УДК 551.583

МОДЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЙ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ КРИОЛИТОЗОНЫ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ В XXI в.

© 2025 г. М. М. Аржанов^{1,*}, И. И. Мохов^{1,2}

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской Академии наук, Москва, Россия ²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия *e-mail: arzhanov@ifaran.ru

Поступила 04.10.2024 г. После доработки 12.12.2024 г. Принята к печати 25.12.2024 г

Получены оценки изменений криолитозоны Северного полушария по расчётам с климатическими моделями проекта СМІР6 при разных сценариях для XXI в. Максимальный тренд площади криолитозоны в XXI в. при сценарии ssp5-8.5 оценен равным –125 тыс. км²/год, а её чувствительность к изменению глобальной приповерхностной температуры оценена равной –3.3, –2.9 и –2.1 млн км²/°С при сценариях ssp1-2.6, ssp2-4.5 и ssp5-8.5.

Ключевые слова: изменения климата, криолитозона, температурно-климатические индексы, глобальные климатические модели, CMIP6

DOI: 10.31857/S2076673425010116, EDN: GYCUUZ

введение

Данные инструментальных измерений и результаты численного моделирования свидетельствуют о повышении температуры многолетнемёрзлых пород при наблюдаемых климатических изменениях (Zhang, Stamnes, 1998; Smith et al., 2010; Anisimov, Zimov, 2020; Vasiliev et al., 2020), наиболее значительных в высоких широтах Северного полушария (Анисимов и др., 2002; Мохов и др., 2002; Мохов и др., 2005; Мохов и др., 2008). При этом отмечено, что максимальный тренд среднегодовой температуры пород для верхних горизонтов (до 10 м) в Евразии, в северной части Западной Сибири, во второй половине XX в. – около 0.05 °С/год (Павлов, Малкова, 2009: Аржанов, Мохов, 2013), увеличился до 0.20 °С/год в 2008-2017 гг. (Бабкина и др., 2019). Прогнозируется, что подобная тенденция сохранится при ожидаемых в XXI в. климатических изменениях (Anisimov, Nelson, 1996; Stendel, Christensen, 2002; Lawrence, Slater, 2005; Павлова и др., 2007; Аржанов и др., 2013).

Повышение температуры мёрзлых пород способствует активизации деструктивных геокриологических процессов, в том числе развитию термокарста и просадкам поверхности грунта (Аржанов и др., 2010; Wagner et al., 2018) с неблагоприятными последствиями для природных экосистем и инфраструктуры (Jorgenson et al., 2001; IPCC, 2022).

Также при повышении температуры мёрзлых пород снижается их прочность и нарушаются равновесные термобарические условия реликтовых газогидратов, сформированных под действием внешней нагрузки в периоды оледенения (Аржанов, Мохов, 2017; Аржанов, Малахова, 2023), с увеличением риска выбросов газа в результате дестабилизации (Кіzyakov et al., 2017; Dvornikov et al., 2019; Arzhanov et al., 2020). Деградация многолетнемёрзлых пород способствует включению в глобальный биогеохимический цикл слоёв грунта с высоким содержанием органического вещества (Hugelius et al., 2013; Аржанов, Moxoв, 2014; Schuur et al., 2015; Kleinen, Brovkin, 2018), что наряду с изменением гидрологического режима (Мохов, Хон, 2002; Аржанов и др., 2008; Gelfan et al., 2017) способствует увеличению эмиссии метана в атмосферу с соответствующим усилением парникового эффекта (Wahlen, 1993; Елисеев и др., 2008; Денисов и др., 2015; Anisimov, Zimov, 2020).

Важно отметить, что скорость современного потепления на временных масштабах нескольких десятилетий существенно превышает значения для эпох климатических оптимумов прошлого, длившихся тысячи и десятки тысяч лет (Демченко и др., 2002). В (Мохов, Елисеев, 2012) показано, что при изменениях климата в соответствии со сценариями семейства RCP (van Vuuren et al., 2011), в частности, при наиболее агрессивном сценарии RCP8.5 для XXI в. и фиксированными на уровне 2100 г. антропогенными воздействиями в соответствии с протоколом CMIP5 (Taylor et al., 2012) для XXII—XXIII вв. приповерхностные многолетнемёрзлые породы в Северном полушарии должны исчезнуть в XXIII в. При этом модельные оценки скорости деградации мёрзлых пород в Западной Сибири (п-ов Ямал) в XXII—XXIII вв. достигают максимальных значений около 0.2 м/год, а полная деградация мёрзлой толщи мощностью около 450 м в этом регионе может произойти в течение последующих 15 тыс. лет (Мохов и др., 2022).

В работе анализируется отклик на прогнозируемые изменения климата в XXI в. приповерхностных многолетнемёрзлых пород с сезонным протаиванием в верхних горизонтах (далее ММП). При этом использовались различные индексы на основе приповерхностной температуры атмосферы (на высоте 2 м) и температуры пород по расчётам с ансамблем глобальных климатических моделей международного проекта СМІР6 (Eyring et al., 2016) при различных сценариях антропогенных воздействий.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Для определения границ сплошной, прерывистой и островной мерзлоты, а также соответствующих площадей использовались индексы, характеризующие локальные климатические условия существования мёрзлых пород (Демченко и др., 2002) (см. также (Анисимов. Нельсон, 1990: Мохов и др., 2002; Демченко и др., 2006). В том числе использовались модифицированный воздушно-мерзлотный инлекс (FI) на основе приповерхностной температуры (Nelson, Outcalt, 1987) и почвенно-мерзлотный индекс (SFI), дополнительно учитывающий теплоизолирующее влияние снежного покрова (Guo, Wang, 2016). Инлексы, в частности, рассчитывались согласно (Nelson, Outcalt, 1987) при синусоидальном годовом ходе температуры. При этом границам зон сплошной, прерывистой и островной мерзлоты соответствуют значения индексов 0.5, 0.6 и 0.67, соответственно. Пространственное положение границ и площадь многолетнемёрзлых пород определялись также по достижению отрицательных значений среднегодовой температуры пород на протяжении не менее двух лет (Slater, Lawrence, 2013).

При анализе использовались расчёты с климатическими моделями, содержащие необходимые переменные — приповерхностную температуру, водно-эквивалентную и геометрическую толщину снежного покрова, профили температуры грунта (табл. 1). Глубина расчётной области в грунте для выбранного ансамбля моделей изменяется от 2 до 65 м. В связи с этим для всех выбранных моделей анализировалась среднегодовая температура грунта на глубине 2 м (индекс MST2). Следует отметить, что при относительно небольшой глубине расчётной области, сопоставимой с глубиной сезонного промерзания/протаивания, можно ожидать ухудшения точности расчёта распределения

Модели		Разрешение	Глубина в грунте, м	Институт, страна		
1	BCC-CSM2-MR	320×160 (T106)	2.9	Beijing Climate Center, Китай		
2	CNRM-ESM2-1	256×128 (T127)	10.0	Centre National de Recherches Meteorologiques, Франция		
3	CanESM5	128×64 (T63)	4.1	Canadian Centre for Climate Modelling and Analy sis, Environment and Climate Change, Канада		
4	GISS-E2-1-G	144×90	2.7	Goddard Institute for Space Studies, CШA		
5	IPSL-CM6A-LR	144×143	65.6	Institut Pierre Simon Laplace, Франция		
6	MIROC6	256×128 (T85)	9.0	Japan Agency for Marine-Earth Science and Tech- nology, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, Япония		
7	MRI-ESM2-0	320×160 (TL159)	8.5	Meteorological Research Institute, Япония		
8	NorESM2-LM	144×96	42.0	Center for International Climate and Environmen- tal Research, Norwegian Meteorological Institute, Nansen Environmental and Remote Sensing Center, Норвегия		
9	UKESM1-0-LL	192×144 (N96)	2.0	Met Office Hadley Centre, Великобритания		

Таблица 1. Используемые глобальные климатические модели международного проекта СМІР6

температуры пород по глубине из-за влияния нижнего граничного условия (Alexeev et al., 2007). Так, в (Slater, Lawrence, 2013) наличие/отсутствие ММП определялось на основе температуры пород ниже границы слоя сезонного протаивания/промерзания — на глубине 3.5 м. В работе был проведён также анализ температуры пород на глубине 3.5 м (индекс MST3) для шести моделей ансамбля: CNRM-ESM2-1, CanESM5, IPSL-CM6A-LR, MIROC6, MRI-ESM2-0, NorESM2-LM.

Результаты модельных расчётов применялись при сценарии "Historical" для периода 2000–2014 гг. и при трёх сценариях антропогенных воздействий (ssp1-2.6, ssp2-4.5 и ssp5-8.5) для 2015–2100 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 и 2 представлены области сплошной (изолиния 0.67), прерывистой (изолиния 0.6) и островной (изолиния 0.5) мерзлоты, рассчитан-

ные для каждой модели с использованием индексов FI, SFI, MST2, MST3 для первых 20 лет XXI в. при сценарии "Historical" (2000-2014 гг.) и умеренном сценарии антропогенных воздействий ssp2-4.5 (2015-2019 гг.). В климатических моделях температурный режим пород, позволяющий диагностировать наличие/отсутствие мёрзлых пород, определяется соответствующими доминирующими климатическими условиями в модельной ячейке (блоки теплофизических процессов в грунте не воспроизводят подсеточное распределение мёрзлых пород, в частности, островную мерзлоту) (Демченко и др., 2002; Аржанов и др., 2009). В связи с этим для сравнения с модельными оценками для данных наблюдений (Brown et al., 2002) была выбрана объединённая область сплошной и прерывистой мерзлоты, что соответствует 50-100% площади (Slater, Lawrence, 2013; Burke et al., 2020), занятой мёрзлыми породами (см. рис. 1-2, область, ограниченная зелёной изолинией).



Рис. 1. Рассчитанные на основе индексов FI и SFI области сплошной (синий), прерывистой (оранжевый) и островной (красный) ММП при сценарии "historical" за 2000–2014 гг. и умеренном сценарии антропогенных воздействий ssp2-4.5 за 2015–2019 гг. Зелёной изолинией обозначена область сплошной и прерывистой мерзлоты по данным наблюдений (Brown et al., 2002)

Fig. 1. Areas of continuous (blue), discontinuous (orange) and sporadic (red) permafrost calculated using the FI and SFI indices under the "historical" scenario for 2000–2014 and anthropogenic scenario ssp2-4.5 for 2015–2019. The green isoline indicates the area of continuous and discontinuous permafrost according to observational data (Brown et al., 2002)



Рис. 2. Рассчитанная на основе температуры грунта на глубине 2 м (MST2) и 3.5 м (MST3) область ММП при сценарии "historical" за 2000–2014 гг. и умеренном сценарии антропогенных воздействий ssp2-4.5 за 2015–2019 гг. Зелёной изолинией обозначена область сплошной и прерывистой мерзлоты по данным наблюдений (Brown et al., 2002)



Сопоставление с данными наблюдений (Brown et al., 2002) свидетельствует, что границы областей с ММП, оцененные с использованием индексов. в целом согласуются с наблюдаемыми границами области сплошной и прерывистой мерзлоты в Евразии и Северной Америке. При использовании индексов на основе приповерхностной температуры (FI и SFI) хорошее согласие пространственного распределения ММП по модельным оценкам с данными наблюдений получено для моделей BCC-CSM2-MR, GISS-E2-1-G, NorESM2-LM и UKESM1-0-LL (см. рис. 1). Отдельные модели недооценивают распространение ММП на южной границе криолитозоны в Восточной Сибири (CanESM5, MIROC6, MRI-ESM2-0) и на Аляске (CanESM5, CNRM-ESM2-1, IPSL-CM6A-LR, MRI-ESM2-0). Учёт утепляющего влияния снежного покрова при использовании индекса SFI по сравнению с индексом FI приводит к смещению южной границы ММП к северу, наиболее существенному в Восточной Сибири и на Аляске для моделей CanESM5 и MIROC6.

Границы областей ММП, оцененные на основе температуры грунта, хорошо воспроизводятся на севере Евразии в расчётах с моделью

NorESM2-LM (см. рис. 2). По расчётам с моделями CNRM-ESM2-1 и GISS-E2-1-G область ММП переоценивается в Евразии и Северной Америке. Для остальных моделей распространение ММП недооценивается в Евразии (за исключением Тибета) и в Северной Америке (в том числе NorESM2-LM) при использовании индексов MST2 и MST3. Для модели BCC-CSM2-MR отмечена недооценка области распространения ММП в Евразии и Северной Америке при использовании индексов MST2 и MST3 по сравнению с данными наблюдений и с оценками на основе индексов FI и SFI. Так, в (Burke et al., 2020) для модели BCC-CSM2-MR отмечается существенное различие между приповерхностной температурой и температурой грунта, значительно превосходящее наблюдаемые значения в холодный период года в связи с переоценкой влияния снежного покрова. Для модели CNRM-ESM2-1 область ММП воспроизводится в том числе на севере Европы (на севере Скандинавии) с использованием индексов MST2 и MST3 и не воспроизводится с использованием индексов FI и SFI. Также для этой модели отмечена переоценка распространения ММП на южной границе криолитозоны в Западной Сибири при

использовании индексов MST2 и MST3. Выявленные особенности воспроизведения областей ММП на основе температуры грунта могут быть связаны с учётом влияния гидрологического режима, а также снежного и растительного покровов в блоках наземных экосистем. В частности, в высоких широтах в регионах распространения многолетнемёрзлых пород растительный покров оказывает теплоизолирующее влияние на термическое состояние мёрзлых пород в тёплый период года, что может приводить к более высоким значениям площади, оцененной по температуре грунта, по сравнению с оценками на основе приповерхностной температуры.

По модельным расчётам в целом переоценивается наблюдаемое распространение ММП в Тибете, за исключением моделей NorESM2-LM и UKESM1-0-LL. Завышение площади распространения мёрзлых пород в Тибете также отмечалось и для климатических моделей предыдущего поколения в рамках проекта CMIP5 (Slater, Lawrence, 2013).

На рис. 3 представлены количественные оценки площади ММП (сплошной и прерывистой) в Северном полушарии в XXI в. при сценариях антропогенных воздействий ssp1-2.6, ssp2-4.5 и ssp5-8.5 для выбранных моделей. Для сравнения приведён



Рис. 3. Максимальные и минимальные значения (синие кружки), 10-й и 90-й процентили (чёрные линии с засечками), 1-й и 3-й квартили (прямоугольники), медианы (чёрная линия) и средние значения (красная линия) площади ММП (сплошной и прерывистой) в Северном полушарии в XXI в. при сценариях антропогенных воздействий ssp1-2.6, ssp2-4.5 и ssp5-8.5 по индексам FI, SFI, MST2 и MST3. Диапазон значений площади мерзлоты от сплошной до полной по данным наблюдений (Zhang et al., 2008; Biskaborn et al., 2019) показан серой областью

Fig. 3. Maximum and minimum values (blue dots), 10th and 90th percentiles (black serif lines), 1st and 3rd quartiles (rectangles), medians (black lines) and average (red lines) values of permafrost area (continuous and discontinuous) in the Northern Hemisphere in the 21st century under anthropogenic scenarios ssp1-2.6, ssp2-4.5 and ssp5-8.5 according to the FI, SFI, MST2 and MST3 indices. The range of permafrost area values from continuous to complete according to observational data (Zhang et al., 2008; Biskaborn et al., 2019) is shaded in gray

интервал современных оценок для площади многолетнемёрзлых пород — от площади сплошной мерзлоты 10.8 млн км² (Biskaborn et al., 2019) до общей площади континентальной криолитозоны Северного полушария 22.8 млн км² (Zhang et al., 2008) (см. рис. 3, область, выделенная серым).

Сопоставление полученных модельных оценок площади ММП с данными наблюдений для современного периода показывает, что для большинства моделей оценки находятся в отмеченном интервале значений при расчётах с использованием индексов на основе приповерхностной температуры и температуры грунта. Средние по ансамблю моделей значения площади ММП для индексов на основе приповерхностной температуры составляют 13.1±3.4 млн км² (для FI) и 11.5±3.3 млн км² (для SFI), на основе температуры грунта – 12.2±4.1 млн км² (для MST2) и 12.0±3.6 млн км² (для MST3), что согласуется с имеющимися модельными оценками – 13.9 млн км² (Obu et al., 2019). При использовании индекса SFI оценки по расчётам с моделями CanESM5 и MIROC6 меньше соответствующих значений при использовании других индексов и меньше значений площади сплошной мерзлоты по данным наблюдений (Biskaborn et al., 2019).

Межмодельный интервал оценок площади ММП, определяемой с использованием индексов FI и SFI, в начале XXI в. составляет 10.3 и 10.7 млн км², соответственно. Минимальное значение площади получено для модели MIROC6 и составляет 9.8 и 8.2 млн км², максимальное – для модели UKESM1-0-LL – 20.1 и 18.9 млн км² при использовании индексов FI и SFI соответственно. Интервал оценок площади, полученных на основе температуры грунта, превышает аналогичные оценки на основе других индексов и составляет 11.3 млн км² для MST2 и 11.0 млн км² для MST3, что можно объяснить дополнительными погрешностями в модельных блоках тепло- и гидрофизических процессов в грунте. В то же время полученный интервал оценок площади ММП на основе температуры грунта меньше аналогичных оценок, составляющих 21.8 млн км² для начала XXI в. по расчётам с ансамблем моделей проекта CMIP5 (Slater, Lawrence, 2013). Это свидетельствует об улучшении воспроизведения температуры грунта, в том числе за счёт увеличения глубины расчётной области и количества модельных уровней в грунте, а также использования более детальных параметризаций снежного покрова по сравнению с моделями ансамбля СМІР5. При использовании индекса MST2 минимальное значение площади 9.8 млн км² получено для модели CanESM5, максимальное 21.1 млн км² – для модели GISS-E2-1-G. При использовании индекса MST3 минимальное значение 9.5 млн κm^2 получено для CanESM5, максимальное 20.5 млн κm^2 – для CNRM-ESM2-1.

Модель GISS-E2-1-G, для которой получено максимальное значение площади при использовании индекса MST2, отсутствует в наборе моделей с использованием индекса MST3 в связи с тем, что глубина расчётной области в грунте только 2.7 м. Минимальные для периода 2000–2100 гг. значения площади ММП (менее 0.5 млн км²) получены при наиболее агрессивном сценарии антропогенных воздействий ssp5-8.5 по расчётам с моделями MIROC6 и UKESM1-0-LL (см. рис. 3). При сценариях ssp2-4.5 и ssp5-8.5 наибольшие значения площади ММП в конце XXI в., оцененные с использованием индексов FI, SFI и MST2, получены для модели GISS-E2-1-G.

Сравнение оценок площади ММП в XXI в., полученных с использованием разных индексов, выявляет различия, существенные для отдельных моделей, которые могут быть связаны с учётом влияния напочвенных покровов, а также теплои гидрофизических процессов в грунте в соответствующих блоках климатических моделей. Так, при расчёте плошали с использованием инлексов MST2 и MST3 различия для выбранных моделей незначительны при всех трёх сценариях антропогенных воздействий (рис. 4, *a*). Значения площади ММП с использованием индекса MST2 превышают значения площади при использовании индекса SFI для рассматриваемых моделей, кроме моделей BCC-CSM2-MR и UKESM1-0-LL на протяжении всего периода 2000–2100 гг. (рис. 4, б). Самые близкие значения площади при использовании индексов SFI и MST2 получены для трёх моделей: CanESM5, IPSL-CM6A-LR и MRI-ESM2-0.

В табл. 2 приведены оценки тренда площади ММП с использованием индексов при трёх сценариях антропогенных воздействий в XXI в. При наименее агрессивном сценарии антропогенных воздействий ssp1-2.6 абсолютные значения тренда площади ММП, оцененной с использованием приповерхностной температуры (индексы FI и SFI) и температуры грунта (индексы MST2 и MST3), за 2000–2050 гг. превосходят соответствующие значения для периода 2050–2100 гг. для всех моделей.

Следует отметить, что при сценарии ssp1-2.6 для второй половины XXI в. для отдельных моделей значения тренда площади, оцененной с использованием приповерхностной температуры (GISS-E2-1-G, MRI-ESM2-0 и NorESM2-LM для индекса FI и MRI-ESM2-0 и NorESM2-LM для индекса SFI), статистически незначимы. Значения тренда площади ММП, оцененной на основе одного и того же индекса, существенно различаются для отдельных моделей (до двух раз и более). Различия отмечаются и для значений тренда ММП, полученных для одной модели с использованием разных индексов — на основе приповерхностной температуры и температуры грунта.



Рис. 4. Сопоставление оценок площади ММП S с использованием индексов MST2 и MST3 (*a*) и MST2 и SFI (*б*) за 2000–2100 гг. при сценариях антропогенных воздействий ssp1-2.6, ssp2-4.5 и ssp5-8.5 **Fig. 4.** Comparison of permafrost area estimates using the MST2 and MST3 (*a*) and MST2 and SFI (*б*) indices for 2000–2100

В частности, для модели CNRM-ESM2-1 при сценарии ssp5-8.5 во второй половине XXI в. тренд ММП на основе индекса MST2 более чем в два раза превышает соответствующие оценки на основе SFI. Для модели UKESM1-0-LL тренд площади на основе SFI в два раза превышает оценки на основе MST2. Для этой же модели получены максимальные оценки тренда для периода 2000-2100 гг. по расчётам с использованием индекса FI, составляющие -129±13, -166±17 и -219±22 тыс. км²/год при сценариях ssp1-2.6, ssp2-4.5 и ssp5-8.5, соответственно. Среднеансамблевые значения тренда площади ММП для периода 2000-2100 гг. при каждом сценарии совпадают в пределах среднеквадратического отклонения для всех индексов. Максимальное значение тренда площади для периода 2000-2100 гг. (-125 тыс. км²/год) получено при сценарии ssp5-8.5 и почти вдвое превосходит оценки тренда при сценарии ssp1.2-6.

under anthropogenic scenarios ssp1-2.6, ssp2-4.5 and ssp5-8.5

На рис. 5 представлена зависимость от глобальной среднегодовой приповерхностной температуры (T_a), оцененной для различных индексов площади ММП (S) для климатических моделей при сценариях антропогенных воздействий ssp1-2.6, ssp2-4.5 и ssp5-8.5 для XXI в. Параметр температурной чувствительности dS/d T_a определялся с использованием соответствующей линейной регрессии S на $T_{\rm a}$.

На рис. 6 приведены количественные оценки температурной чувствительности площади ММП (характеризуемые коэффициентом соответствующей линейной регрессии) по расчётам с каждой моделью при разных сценариях антропогенных воздействий. Наибольшие значения чувствительности площади к изменению температуры для всех сценариев получены по расчётам с моделью BCC-CSM2-MR при использовании индексов FI и SFI (см. рис. 6). Оценки чувствительности площади ММП на основе приповерхностной температуры и температуры грунта различаются для отдельных моделей ансамбля. Так, чувствительность площади на основе индексов FI и SFI значимо (на уровне среднеквадратических отклонений) превышает соответствующие оценки чувствительности при использовании индексов MST2 и MST3 для моделей BCC-CSM2-MR и UKESM1-0-LL при всех трёх сценариях антропогенных воздействий. Для модели CNRM-ESM2-1 чувствительность площади, оцененной по температуре грунта, значимо превышает оценки на основе приповерхностной температуры (см. рис. 6). Для моделей CanESM5, GISS-E2-1-G и MRI-ESM2-0 оценки чувствительности площади при использовании разных

Мололи	2000—2050 гг.		2050—2100 гг.			2000—2100 гг.							
модели	ssp126	ssp245	ssp585	ssp126	ssp245	ssp585	ssp126	ssp245	ssp585				
FI													
1	-84±12	-114±16	-122 ± 18	-27 ± 4	-94±14	-206 ± 30	-65 ± 7	-111±11	-182 ± 18				
2	-49±7	-75 ± 11	-85±12	-42 ± 6	-100 ± 14	-141 ± 20	-38 ± 4	-69 ± 7	-111±11				
3	-104 ± 15	-115 ± 17	-134±19	-8 ± 1	-51 ± 7	-53 ± 8	-68 ± 7	-91±9	-110 ± 11				
4	-85 ± 12	-82 ± 12	-94±14	2 ± 0	-42 ± 6	-115±17	-56 ± 6	-64±6	$-104{\pm}10$				
5	-115±17	-117±17	-134±19	-33 ± 5	-79±11	-92±13	-90 ± 9	-132 ± 13	-148 ± 15				
6	-83 ± 12	-99±14	-110±16	-40 ± 6	-48 ± 7	-68 ± 10	-69 ± 7	-84 ± 8	-100 ± 10				
7	-108 ± 16	-100 ± 14	-148±21	7±1	-35 ± 5	-53 ± 8	-53 ± 5	-78 ± 8	-100 ± 10				
8	-94±14	-104 ± 15	-118±17	-2 ± 0	-63 ± 9	-137 ± 20	-50 ± 5	-79±8	-119±12				
9	-178 ± 26	-193±28	-210±30	-50 ± 7	-123 ± 18	-188 ± 27	-129 ± 13	-166±17	-219±22				
SFI													
1	-97±14	-124 ± 18	-136±20	-20 ± 3	-99±14	-160 ± 23	-66 ± 7	-114±11	-171 ± 17				
2	-48 ± 7	-66±10	-86±12	-43 ± 6	-93±13	-108 ± 16	-39±4	-66±7	-99±10				
3	-92±13	-102 ± 15	-115±17	-8 ± 1	-34 ± 5	-43±6	-60 ± 6	-74±7	-90±9				
4	-94±14	-90±13	-95±14	4±1	-41±6	-110±16	-57 ± 6	-65 ± 7	-104 ± 11				
5	-122 ± 18	-135 ± 20	-129±19	-23 ± 3	-44±6	-58 ± 8	-80 ± 8	-105 ± 11	-116±12				
6	-74±11	-91±13	-99±14	-32 ± 5	-32 ± 5	-53 ± 8	-62 ± 6	-73±7	-85 ± 9				
7	-101 ± 15	-96±14	-134±19	5±1	-28 ± 4	-38±6	-47 ± 5	-68±7	-86±9				
8	-97±14	-104 ± 15	-112±16	0 ± 0	-64±9	-118 ± 17	-47 ± 5	-77±8	-110 ± 11				
9	-177 ± 26	-192 ± 28	-207 ± 30	-44 ± 6	-126 ± 18	-160 ± 23	-127 ± 13	-165±17	-207 ± 21				
				М	ST2								
1	-130±19	-149±22	-172±25	-41 ± 6	-81 ± 12	-82 ± 12	-80 ± 8	-111±11	-134 ± 14				
2	-70 ± 10	-89±13	-102 ± 15	-54 ± 8	-115 ± 17	-239 ± 35	-52 ± 5	-86±9	-153 ± 15				
3	-113±16	-116±17	-139±20	-14 ± 2	-64±9	-56 ± 8	-78 ± 8	-98 ± 10	-117 ± 12				
4	-100 ± 14	-108 ± 16	-112±16	-8 ± 1	-42 ± 6	-112±16	-69 ± 7	-73±7	-112±11				
5	-112±16	-118 ± 17	-116±17	-40 ± 6	-70 ± 10	-89±13	-80 ± 8	-104 ± 10	-123 ± 12				
6	-96±14	-105 ± 15	-104 ± 15	-36 ± 5	-75 ± 11	-154 ± 22	-71 ± 7	-92±9	-128 ± 13				
7	-90±13	-85 ± 12	-116±17	-22 ± 3	-37 ± 5	-68 ± 10	-57 ± 6	-75 ± 8	-97 ± 10				
8	-72 ± 10	-72 ± 10	-84±12	-14 ± 2	-64 ± 9	-168 ± 24	-38 ± 4	-63 ± 6	-117 ± 12				
9	-180 ± 26	-187 ± 27	-202±29	-50 ± 7	-96±14	-88±13	-124 ± 13	-150 ± 15	-172 ± 17				
MST3													
2	-71 ± 10	-86±12	-96±14	-51 ± 7	-104 ± 15	-224 ± 32	-52 ± 5	-83 ± 8	-144 ± 15				
3	-113±16	-118 ± 17	-139±20	-13 ± 2	-59±9	-54 ± 8	-78 ± 8	-96±10	-115 ± 12				
5	-108 ± 16	-113±16	-112±16	-41 ± 6	-71 ± 10	-94±14	-78 ± 8	-101 ± 10	-120 ± 12				
6	-97±14	-103 ± 15	-102±15	-45 ± 7	-79±11	-157 ± 23	-75 ± 8	-94±9	-126 ± 13				
7	-72 ± 10	-66 ± 10	-93±13	-30 ± 4	-53 ± 8	-79±11	-58 ± 6	_74±7	-96 ± 10				
8	-71 ± 10	-70 ± 10	-80±12	-16 ± 2	-63 ± 9	-167 ± 24	$-39{\pm}4$	-63±6	-115 ± 12				

Таблица 2. Полученные с использованием индексов FI, SFI, MST2, MST3 модельные оценки тренда площади ММП континентальной криолитозоны Северного полушария в XXI в. (тыс. км²/год), значимые на уровне 0.05. Незначимые значения выделены



Рис. 5. Площадь ММП в зависимости от глобальной среднегодовой приповерхностной температуры T_a на основе индексов FI, SFI, MST2 и MST3 для трёх сценариев антропогенных воздействий в XXI в. Пунктирными линиями показаны линейные регрессии каждой модели, сплошной чёрной линией показана среднеансамблевая линейная регрессия

Fig. 5. Permafrost area depending on the global average annual surface temperature based on the FI, SFI, MST2 and MST3 indices for three anthropogenic scenarios in the 21st century. The dotted lines show the linear regressions of each model, and the solid black line shows the ensemble mean linear regression

индексов совпадают в приделах стреднеквадратического отклонения.

Чувствительность площади ММП по расчётам с ансамблем моделей уменьшается по абсолютной величине от наименее агрессивного сценария антропогенных воздействий ssp1-2.6 к наиболее агрессивному ssp5-8.5 (см. рис. 5 и 6). Средние для ансамбля моделей значения чувствительности площади ММП оценены равными -3.3±0.8 млн км²/°С при сценарии ssp1-2.6, -2.9±0.7 млн км²/°С при сценарии ssp2-4.5 и -2.1±0.7 млн км²/°С при сценарии ssp5-8.5. Максимальный разброс полученных оценок чувствительности площади ММП достигает 30%, при этом различия оценок чувствительности при использовании разных индексов статистически незначимы. Полученные значения согласуются с оценками чувствительности площади мёрзлых пород на основе воздушно-мерзлотного индекса и аналитического решения задачи

Стефана на основе модели Кудрявцева для ансамбля моделей СМІР5, при сценарии RCP8.5 составляющих –1.67 млн км²/°С (Slater, Lawrence, 2013), а также с оценками на основе температурной зависимости площади мёрзлых пород (Chadburn et al., 2017) (см. также Alexandrov et al., 2021) для ансамбля моделей СМІР6 в интервале от –4.8 млн км²/°С до –3.0 млн км²/°С (5-й и 95-й процентили соответственно) (Burke et al., 2020).

Уменьшение чувствительности площади ММП к изменениям глобальной приповерхностной температуры от наименее агрессивного к наиболее агрессивному сценарию антропогенных воздействий отмечалось для глобальных климатических моделей предыдущего поколения (ансамбль СМІР5) при сценариях семейства RCP (Slater, Lawrence, 2013), а также в численных расчётах с глобальной климатической моделью ИФА РАН при сценариях семейства SRES и в идеализированных







Рис. 6. Чувствительность dS/dT_a площади ММП, оцененной на основе индексов FI (1), SFI (2), MST2 (3) и MST3 (4) для XXI в. Вертикальный размер фигур соответствует интервалу среднеквадратического отклонения коэффициента линейной регрессии. Горизонтальные линии (5) соответствуют средним для ансамбля моделей значениям чувствительности площади ММП для каждого сценария

Fig. 6. Sensitivity dS/dT_a of permafrost area estimated based on FI (1), SFI (2), MST2 (3) and MST3 (4) indices for the 21st century. The vertical size of the figures corresponds to the interval of the standard deviation of the linear regression coefficient. The horizontal lines (5) correspond to the model ensemble average sensitivity values of the permafrost area for each scenario

экспериментах с изменением содержания углекислого газа в атмосфере (Демченко и др., 2006). Анализ полученных результатов показал, что при **у**величении скорости глобального потепления (при наиболее агрессивных сценариях антропогенных воздействий) значительный рост температуры в высоких широтах приводит к быстрой деградации ММП во второй половине XXI в. на севере Евразии (по отдельным моделям и в Тибете) и в Северной Америке за исключением Канадского Арктического архипелага. При дальнейшем увеличении приповерхностной температуры площадь оставшихся ММП практически не меняется, что проявляется в уменьшении абсолютных значений dS/dT_{a} . Полученные результаты относятся к верхним горизонтам криолитозоны (Анисимов, Нельсон, 1990) и выявленная деградация ММП в XXI в. в отдельных регионах может означать смену режима сезонного протаивания сезонным промерзанием (формирование таликов), а не полное оттаивание толщи мёрзлых пород.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием результатов расчётов с ансамблем глобальных климатических моделей в рамках международного проекта CMIP6 проведён анализ режимов континентальной криолитозоны Северного полушария в XXI в. на основе индексов, характеризующие локальные климатические условия существования мёрзлых пород в зависимости от приповерхностной температуры, а также от температуры грунта. Отмечены особенности воспроизведения наблюдаемых границ многолетнемёрзлых пород для отдельных моделей, а также при использовании различных индексов. Выявлена более высокая оценка области распространения ММП в Тибете для ряда климатических моделей. Учёт отепляющего влияния снежного покрова при использовании индекса SFI по сравнению с индексом FI приводит к смещению южной границы ММП к северу, для отдельных моделей наиболее существенному на юге Восточной Сибири и на Аляске.

Полученные оценки площади ММП для периода 2000–2019 гг. на основе различных индексов находятся в пределах 11.5–13.1 млн км², при этом выявлены различия, существенные для отдельных моделей. Диапазон оценок площади ММП по расчётам с ансамблем моделей СМІР6 для начала XXI в. на основе температуры грунта близок к аналогичным значениям на основе приповерхностной температуры (около 11 млн км²) и вдвое меньше оценок для моделей предыдущего поколения (ансамбль СМІР5). Это можно объяснить улучшением воспроизведения температуры грунта, в том числе за счёт увеличения глубины расчётной области и количества модельных уровней в грунте, а также

использования более детальных параметризаций снежного покрова. Различие трендов площади ММП, полученных для каждой модели с использованием различных инлексов, сопоставимо с межмодельным разбросом при использовании одного и того же индекса. Максимальное значение тренда площади ММП по расчётам с ансамблем моделей для периода 2000–2100 гг. (-125 тыс. км²/год) получено при сценарии ssp5-8.5. Это почти вдвое превосходит оценки тренда при сценарии ssp1.2-6. Оценки чувствительности площади ММП к изменению глобальной приповерхностной температуры в среднем по ансамблю моделей для всех индексов составляют -3.3±0.8 млн км²/°С при сценарии ssp1-2.6, -2.9±0.7 млн км²/°С при сценарии ssp2-4.5 и -2.1 ± 0.7 млн км²/°С при сценарии ssp5-8.5. Отмечено уменьшение оценок чувствительности плошали ММП к изменениям глобальной приповерхностной температуры от наименее агрессивного к наиболее агрессивному сценарию антропогенных воздействий.

Анализ результатов свидетельствует о согласованном воспроизведении основных тенденций изменения областей распространения ММП с использованием различных индексов, в том числе на основе приповерхностной температуры и температуры грунта. Полученные результаты согласуются с оценками, полученными на основе эмпирической температурной зависимости площади ММП, а также аналитического решения задачи Стефана для климатических моделей предыдущего поколения (ансамбль СМІР5).

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта РНФ 24-17-00211 с использованием результатов, полученных в рамках государственного задания Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (ФМВР-2022-0014).

Acknowledgements. This work was carried out within the framework of the RSF project 24-17-00211 using the results obtained within the framework of the state assignment of the A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the Russian Academy of Sciences (FMVR-2022-0014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анисимов О.А., Нельсон Ф.Е. О применении математических моделей для исследования взаимосвязи климат — вечная мерзлота // Метеорология и гидрология. 1990. № 10. С. 13–19.
- Анисимов О.А., Величко А.А., Демченко П.Ф., Елисеев А.В., Мохов И.И., Нечаев В.П. Влияние изменений климата на вечную мерзлоту в прошлом, настоящем и будущем // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38. № 1. С. 25–39.
- Аржанов М.М., Демченко П.Ф., Елисеев А.В., Мохов И.И. Воспроизведение характеристик температурного

и гидрологического режимов почвы в равновесных численных экспериментах с моделью климата промежуточной сложности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 5. С. 591–610.

- Аржанов М.М., Елисеев А.В., Демченко П.Ф., Мохов И.И., Хон В.Ч. Моделирование температурного и гидрологического режима водосборов сибирских рек в условиях вечной мерзлоты с использованием данных реанализа // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 1. С. 86–93.
- Аржанов М.М., Демченко П.Ф., Елисеев А.В., Мохов И.И. Моделирование осадки отаивания многолетнемерзлых грунтов Северного полушария в XXI веке // Криосфера Земли. 2010. Т. XIV. № 3. С. 37–42.
- Аржанов М.М., Елисеев А.В., Мохов И.И. Влияние климатических изменений над сушей внетропических широт на динамику многолетнемерзлых грунтов при сценариях RCP в XXI в. по расчетам глобальной климатической модели ИФА РАН // Метеорология и гидрология. 2013. № 7. С. 31–42.
- Аржанов М.М., Мохов И.И. Температурные тренды в многолетнемерзлых грунтах Северного полушария: Сравнение модельных расчетов с данными наблюдений // Доклады РАН. 2013. Т. 449. № 1. С. 87–92.
- Аржанов М.М., Мохов И.И. Модельные оценки количества органического углерода, освобождаемого из многолетнемерзлых грунтов при сценариях глобального потепления в XXI веке // Доклады РАН. 2014. Т. 455. № 3. С. 328–331.
- Аржанов М.М., Мохов И.И. Оценки степени устойчивости континентальных реликтовых метангидратов в оптимуме голоцена и при современных климатических условиях // Доклады РАН. 2017. Т. 476. № 4. С. 456–460.
- Аржанов М.М., Малахова В.В. Моделирование условий накопления и перехода в реликтовое состояние метангидратов криолитозоны севера Западной Сибири // Физика Земли. 2023. № 2. С. 149–161.
- Бабкина Е.А., Лейбман М.О., Дворников Ю.А., Факащук Н.Ю., Хайруллин Р.Р., Хомутов А.В. Активизация криогенных процессов на территории Центрального Ямала как следствие региональных и локальных изменений климата и теплового состояния пород // Метеорология и гидрология. 2019. № 4. С. 99–109.
- Демченко П.Ф., Величко А.А., Елисеев А.В., Мохов И.И., Нечаев В.П. Зависимость условий распространения вечной мерзлоты от уровня глобального потепления: сравнение моделей, сценариев и данных палеореконструкций // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38. № 2. С. 165–174.
- Демченко П.Ф., Елисеев А.В., Аржанов М.М., Мохов И.И. Влияние скорости глобального потепления на таяние вечной мерзлоты // Изв. РАН.

C. 35-43.

- Денисов С.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И., Аржанов М.М. Модельные оценки глобальных и региональных эмиссий метана в атмосферу влажными экосистемами // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. T. 51. № 5. C. 543-549.
- Елисеев А.В., Мохов И.И., Аржанов М.М., Демченко П.Ф., Денисов С.Н. Взаимодействие метанового цикла и процессов в болотных экосистемах в климатической модели промежуточной сложности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. T. 44. № 2. C. 147-162.
- Мохов И.И., Демченко П.Ф., Елисеев А.В., Хон В.Ч., Хворостьянов Д.В. Оценки глобальных и региональных изменений климата в XIX-XXI веках на основе модели ИФА РАН с учетом антропогенных воздействий // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38. № 5. С. 629-642.
- Мохов И.И., Елисеев А.В., Демченко П.Ф., Хон В.Ч., Акперов М.Г., Аржанов М.М., Карпенко А.А., Тихонов В.А., Чернокульский А.В., Сигаева Е.В. Климатические изменения и их оценки с использованием глобальной модели ИФА РАН // Доклады РАН. 2005. T. 402. № 2. C. 243–247.
- Мохов И.И., Елисеев А.В., Аржанов М.М., Демченко П.Ф., Денисов С.Н., Карпенко А.А. Моделирование изменений климата в высоких широтах с использованием климатической модели ИФА РАН / В: Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Т. III. Ч. II. Природные процессы в полярных областях Земли. М.: Ин-т географии PAH, 2008. C. 13-19.
- Мохов И.И., Елисеев А.В. Моделирование глобальных климатических изменений в XX-XXIII веках при новых сценариях антропогенных воздействий RCP // Доклады РАН. 2012. Т. 443. № 6. C. 732-736.
- Мохов И.И., Малахова В.В., Аржанов М.М. Модельные оценки внутри- и межвековой деградации "вечной мерзлоты" в регионе полуострова Ямал при потеплении // Доклады РАН. 2022. Т. 506. № 2. C. 97–104.
- Мохов И.И., Хон В.Ч. Гидрологический режим в бассейнах сибирских рек: модельные оценки изменений в 21 веке // Метеорология и гидрология. 2002. № 2. C. 77–91.
- Павлов А.В., Малкова Г.В. Мелкомасштабное картографирование трендов современных изменений температуры грунтов на севере России // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII. № 4. С. 32-39.
- Павлова Т.В., Катцов В.М., Надежина Е.Д., Спорышев П.В., Говоркова В.А. Расчет эволюции криосферы в XX и XXI веках с использованием глобальных климатических моделей нового поколения // Криосфера Земли. 2007. Т. XI. № 2. С. 3-13.

Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 1. Alexeev V.A., Nicolsky D.J., Romanovsky V.E., Lawrence D.M. An evaluation of deep soil configurations in the CLM3 for improved representation of permafrost // Geophys. Research Letters. 2007. V. 34. № 9. P. L09502.

- Alexandrov G.A., Ginzburg V.A., Insarov G.E. CMIP6 model projections leave no room for permafrost to persist in Western Siberia under the SSP5-8.5 scenario // Climatic Change. 2021. V. 169. P. 42. https://doi.org/10.1007/s10584-021-03292-w
- Anisimov O.A., Nelson F.E. Permafrost distribution in the Northern Hemisphere under scenarios of climatic change // Global Planet. Change. 1996. V. 14. P. 59-72.
- Anisimov O., Zimov S. Thawing permafrost and methane emission in Siberia: Synthesis of observations, reanalysis, and predictive modeling // Siberian Environmental Change. 2020. V. 50. P. 2050-2059.
- Arzhanov M.M., Malakhova V.V., Mokhov I.I. Modeling thermal regime and evolution of the methane hydrate stability zone of the Yamal peninsula permafrost // Permafrost Periglac. Process. 2020. V. 31. P. 487-496.
- Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzli J. Permafrost is warming at a global scale // Nat. Commun. 2019. V. 10. P. 264.

https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4

- Brown J.O.F., Heginbottom J.A., Melnikov E. Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground-Ice Conditions, Version 2. Boulder, Colorado USA: NASA, 2002. https://doi.org/10.7265/skbg-kf16
- Burke E.J., Zhang Y., Krinner G. Evaluating permafrost physics in the Coupled Model Intercomparison Project 6 (CMIP6) models and their sensitivity to climate change // The Cryosphere. 2020. V. 14. P. 3155-3174.
- Chadburn S.E., Burke E.J., Cox P.M., Friedlingstein P., Hugelius G., Westermann S. An observation-based constraint on permafrost loss as a function of global warming // Nature Clim Change. 2017. V. 7. P. 340-344.
- Dvornikov Yu.A., Leibman M.O., Khomutov A.V. Gasemission craters of the Yamal and Gydan peninsulas: A proposed mechanism for lake genesis and development of permafrost landscapes // Permafrost Periglac. Process. 2019. V. 30. P. 146-162.
- Eyring V., Bony S., Meehl G.A., Senior C.A., Stevens B., Stouffer R.J., Taylor K.E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // Geosci. Model Dev. 2016. V. 9. P. 1937-1958. https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016
- Gelfan A., Gustafsson D., Motovilov Y., Arheimer B., Kalugin A., Krylenko I., Lavrenov A. Climate change impact on the water regime of two great Arctic rivers: modeling and uncertainty issues // Climatic Change. 2017. V. 141. P. 499-515. https://doi.org/10.1007/s10584-016-1710-5

ЛЁД И СНЕГ 2025 том 65 **№** 1

Guo D., Wang H. CMIP5 permafrost degradation projec- Smith S.L., Romanovsky V.E., Lewkowicz A.G., Burn C.R., tion: A comparison among different regions // Journ. of Geophys. Research. Atmosphere. 2016. V. 121. P. 4499-4517.

https://doi.org/10.1002/2015JD024108

- Hugelius G., Bockheim J.G., Camill P. A new data set for estimating organic carbon storage to 3 m depth in soils of the northern circumpolar permafrost region // Earth System Science Data 2013. V. 5. P. 393-402.
- IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation. and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. 3056 p. https://doi.org/10.1017/9781009325844
- Jorgenson M.T., Racine C.H., Walters J.C. Permafrost Degradation and Ecological Changes Associated with a WarmingClimate in Central Alaska // Climatic Change. 2001. V. 48. P. 551–579.
- Kizyakov A., Zimin M., Sonvushkin A., Dvornikov Yu., Khomutov A., Leibman M. Comparison of gas emission crater geomorphodynamics on Yamal and Gydan peninsulas (Russia), based on repeat very-high-resolution stereopairs // Remote Sens. 2017. V. 9. P. 1023-1036.
- Kleinen T., Brovkin V. Pathway-dependent fate of permafrost region carbon // Environ. Res. Lett. 2018. V. 13. P. 094001.
- Lawrence D.M., Slater A.G. A projection of severe near-surface permafrost degradation during the 21st century // Geophys. Research Letters. 2005. V. 32. № 24. P. L24401.
- Nelson F., Outcalt S. A computational method for prediction and regionalization of permafrost // Arctic and Alpine Research. 1987. V. 19. № 3. P. 279–288.
- Obu J., Westermann S., Bartsch A. et al. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale // Earth-Science Reviews. 2019. V. 193. P. 299-316.
- Schuur E.A.G., McGuire A.D., Schadel C. Climate change and the permafrost carbon feedback // Nature. 2015. V. 520. P. 171-179.

- Allard M., Clow G.D., Yoshikawa K., Throop J. Thermal State of Permafrost in North America: A Contribution to the International Polar Year // Permafrost Periglac. Process. 2010. V. 21. P. 117-135.
- Stendel M., Christensen J.H. Impact of global warming on permafrost condition in a coupled GCM // Geophys. Research Letters. 2002. V. 29. № 13. P. 1632.
- Slater A.G., Lawrence D.M. Diagnosing present and future permafrost from climate models // Journ. of Climate. 2013. V. 26. P. 5608-5623.
- Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A. An overview of CMIP5 and the experiment design // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2012. V. 93. P. 485-498. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1
- van Vuuren D.P., Edmonds J., Kainuma M. The representative concentration pathways: an overview // Climatic Change. 2011. V. 109. P. 5-31. https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z
- Vasiliev A.A. Drozdov D.S., Gravis A.G., Malkova G.V., Nyland K.S., Streletskiy D.A. Permafrost degradation in the Western Russian Arctic // Environmental Research Letters. 2020. V. 15. № 4. P. 045001.
- Wahlen M. The global methane cycle // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 1993. V. 21. P. 407-426.
- Wagner A.M., Lindsey N.J., Dou S. Permafrost degradation and subsidence observations during a controlled warming experiment // Science Report. 2018. V. 8. P. 10908.

https://doi.org/10.1038/s41598-018-29292-y

- Zhang T., Barry R.G., Knowles K., Heginbottom J.A., Brown J. Statistics and characteristics of permafrost and ground-ice distribution in the Northern Hemisphere // Polar Geography. 2008. V. 31. No 1-2. P. 47–68.
- Zhang T., Stamnes K. Impact of climatic factors on the active layer and permafrost at Barrow, Alaska // Permafrost and Periglacial Processes. 1998. V. 9. № 3. P. 229-246.

Citation: *Arzhanov M.M., Mokhov I.I.* Model assessments of the Northern Hemisphere continental permafrost changes in the 21st century. *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2025, 65 (1): 148–163. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673425010116

Model assessments of the Northern Hemisphere continental permafrost changes in the 21st century

© 2025 M. M. Arzhanov^{*a*,#}, I. I. Mokhov^{*a*,*b*}

^aObukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia ^bMoscow State University, Moscow, Russia [#]e-mail: arzhanov@ifaran.ru

Received October 4, 2024; revised December 12, 2024; accepted December 25, 2024

Using the results of simulations with an ensemble of Coupled Model Intercomparison Project 6 (CMIP6) models, an analysis of the regimes of the Northern Hemisphere continental permafrost in the 21st century was carried out under various scenarios of anthropogenic forcing. It is noted that the modern boundaries of the permafrost in Northern Eurasia and North America are realistically reproduced using various frost indices based on air temperature and ground temperature. Using various indices, the near-surface permafrost area at the beginning of the 21^{st} century, estimated in the range of 11.5-13.1 million km². At the same time, the range of the near-surface permafrost area estimates based on simulations with CMIP6 models using the ground temperature is about 11 million km², which is half as much as similar estimates for the previous generation CMIP5 models. The maximum value of the area trend in the 21st century (-125 thousand km²/year), obtained under the most aggressive scenario ssp5-8.5 is almost twice as large in absolute value as under the least aggressive scenario ssp1.2-6. A decrease in the sensitivity of the permafrost area to changes in global air temperature from the least aggressive to the most aggressive scenario of anthropogenic impacts was revealed: -3.3 million km²/°C under scenario ssp1-2.6, -2.9 million km²/°C under scenario ssp2-4.5 and -2.1 million km²/°C under scenario ssp5-8.5. Analysis of the results showed that with an increase in the rate of global warming for the most aggressive anthropogenic scenarios, a significant increase in temperature in high latitudes leads to rapid degradation of the permafrost in the second half of the 21st century in the north of Eurasia, and according to certain models in Tibet and North America with the exception Canadian Arctic.

Keywords: climate change, permafrost, temperature indicies, global climate models, CMIP6

REFERENCES

- Anisimov O.A., Nelson F.E. Application of mathematical models to investigation of the climate – permafrost coupling. Russian Meteorology and Hydrology. 1990, 10: 13–19 [In Russian].
- Anisimov O.A., Velichko A.A., Demchenko P.F., Eliseev A.V., Mokhov I.I., Nechaev V.P. Effect of climate change on permafrost in the past, present and future. Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana. Proc. of the RAS. Physics of the atmosphere and ocean. 2002, 38 (1): 25–39 [In Russian].
- Arzhanov M.M., Demchenko P.F., Eliseev A.V., Mokhov I.I. Simulation of characteristics of thermal and hydrologic soil regimes in equilibrium numerical experiments with a climate model of intermediate complexity. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*. Proc. of the RAS. Physics of the atmosphere and ocean. 2008, 44 (5): 591–610 [In Russian].
- Arzhanov M.M., Eliseev A.V., Demchenko P.F., Mokhov I.I., Khon V.Ch. Simulation of thermal and hydrological regimes of Siberian river watersheds under permafrost conditions from reanalysis data. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*. Proc. of the RAS. Physics of the atmosphere and ocean. 2008, 44 (1): 86–93 [In Russian].
- Arzhanov M.M., Demchenko P.F., Eliseev A.V., Mokhov I.I. Modelling of subsidence of perennially frozen soil due to thaw for the Northern Hemisphere during the 21st century. *Kriosfera Zemli*. Cryosphere of the Earth. 2010, XIV (3): 37–42 [In Russian].
- Arzhanov M.M., Eliseev A.V., Mokhov I.I. Impact of climate changes over the extratropical land on permafrost dynamics under rcp scenarios in the 21st century as simulated by the IAP RAS climate model. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and hydrology. 2013, 7: 31–42 [In Russian].

- Arzhanov M.M., Mokhov I.I. Temperature trends in the permafrost of the Northern Hemisphere: comparison of model calculations with observations. *Doklady Rossiiskoy Akademii Nauk*. Reports of the Academy of Sciences. 2013, 449 (1): 87–92 [In Russian].
- Arzhanov M.M., Mokhov I.I. Model assessments of organic carbon amounts released from long-term permafrost under scenarios of global warming in the 21st century. Doklady Rossiiskoy Akademii Nauk. Reports of the Academy of Sciences. 2014, 455 (3): 328–331 [In Russian].
- Arzhanov M.M., Mokhov I.I. Stability of Continental Relic Methane Hydrates for the Holocene Climatic Optimum and for Contemporary Conditions. *Doklady Rossiiskoy Akademii Nauk*. Reports of the Academy of Sciences. 2017, 476 (4): 456–460 [In Russian].
- Arzhanov M.M., Malakhova V.V. Modeling the accumulation and transition to the relic state of methane hydrates in the permafrost of Northwestern Siberia. *Fizika Zemli*. Physics of the Earth. 2023, (2): 149–161 [In Russian].
- Babkina E.A., Leibman M.O., Dvornikov Y.A., Fakashchuk N.Yu., Khairullin R.R., Khomutov A.V. Activation of cryogenic processes in Central Yamal as a result of regional and local change in climate and thermal state of permafrost. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and hydrology. 2019, (4): 99–109 [In Russian].
- Demchenko P.F., Velichko A.A., Eliseev A.V., Mokhov I.I., Nechaev V.P. Dependence of Permafrost Conditions on Global Warming: Comparison of Models, Scenarios, and Paleoclimatic Reconstructions. Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana. Proc. of the RAS. Physics of the atmosphere and ocean. 2002, 38 (2): 165–174 [In Russian].
- Demchenko P.F., Eliseev A.V., Arzhanov M.M., Mokhov I.I. Impact of Global Warming Rate on Permafrost Degradation. Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana. Proc. of the RAS. Physics of the atmosphere and ocean. 2006, 42 (1): 35–43 [In Russian].
- Denisov S.N., Eliseev A.V., Mokhov I.I., Arzhanov M.M. Model Estimates of Global and Regional Atmospheric Methane Emissionsof Wetland Ecosystems. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*. Proc. of the RAS. Physics of the atmosphere and ocean. 2015, 51 (5): 543–549 [In Russian].
- Eliseev A.V., Mokhov I.I., Arzhanov M.M., Demchenko P.F., Denisov S.N. Interaction of the methane cycle and processes in wetland ecosystems in a climate model of intermediate complexity. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*. Proc. of the RAS. Physics of the atmosphere and ocean. 2008, 44 (2): 147–162 [In Russian].
- Mokhov I.I., Demchenko P.F., Eliseev A.V., Khon V.Ch., Khvorost'yanov D.V. Estimation of global and regional climate changes during the 19–21st centuries on the basis of the IAP RAS model with consideration for anthropogenic forcing. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*. Proc. of the RAS. Physics of the atmosphere and ocean. 2002, 38 (5): 629–642 [In Russian].

- Mokhov I.I., Eliseev A.V., Demchenko P.F., Khon V.Ch., Akperov M.G., Arzhanov M.M., Karpenko A.A., Tikhonov V.A., Chernokulsky A.V., Sigaeva E.V. Climate changes and their assessment based on the IAP RAS global model simulations. Doklady Rossiiskoy Akademii Nauk. Reports of the Academy of Sciences. 2005, 402 (2): 243–247 [In Russian].
- Mokhov I.I., Eliseev A.V., Arzhanov M.M., Demchenko P.F., Denisov S.N., Karpenko A.A. Modelirovanie izmenenij klimata v vysokih shirotah s ispol'zovaniem klimaticheskoj modeli IFA RAN. Izmenenie okruzhayushchej sredy i klimata. Prirodnye processy v polyarnyh oblastyah Zemli. Modeling climate change at high latitudes using the IAP RAS climate model. Environmental and climate change. V. III. Pt. II. Natural processes in the polar regions of the Earth. Moscow: Institute of Geography RAS, 2008: 13–19 [In Russian].
- Mokhov I.I., Eliseev A.V. Modeling of global climate variations in the 20th-21st centuries with new RCP scenarios of anthropogenic forcing. *Doklady Rossiiskoy Akademii Nauk*. Reports of the Academy of Sciences. 2012, 443 (6): 732-736 [In Russian].
- Mokhov I.I., Malakhova V.V., Arzhanov M.M. Model estimates of intra- and intersentennial degradation of permafrost on the Yamal peninsula under warming. Doklady Rossiiskoy Akademii Nauk. Reports of the Academy of Sciences. 2022, 506 (2): 97–104.
- *Mokhov I.I., Khon V.Ch.* Hydrological regime in siberian river basins: model estimates of changes in the 21st century. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2002, 2: 77–91 [In Russian].
- Pavlov A.V., Malkova G.V. Small-scale mapping of trends of the contemporary ground temperature changes in the Russian North. *Kriosfera Zemli*. Cryosphere of the Earth. 2009, XIII (4): 32–39 [In Russian].
- Pavlova T.V., Kattsov V.M., Nadyozhina Ye.D., Sporyshev P.V., Govorkova V.A. Terrestrial cryosphere evolution through the xx and xxi centuries as simulated with the new generation of global climate models. *Kri*osfera Zemli. Cryosphere of the Earth. 2007, XI (2): 3–13 [In Russian].
- Alexeev V.A., Nicolsky D.J., Romanovsky V.E., Lawrence D.M. An evaluation of deep soil configurations in the CLM3 for improved representation of permafrost. Geophys. Research Leters. 2007, 34 (9): L09502.
- Alexandrov G.A., Ginzburg V.A., Insarov G.E. CMIP6 model projections leave no room for permafrost to persist in Western Siberia under the SSP5-8.5 scenario. Climatic Change. 2021, 169: 42. https://doi.org/10.1007/s10584-021-03292-w
- Anisimov O.A., Nelson F.E. Permafrost distribution in the Northern Hemisphere under scenarios of climatic change. Global Planetary Change. 1996, 14: 59–72.
- *Anisimov O., Zimov S.* Thawing permafrost and methane emission in Siberia: Synthesis of observations, reanalysis, and predictive modeling. Siberian Environmental Change. 2020, 50: 2050–2059.

- Arzhanov M.M., Malakhova V.V., Mokhov I.I. Modeling thermal regime and evolution of the methane hydrate stability zone of the Yamal peninsula permafrost. Permafrost Periglac. Process. 2020, 31: 487–496.
- Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzli J. Permafrost is warming at a global scale. Nat. Commun. 2019, 10: 264. https://doi.org/0.1038/s41467-018-08240-4
- Brown J.O.F., Heginbottom J.A., Melnikov E. Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground-Ice Conditions, Version 2. Boulder, Colorado, USA: NASA, 2002. https://doi.org/10.7265/skbg-kf16
- *Burke E.J., Zhang Y., Krinner G.* Evaluating permafrost physics in the Coupled Model Intercomparison Project 6 (CMIP6) models and their sensitivity to climate change. The Cryosphere. 2020, 14: 3155–3174.
- Chadburn S.E., Burke E.J., Cox P.M., Friedlingstein P., Hugelius G., Westermann S. An observation-based constraint on permafrost loss as a function of global warming. Nature Clim. Change. 2017, 7: 340–344.
- Dvornikov Yu.A., Leibman M.O., Khomutov A.V. Gasemission craters of the Yamal and Gydan peninsulas: A proposed mechanism for lake genesis and development of permafrost landscapes. Permafrost Periglac. Process. 2019, 30: 146–162.
- Eyring V., Bony S., Meehl G.A., Senior C.A., Stevens B., Stouffer R.J., Taylor K.E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. Geosci. Model Dev. 2016, 9: 1937–1958. https://doi.org/10.5194/gmd.0.1927.2016

https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016

- Gelfan A., Gustafsson D., Motovilov Y., Arheimer B., Kalugin A., Krylenko I., Lavrenov A. Climate change impact on the water regime of two great Arctic rivers: modeling and uncertainty issues. Climatic Change. 2017, 141: 499–515. https://doi.org/10.1007/s10584-016-1710-5
- Guo D., Wang H. CMIP5 permafrost degradation projection: A comparison among different regions. J. Geophys. Res. Atmos. 2016, 121: 4499–4517.
- *Hugelius G., Bockheim J.G., Camill P.* A new data set for estimating organic carbon storage to 3 m depth in soils of the northern circumpolar permafrost region. Earth Syst. Sci. Data 2013, 5: 393–402.
- IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022: 3056 p. https://doi.org/10.1017/9781009325844
- Jorgenson M.T., Racine C.H., Walters J.C. Permafrost Degradation and Ecological Changes Associated with a Warming Climate in Central Alaska. Climatic Change. 200, 48: 551–579.
- Kizyakov A., Zimin M., Sonyushkin A., Dvornikov Yu., Khomutov A., Leibman M. Comparison of gas emission crater geomorphodynamics on Yamal and Gydan

peninsulas (Russia), based on repeat very-high-resolution stereopairs. Remote Sens. 2017, 9: 1023–1036.

- *Kleinen T., Brovkin V.* Pathway-dependent fate of permafrost region carbon. Environment Research Letters. 2018, 13: 094001.
- *Lawrence D.M., Slater A.G.* A projection of severe near-surface permafrost degradation during the 21st century. Geophys. Research Letters. 2005, 32 (24): L24401.
- *Nelson F., Outcalt S.* A computational method for prediction and regionalization of permafrost. Arctic and Alpine Research. 1987, 19 (3): 279–288.
- *Obu J., Westermann S., Bartsch A.* Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale. Earth-Science Reviews. 2019, 193: 299–316.
- Schuur E.A.G., McGuire A.D., Schadel C. Climate change and the permafrost carbon feedback. Nature. 2015, 520: 171–179.
- Smith S.L., Romanovsky V.E., Lewkowicz A.G., Burn C.R., Allard M., Clow G.D., Yoshikawa K., Throop J. Thermal State of Permafrost in North America: A Contribution to the International Polar Year. Permafrost Periglac. Process. 2010, 21: 117–135.
- Stendel M., Christensen J.H. Impact of global warming on permafrost condition in a coupled GCM. Geophys. Research Letters. 2002, 29 (13): 1632.
- *Slater A.G., Lawrence D.M.* Diagnosing present and future permafrost from climate models. Journal of Climate. 2013, 26: 5608–5623.
- Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A. An overview of CMIP5 and the experiment design. Bull. Amer. Meteor. Soc. 2012, 93: 485–498. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1
- van Vuuren D.P., Edmonds J., Kainuma M. The representative concentration pathways: an overview. Climatic Change. 2011, 109: 5–31. https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z
- Vasiliev A.A, Drozdov D.S., Gravis A.G., Malkova G.V., Nyland K.S., Streletskiy D.A. Permafrost degradation in the Western Russian Arctic. Environmental Research Letters. 2020, 15 (4): 045001.
- *Wahlen M*. The global methane cycle. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 1993, 21: 407–426.
- Wagner A.M., Lindsey N.J., Dou S. Permafrost degradation and subsidence observations during a controlled warming experiment. Sci Rep. 2018, 8: 10908. https://doi.org/10.1038/s41598-018-29292-y
- Zhang T., Barry R.G., Knowles K., Heginbottom J.A., Brown J. Statistics and characteristics of permafrost and ground-ice distribution in the Northern Hemisphere. Polar Geography. 2008, 31 (1–2): 47–68.
- Zhang T., Stamnes K. Impact of climatic factors on the active layer and permafrost at Barrow, Alaska. Permafrost and Periglacial Processes. 1998, 9 (3): 229–246.