitina I.M., Gvozdik S.A., Sergeev V.N., Gvozdik G.A. Study of the impact of climatic changes in 1980–2021 on railway infrastructure in the Central and Western Russian Arctic based on Advanced Electronic Atlas of hydrometeorological parameters (Version 2, 2023). – Russ. J. Earth Sci., 2023, 23, ES5006, EDN: ILWXRC, <https://doi.org/10.2205/2023es000882>

Kostianoy A.G., Gvishiani A.D., Rozenberg I.B., Krasnoperov R.I., Gvozdik S.A., Lebedev S.A., Nikitina I.M., Dubchak I.A., Shevaldysheva O.O., Sergeev V.N. and Gvozdik G.A. Geoinformation analysis of regional climatic changes in the Central and Western Russian Arctic for railway development. – Russian Journal of Earth Sciences, 2025, 25, ES1005, EDN:OAMXSW, <https://doi.org/10.2205/2025es000956>

Kostianoy A.G., Gvishiani A.D., Lebedev S.A., Rozenberg I.N., Krasnoperov R.I., Dubchak I.A., Gvozdik S.A., Shevaldysheva O.O., Sergeev V.N., Nikolova J.I. Forecast of regional climate change for 2023–2064 in the Western and Central Russian Arctic: Geoinformation support for railway development. – Geography, Environment, Sustainability, 2025 (in press)

Район исследования



Метео параметры

Температура воздуха

Температура поверхности почвы

Атмосферные осадки

Толщина снежного покрова

Приповерхностная скорость ветра

Влажность в верхней части толщи почвы

Относительная влажность воздуха

Климатическая модель - CNRM-CM6-1-HR

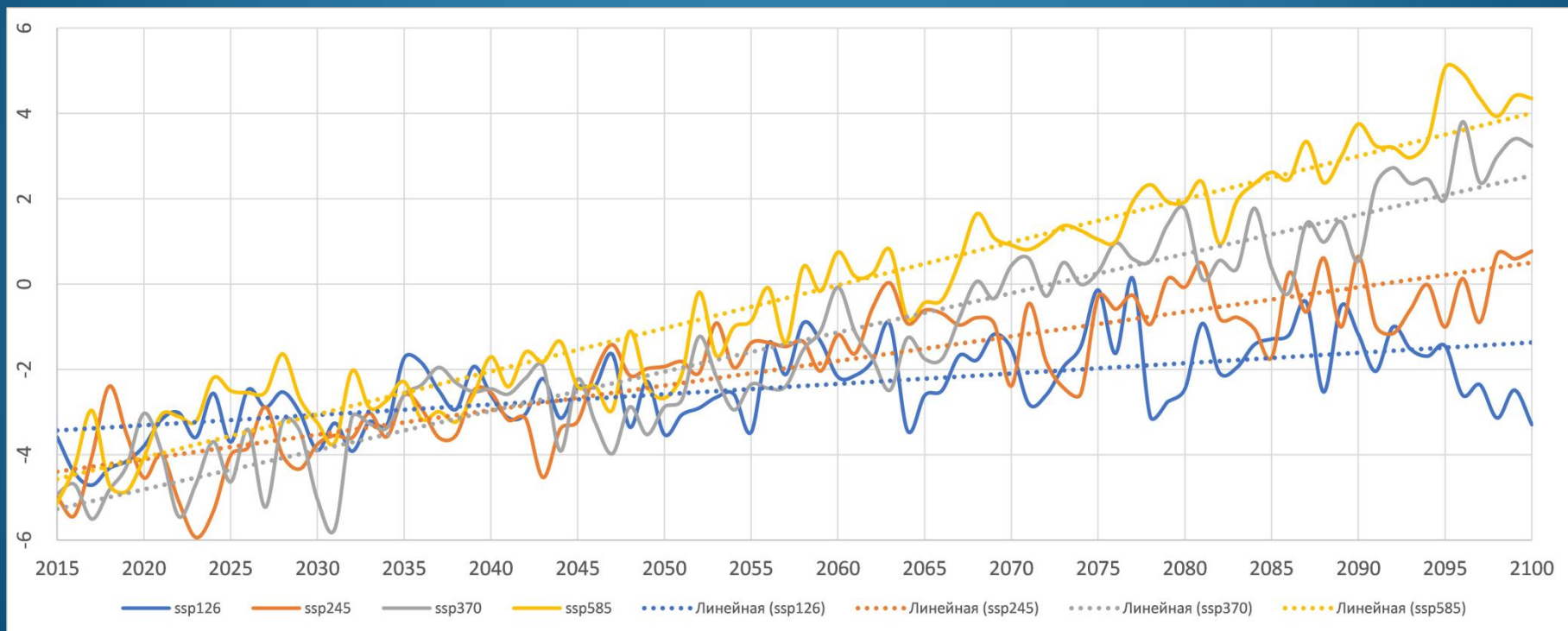
Рассмотрены 8 моделей из CMIP6, разработанных институтами Франции, Китая, США, Италии, Тайваня и совместной группой ЕС. Модель CNRM-CM6-1-HR, разработанная совместной группой Национального центра метеорологических исследований (CNRM) и Европейского центра передовых исследований и подготовки кадров в области научных вычислений (CERFACS) в 2017 году, включает в себя весь список выбранных параметров для всех сценариев (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, and SSP5-8.5), имеет наивысшее пространственное разрешение и рассчитывает прогноз с 2015 по 2100 год. Эта модель широко используется в научных исследованиях и показывает высокие результаты оценки надежности. Она была выбрана для настоящего исследования.

В результате были составлены и проанализированы 231 карта прогнозируемых изменений 7 основных гидрометеорологических параметров на период 2023–2064 гг. по трём сценариям изменения климата SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5. Перечень этих карт представлен в Таблице. Помимо анализа, было проведено сравнение прогнозных данных с данными за период 1980–2021 гг. для оценки тенденций изменения климата и проверки соответствия данных моделей MERRA-2 (Атлас 1980–2022) и CNRM-CM6-1-HR на 2022 год.

	Наименование вида прогнозных данных	
	Средние прогнозные значения параметра за октябрь 2023–2064 гг.	21
	Средние прогнозные значения параметра за июль 2023–2064 гг.	21
	Средние прогнозные значения параметра за апрель 2023–2064 гг.	21
	Средние прогнозные значения параметра за январь 2023–2064 гг.	21
	Прогнозные изменения параметра между периодами 2053–2064 гг. и 1980–1989 гг.	21
	Средняя скорость изменения прогнозных значений параметра за 2023–2064 гг.	21
	Прогнозные изменения параметра между периодами 2043–2064 гг. и 2023–2042 гг.	21
	Средние прогнозные значения параметра за периоды 2043–2064 гг.	21
	Средние прогнозные значения параметра за периоды 2023–2042 гг.	21
	Средние прогнозные значения параметра за период 2023–2064 гг.	21
	Средние прогнозные значения параметра за 2022 г.	21
	Всего	231

Температура воздуха

Межгодовая изменчивость с 2015 по 2100 год и линейные тренды. Самый оптимистический сценарий SSP1-2.6 дает прирост температуры воздуха к 2100 г. всего в 1-2 градуса, в то время как наихудший сценарий SSP5-8.5 дает прирост в 8 градусов. Соответственно, ведут себя и линейный тренды межгодовой изменчивости для периода 2015-2100 гг. $0,24^{\circ}\text{C}/10$ лет для SSP1-2.6 и $1,01^{\circ}\text{C}$ для SSP5-8.5.



Основные характеристики межгодовой изменчивости температуры воздуха по 4 сценариям изменения климата для различных временных интервалов

Параметр	Ед. измер.	Годы	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
Линейный тренд	°C/10 лет	2015-2100	0,24	0,58	0,92	1,01
Линейный тренд	°C/10 лет	2023-2064	0,29	0,93	0,68	0,77
Среднее значение	°C	2022	-3,02	-5,09	-5,45	-3,11
Среднее значение	°C	2023-2064	-2,62	-2,65	-2,81	-1,79
Разница между периодами	°C	(2043-2064)-(2023-2042)	0,55	1,81	1,11	1,55

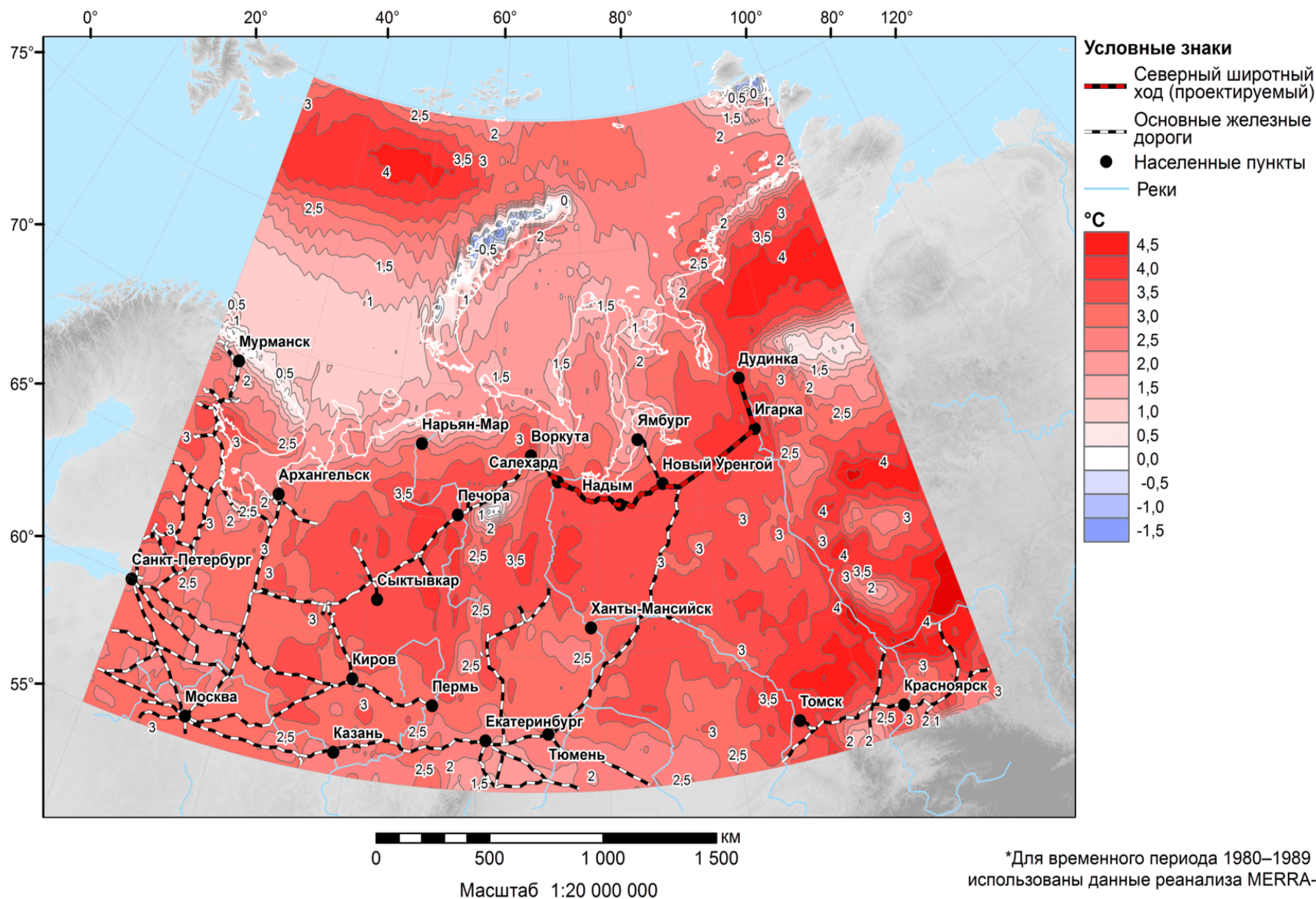
Среднее пространственное распределение температуры воздуха за 2023-2064 гг. по «оптимистическому» сценарию SSP1-2.6 и «пессимистическому» сценарию SSP5-8.5 показывает, что все изотермы продвинутся на север или северо-восток на 150-300 км относительно их положения в 2022 г., и только участки железных дорог к северо-востоку от условной линии Печора – Ханты-Мансийск будут, по-прежнему, находится, в среднем, при отрицательных среднегодовых температурах, а Северный широтный ход будет, по-прежнему, эксплуатироваться в самых суровых условиях.

Карты приращений температуры воздуха между двумя периодами 2043-2064 гг. и 2023-2042 гг., которые прогнозируется по сценариям SSP1-2.6 SSP5-8.5, показывают, что по оптимистическому сценарию увеличение температуры воздуха произойдет на 0.3-0.9°C, причем наибольший прирост будет происходить на востоке исследуемого региона – восточнее условной линии Томск – Ханты-Мансийск – Надым – Ямбург. По наиболее пессимистическому сценарию прирост температуры составит 1.5-1.8°C, при этом он будет более равномерным по исследуемому региону.

Усреднение температуры по будущим 20-летним периодам несколько сглаживают картину изменения температуры воздуха. Наиболее ярко ожидаемые изменения температуры воздуха в последнее десятилетие изучаемого срока (2053-2064 гг.) можно оценить в сравнении с 1980-1989 гг, периодом, который считается стабильным с точки зрения изменения климата и относительно которого, обычно, и проводятся все сравнения текущих и будущих изменений климата. На рисунках (следующий слайд) показан прирост температуры в 2053-2064 гг. относительно 1980-1989 гг. по указанным двум сценариям. По сценарию SSP1-2.6 прирост составит от 2 до 3.5°C, причем чем севернее изучаемая область, тем больше ожидается приращение температуры. По сценарию SSP5-8.5 увеличение температуры ожидается еще большим и достигнет 4-5°C. Наибольший прирост также будет наблюдаться в районе Северного широтного хода.

Скорость роста температуры воздуха в исследуемом регионе, рассчитанная за период 2023-2064 гг. по двум сценариям показала, что она меняется от 0.1°C/10 лет в районе Казань – Пермь – Екатеринбург – Тюмень до 0.5°C/10 лет в районе Новый Уренгой – Игарка – Дудинка по сценарию SSP1-2.6 и от 0.7 до 1.0°C/10 лет по сценарию SSP5-8.5, причем наибольшая скорость роста будет наблюдаться вновь в районе Северного широтного хода от Салехарда до Дудинки.

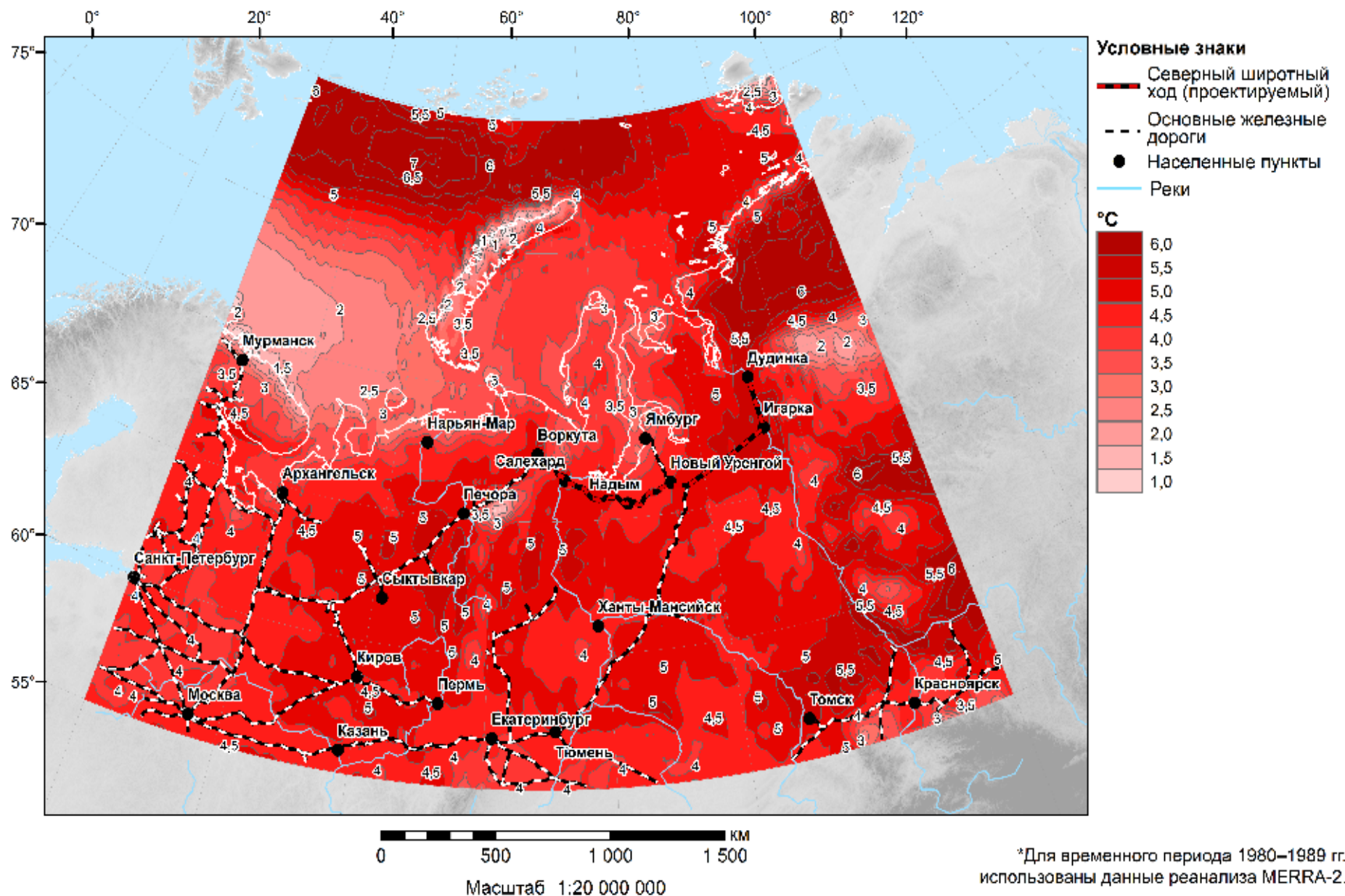
**Прогностические изменения температуры воздуха у поверхности
между периодами 2053–2064 гг. (по сценарию SSP1-2.6) и 1980–1989 гг.*.**



*Для временного периода 1980–1989 гг. использованы данные реанализа MERRA-2.

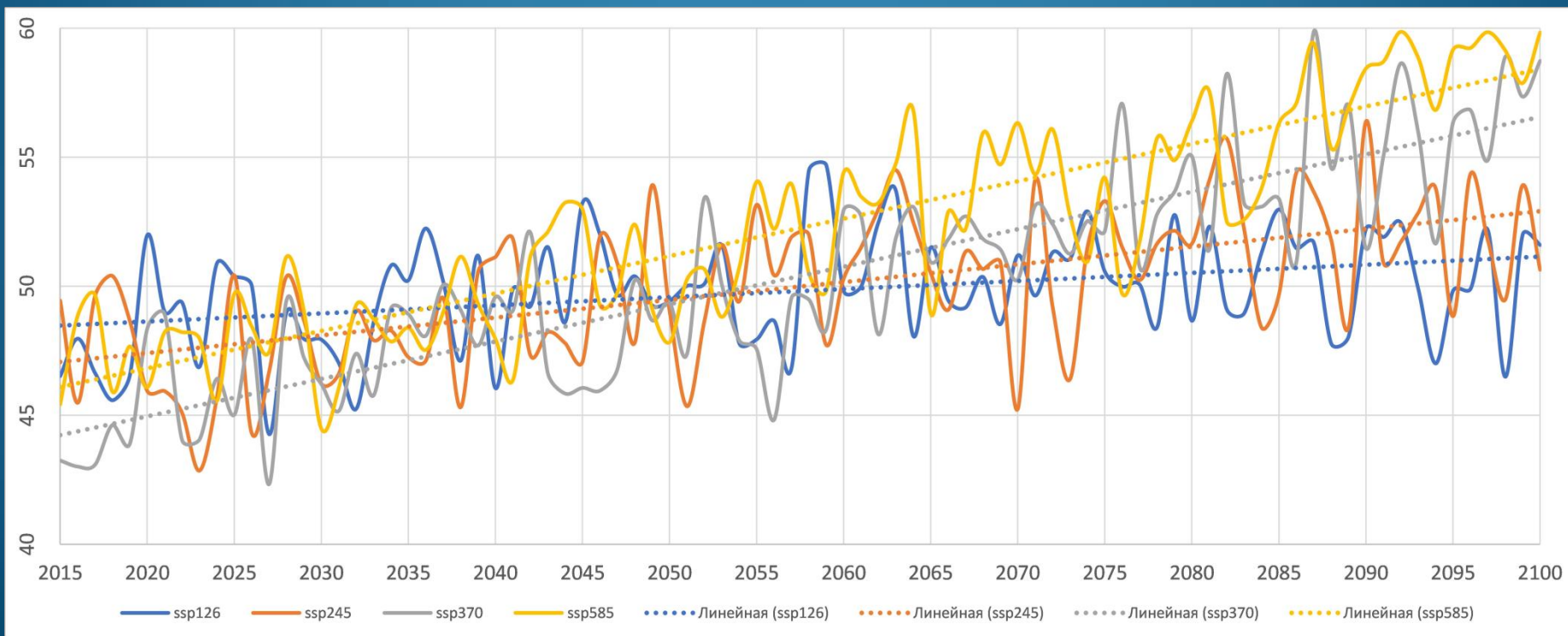
Равнопромежуточная коническая проекция

**Прогностические изменения температуры воздуха у поверхности
между периодами 2053–2064 гг. (по сценарию SSP5-8.5) и 1980–1989 гг.***



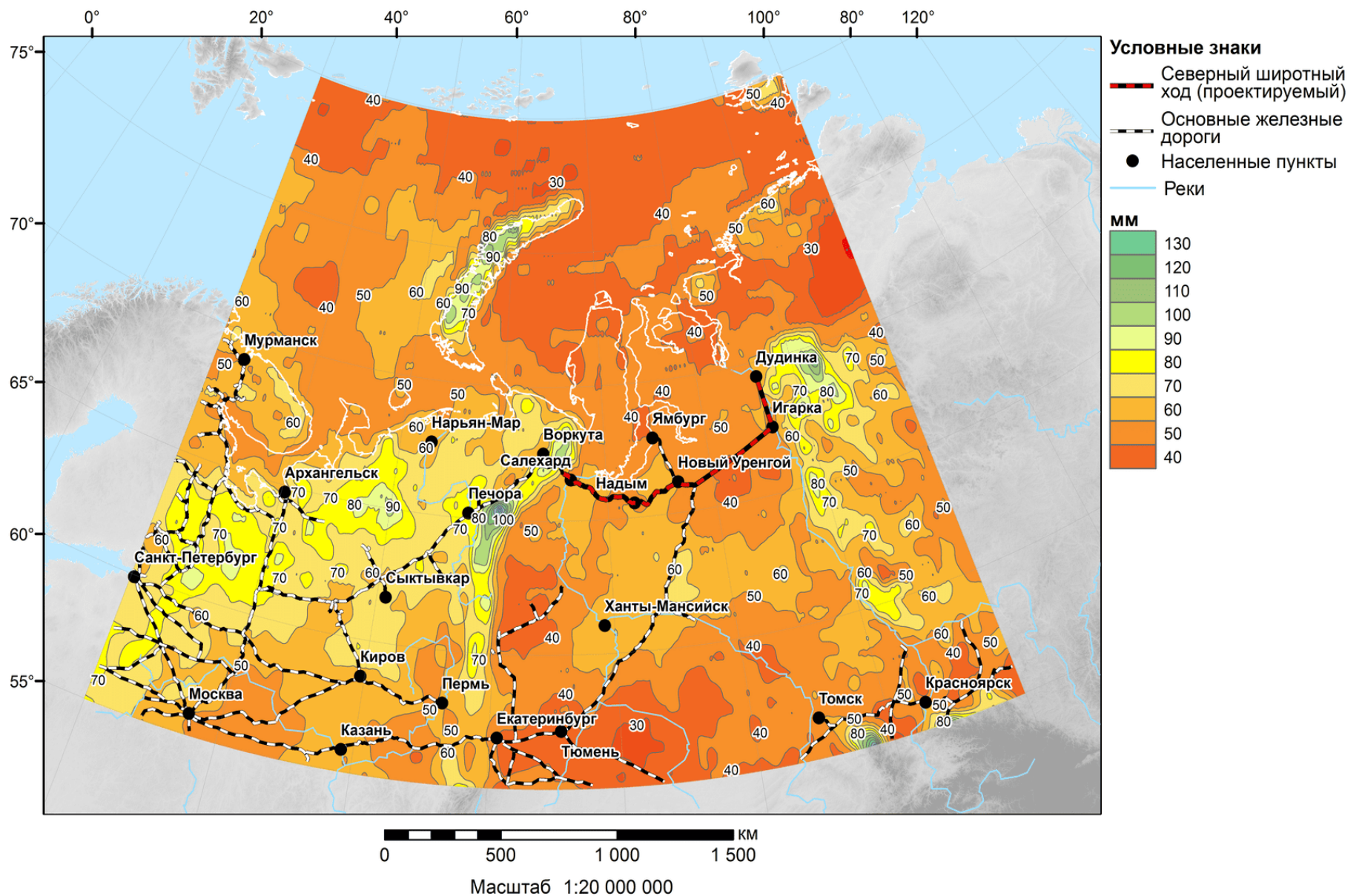
Атмосферные осадки

Самый оптимистический сценарий SSP1-2.6 дает прирост осадков к 2100 г. всего на 2 мм/мес, в то время как наихудший сценарий SSP5-8.5 дает прирост на 12 мм/мес. Соответственно, ведут себя и линейный тренды межгодовой изменчивости для периода 2015-2100 гг.: 0,31мм/мес/10 лет для SSP1-2.6 и 1.45 мм/мес/10 лет для SSP5-8.5.



Пространственные распределения осадков достаточно близки друг к другу, однако, по сценарию SSP5-8.5 к западу от Уральских гор значения осадков несколько выше, чем по сценарию SSP1-2.6. Между Уралом и Енисеем находится регион, где выпадает несколько меньше осадков, но по сценарию SSP5-8.5 их примерно на 10 мм/мес больше, чем по сценарию SSP1-2.6. К востоку от Енисея находится третий район, который по осадкам также отличается в большую сторону, как и северо-запад Европейской части РФ, и там также по сценарию SSP5-8.5 осадков выпадает примерно на 10 мм/мес больше, чем по сценарию SSP1-2.6. Регион с самыми большими осадками (до 100 мм/мес) находится вдоль Уральских гор и к востоку от Дудинки. Поэтому на участок железной дороги от Печоры до Воркуты следует обратить особое внимание .

Средние прогностические значения общего количества осадков
за 2022 г. по сценарию SSP1-2.6



Равнопромежуточная коническая проекция

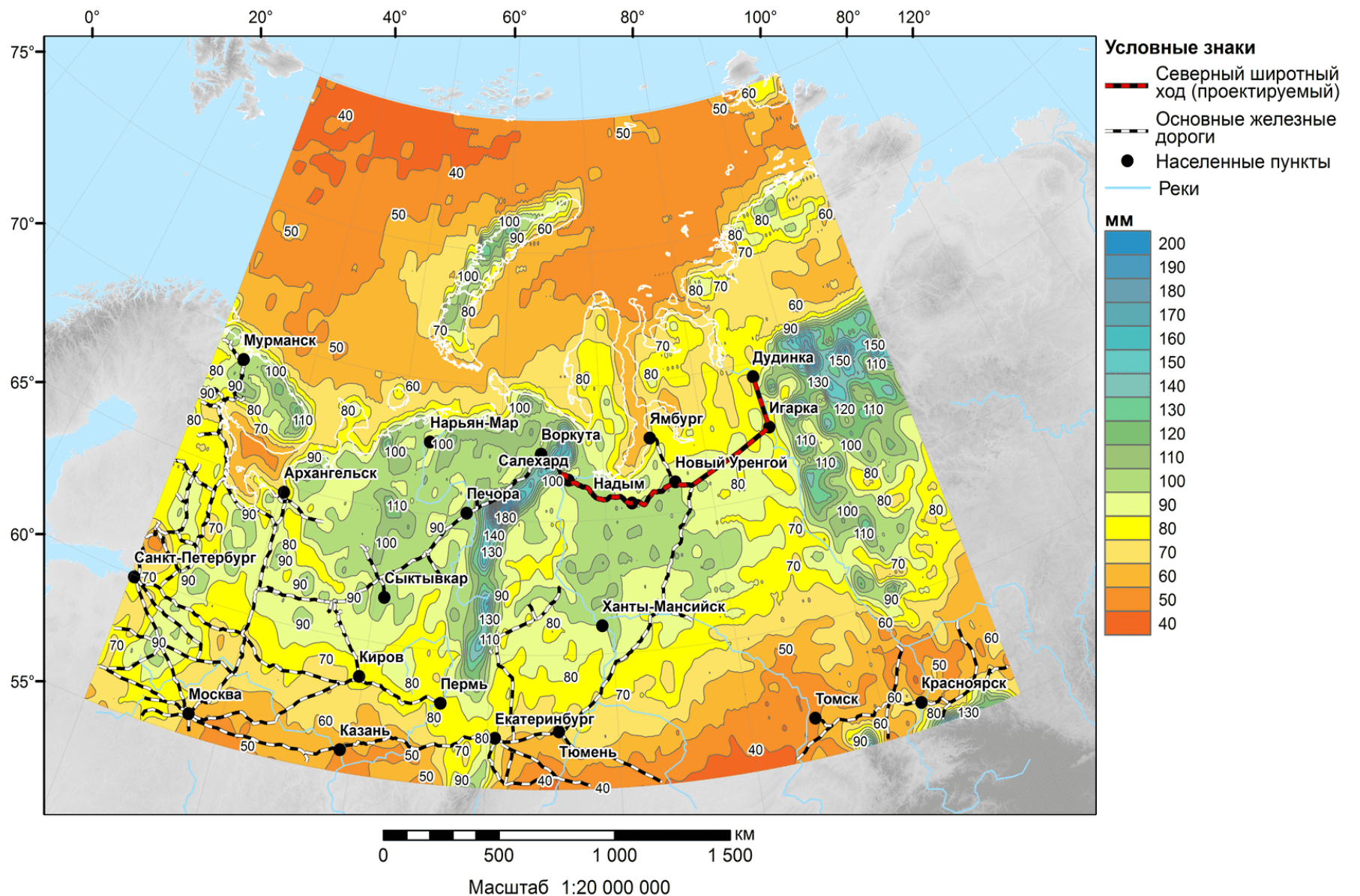
Подтверждению данных опасений явился сход с рельсов 9 вагонов пассажирского поезда № 511 (Воркута – Новороссийск) на перегоне Инта-1 — Угольный Северной железной дороги в Коми 26 июня 2024 г. в результате подмыва полотна после обильных осадков



Сход с рельсов пассажирского поезда в июне 2024 г.
(фото – <https://www.rbc.ru/photoreport/27/06/2024/667d0bef9a79473a31039611>)

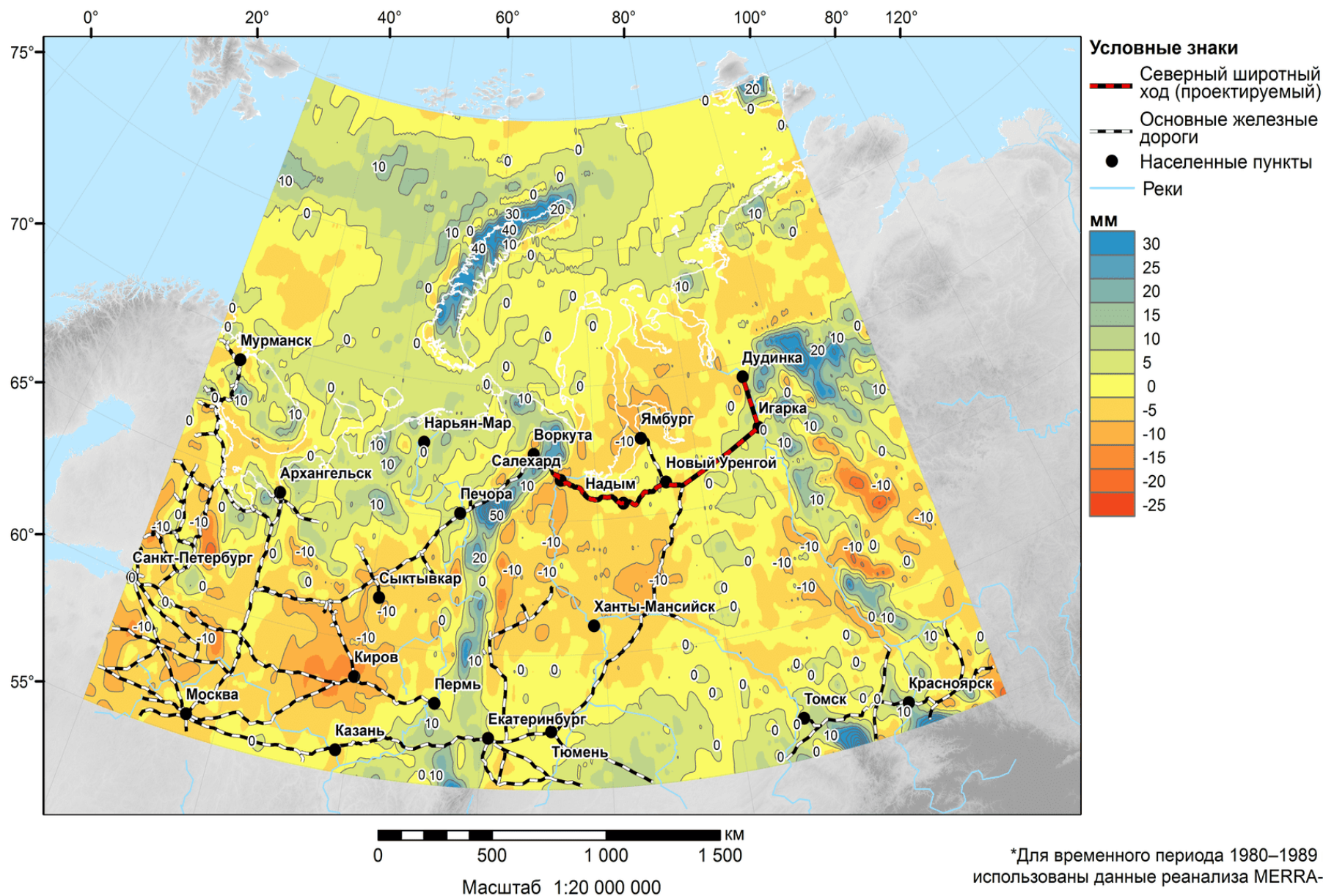
Среднее пространственное распределение атмосферных осадков за 2023-2064 гг. по тем же двум сценариям показывает, что все основные пространственные особенности распределения осадков – наличие трех регионов с четко разделяющимся режимом осадков – присутствуют и на этих картах. Значения атмосферных осадков еще выросли процентов на 20 и достигли 120 мм/мес в районе Уральских гор (к востоку от Печоры) и к востоку от Дудинки. Участок железной дороги в районе Печоры и в будущем будет оставаться одним из наиболее опасных с точки зрения возможного подмыва железнодорожного полотна. Это подтверждают и карты сезонной изменчивости атмосферных осадков. Например, в июле ожидается выпадения очень большого количества осадков по обоим сценариям – до 200 мм/мес, причем максимум снова прогнозируется в тех же выделенных районах

Средние прогностические значения общего количества осадков за июль 2023–2064 гг. по сценарию SSP1-2.6



Равнопромежуточная коническая проекция

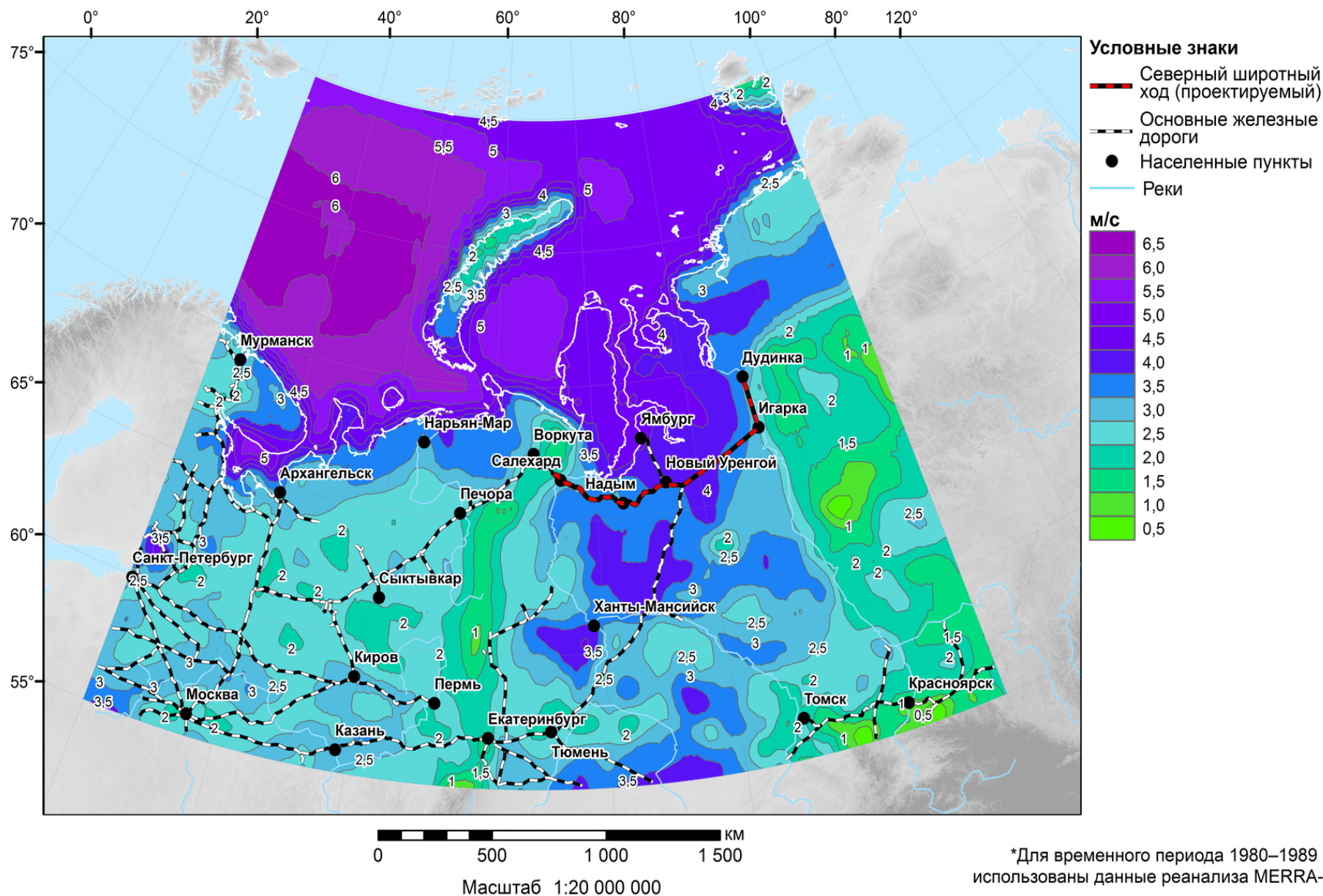
**Прогностические изменения общего количества осадков
между периодами 2053–2064 гг. (по сценарию SSP5-8.5) и 1980–1989 гг.*.**



*Для временного периода 1980–1989 гг. использованы данные реанализа MERRA-2.

Равнопромежуточная коническая проекция

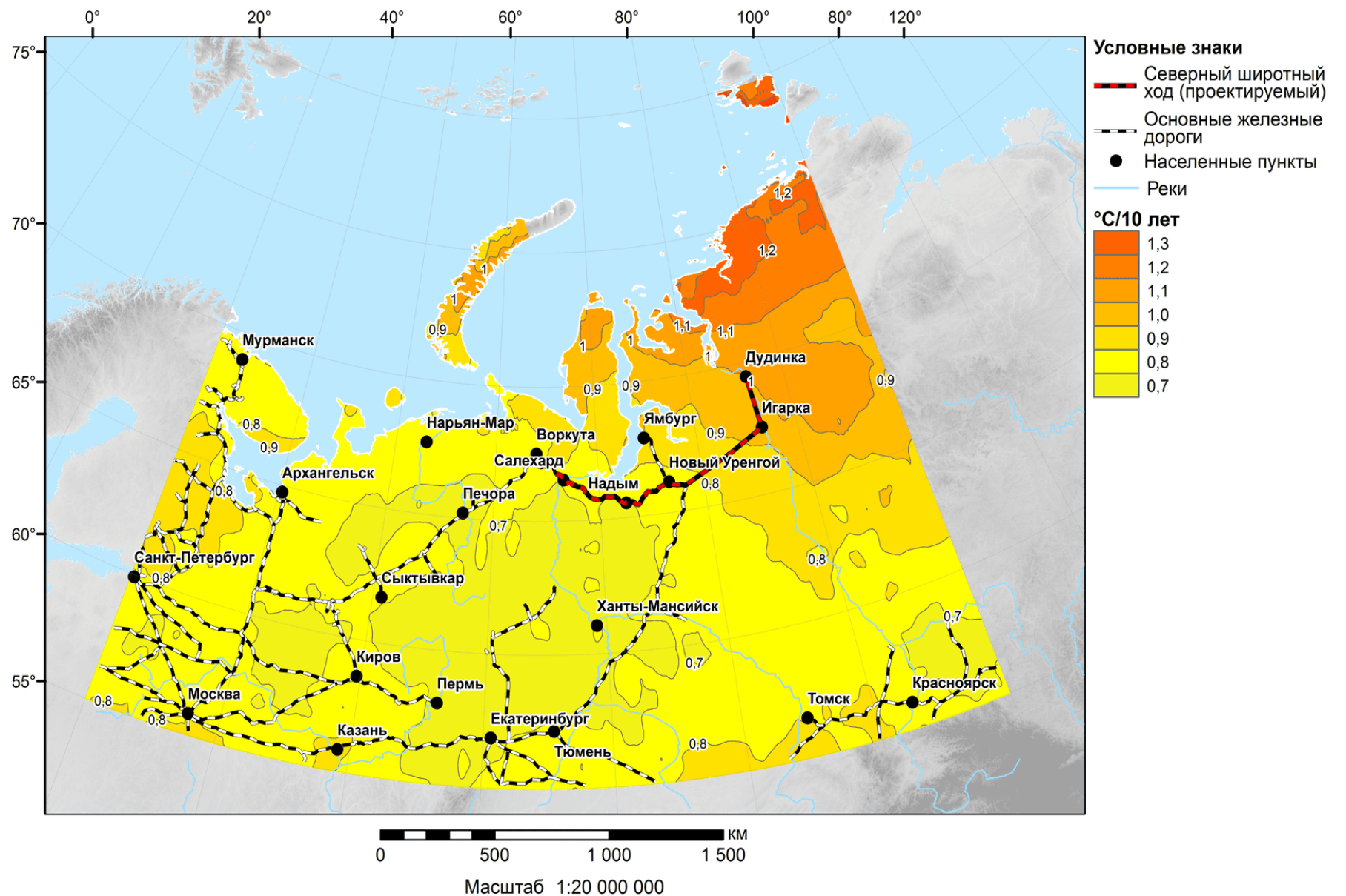
Прогностические изменения скорости ветра у поверхности
между периодами 2053–2064 гг. (по сценарию SSP1-2.6) и 1980–1989 гг.*.



*Для временного периода 1980–1989 гг.
использованы данные реанализа MERRA-2.

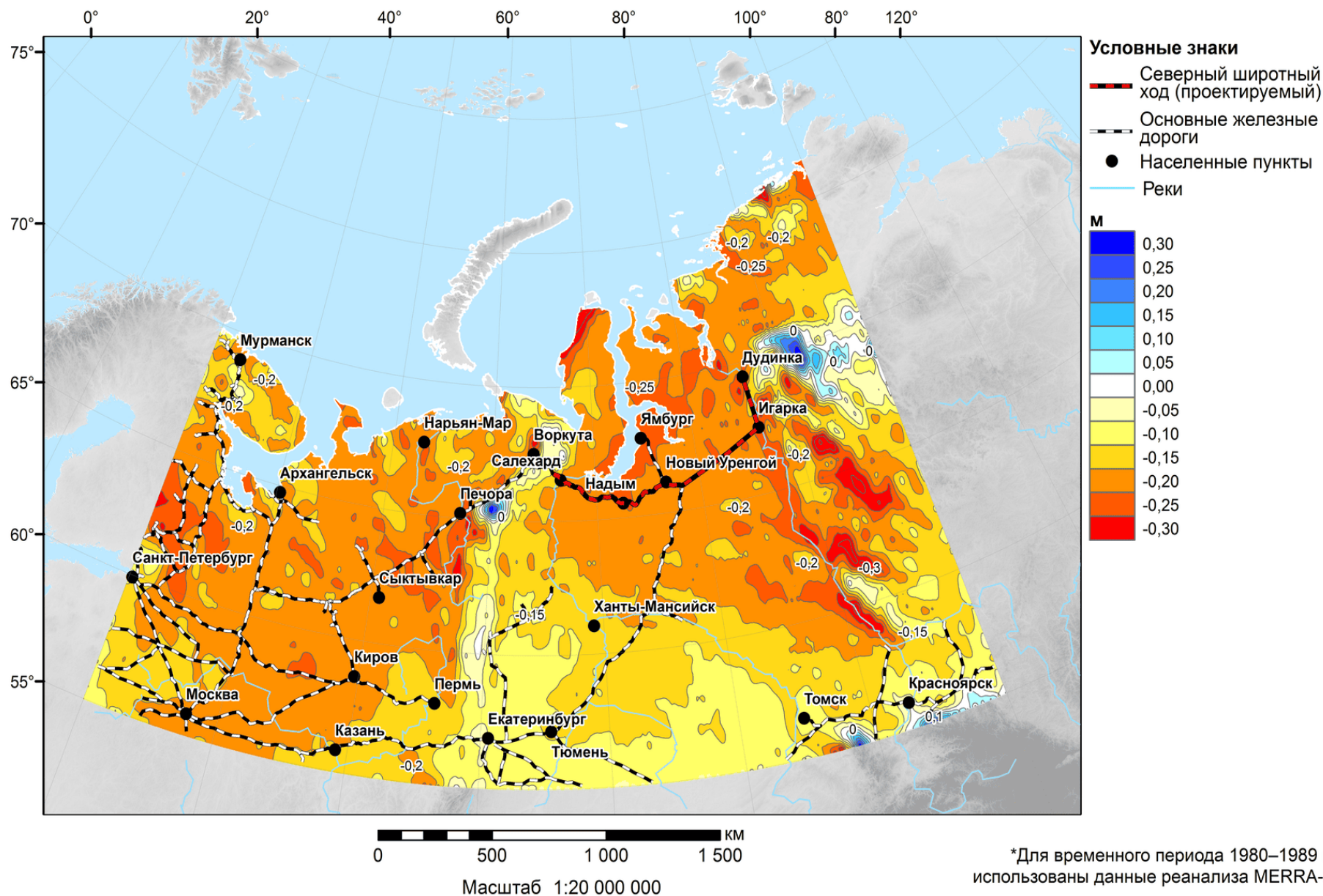
Равнопромежуточная коническая проекция

Средняя скорость изменения прогностических значений температуры почвы за период 2023–2064 гг. по сценарию SSP5-8.5



Равнопромежуточная коническая проекция

**Прогностические изменения толщины снежного покрова
между периодами 2053–2064 гг. (по сценарию SSP5-8.5) и 1980–1989 гг.*.**



*Для временного периода 1980–1989 гг. использованы данные реанализа MERRA-2.

Равнопромежуточная коническая проекция

Ключевые результаты анализа региональных карт основных гидрометеорологических параметров:

Температура воздуха.

Наиболее выраженное потепление прогнозируется в рамках SSP5-8.5 с ростом до 8 °C к 2100 году (линейный тренд: 1,01 °C/10 лет) по сравнению с 1–2 °C в рамках SSP1-2.6. Наибольшие темпы потепления будут наблюдаться в районе Северного Ледовитого океана: зимние температуры останутся ниже -20 °C, но летние значительно повысятся. Нелинейная изменчивость подчёркивает сложность температурных трендов с краткосрочными отклонениями между сценариями.

Осадки.

Ожидается, что количество осадков увеличится на 12 мм/месяц в рамках SSP5-8.5 к 2100 году, при этом наибольший рост (до 120 мм/месяц) будет наблюдаться в Уральских горах и районах к востоку от Дудинки. Участок железной дороги Печора-Воркута особенно уязвим к сильным дождям, о чем свидетельствует сход с рельсов в 2024 году, связанный с размывом. Пространственная неоднородность изменения количества осадков может усугубить риски региональных наводнений.

Скорость ветра.

Прогнозируется незначительное увеличение скорости ветра, при этом наиболее сильные ветры (>5 м/с) будут наблюдаться в районах Северного линейного округа и Тюменской области. Сезонные пики приходятся на весну (6,6 м/с), что создает риски для инфраструктуры. Сценарий SSP5-8.5 прогнозирует смещение скорости ветра к югу, что может повлиять на сельскохозяйственные и транспортные системы.

Температура почвы.

Тенденции к потеплению наиболее выражены в рамках сценария SSP5-8.5 (1,04 °C/10 лет), при этом самые высокие темпы потепления наблюдаются в районе Северного линейного округа. Деградация вечной мерзлоты может дестабилизировать инфраструктуру.

Влажность почвы. Прогнозируется увеличение на 10–50% к 2100 году, при этом северные регионы останутся более влажными. Однако в рамках сценария SSP5-8.5 может наблюдаться снижение влажности в районе Северного широтного хода, что повлияет на экосистемы и строительство.

Влажность воздуха.

В большинстве сценариев, за исключением сценария SSP1-2.6, ожидается снижение на 1–2% к 2100 году. Абсолютная влажность воздуха увеличивается с повышением температуры, особенно в районе СШХ, влияя на скорость испарения и круговорот воды в природе.

Толщина снежного покрова.

Толщина снежного покрова уменьшится на 25–35 см в южных и западных регионах к 2053–2064 годам, но увеличится к востоку от Урала в рамках сценария SSP5-8.5. Это может изменить режим весенних паводков и зимнюю транспортную логистику.

Прогнозируемые изменения подчеркивают уязвимость АЗРФ к изменению климата, особенно в таких зонах с развитой инфраструктурой, как СШХ.

Повышение температуры и количества осадков поставит под угрозу устойчивость вечной мерзлоты, а изменчивость ветра и снега может нарушить работу транспортных сетей. Различия между сценариями изменения климата подчеркивают необходимость разработки адаптивных стратегий устойчивого развития транспортных сетей. Лицам, принимающим решения, необходимо отдавать приоритет устойчивой инфраструктуре, системам раннего оповещения и региональным климатическим моделям для снижения ожидаемых рисков.

Благодарность:

Исследование выполнено в рамках Гранта РНФ N 21-77-30010 (2021-2024)
«Системный анализ динамики геофизических процессов в российской Арктике
и их воздействие на развитие и функционирование инфраструктуры
железнодорожного транспорта» и его продления - Грант № 21-77-30010-П (2025-
2027)

Спасибо за внимание!