

Влияние климатических изменений над сушей внетропических широт на динамику многолетнемерзлых грунтов при сценариях RCP в XXI в. по расчетам глобальной климатической модели ИФА РАН

М. М. Аржанов*, А. В. Елисеев*^{**},

И. И. Мохов*

Получены оценки возможных климатических изменений и динамики криолитозоны суши Северного полушария в XXI в. с использованием глобальной климатической модели ИФА РАН при сценариях антропогенного воздействия RCP. Повышение среднегодовой приповерхностной температуры над сушей внетропических широт Северного полушария в течение XXI в. составляет 1,2—5,3 С в зависимости от сценария. Площадь снежного покрова в феврале сокращается от современного значения 46 млн. км² до 33—42 млн. км² в конце XXI в. Согласно модельным оценкам, приповерхностные многолетнемерзлые грунты к концу XXI в. даже при самом агрессивном сценарии антропогенного воздействия RCP 8.5 сохраняются в северных районах Западной Сибири, Забайкалье и Тибете, а при более умеренных антропогенных сценариях (RCP 6.0, RCP 4.5 и RCP 2.6) — также в Восточной Сибири и отдельных высокоширотных районах Северной Америки. Общая площадь приповерхностных многолетнемерзлых грунтов суши Северного полушария в XXI в. сокращается на 5,3—12,8 млн. км² в зависимости от сценария. К концу XXI в. осадка поверхности при деградации многолетнемерзлых грунтов в Центральной Сибири, Прибайкалье и Северной Америке может составить 0,5—0,8 м.

1. Введение

Наблюдаемое повышение глобальной приповерхностной температуры в XX в., наиболее значительное над сушей внетропических широт Северного полушария, может усилиться в XXI в. и, возможно, в последующие несколько столетий [19, 32]. Повышение приповерхностной температуры в арктических и субарктических регионах и изменение количества осадков влияют на термический и гидрологический режимы криолитозоны. В течение последних нескольких десятилетий отмечается общее повышение температуры многолетнемерзлых грунтов в субарктических регионах России [14, 22], на северо-западе Канады [47] и на Аляске [39]. В результате этого следует ожидать сокращения площади распространения приповерхност-

* Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова Российской академии наук; e-mail: arzhanov@ifaran.ru.

** Казанский (Приволжский) федеральный университет.

ных многолетнемерзлых грунтов, увеличения глубины сезонного протаивания, а также увеличения площади таликов и исчезновения неглубокой мерзлоты в ряде районов [1, 4, 10, 17, 23, 29, 32]. Данные наблюдений на геокриологических стационарах Центральной и Западной Сибири и Аляски демонстрируют систематическое увеличение глубины слоя сезонного протаивания [8, 37], снижение кровли многолетнемерзлых пород и изменение рельефа мониторинговых площадок [16]. Дегградация приповерхностной многолетней мерзлоты способствует развитию деструктивных геоморфологических процессов, вызывая просадку грунта и заболачивание территорий. Кроме того, оттаивание мерзлых пород может инициировать высвобождение активных парниковых газов, таких как диоксид углерода и метан, законсервированных в вечной мерзлоте [2, 11, 24, 28, 44, 45, 48].

Прогноз эволюции криолитозоны важен с точки зрения оценки опасности для существующей инфраструктуры полярных регионов, а также при проектировании новых объектов с учетом возможного изменения состояния многолетнемерзлых грунтов. В представленной работе проводится анализ влияния климатических изменений на развитие фоновых геокриологических процессов с учетом особенностей дегградации приповерхностной мерзлоты в переходных областях, где на протяжении XXI в. режим сезонного протаивания многолетнемерзлых грунтов может смениться режимом сезонного промерзания.

2. Описание численных экспериментов

Расчеты проводились с глобальной климатической моделью, разработанной в Институте физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН (КМ ИФА РАН), относящейся к классу моделей промежуточной сложности [31, 33, 40], содержащей блоки переноса коротковолновой и длинноволновой радиации, конвекции, образования облаков и осадков, углеродного (включая метановый) цикла, а также детальный блок процессов тепло- и влагопереноса в грунте [3, 5, 7, 12, 19].

Следует отметить, что современные климатические модели промежуточной сложности достаточно реалистично описывают отклик климата на внешние воздействия [33], в частности, КМ ИФА РАН хорошо воспроизводит доиндустриальное и современное состояние климатической системы, а также общие характеристики климатических изменений последних нескольких столетий [19]. В проведенных численных экспериментах для XXI в. изменения концентрации антропогенных парниковых газов задавались согласно сценариям RCP (Representative Concentration Pathways): 2.6 (наименее агрессивному), 4.5, 6.0 (умеренным) и 8.5 (наиболее агрессивному).

Для оценки осадки поверхности мерзлых грунтов при оттаивании в регионах дегградации приповерхностной мерзлоты использовали методику, представленную в работе [4]. В настоящее время разработано достаточно большое количество соотношений для расчета осадки при оттаивании в зависимости от физических свойств грунтов, влажности (льдистости), внешней нагрузки [15, 26, 27]. Такие соотношения основаны на эмпирических зависимостях для определенного типа разрезов либо содержат до-

статочной большой набор входных параметров, что позволяет применять их для расчетов только в отдельных локальных областях. Используемая в данной работе методика совместно с блоком процессов тепловлагопереноса в грунте позволяет учитывать содержание льдистости, а также динамику глубины сезонного протаивания (промерзания) и изменения глубины кровли многолетнемерзлых грунтов.

3. Изменения основных климатических характеристик и эволюция многолетнемерзлых грунтов в XXI в.

Повышение глобальной (глобально осредненной) среднегодовой приповерхностной температуры в XXI в. по расчетам климатической модели ИФА РАН составляет 0,8°C при сценарии RCP 2.6, 1,4 C при сценарии RCP 4.5, 1,8 C при сценарии RCP 6.0, 2,7 C при сценарии RCP 8.5 [19]. Аналогичные оценки при сценариях антропогенного воздействия семейства SRES (Special Report on Emissions Scenarios) составляют от 1,8 C при наиболее “слабом” сценарии SRES B1 до 3,4 C при “агрессивном” сценарии SRES A2 [32]. Повышение глобальной приповерхностной температуры в XXI в. при альтернативных российских сценариях [6] составляет 0,9—1,2 C. Потепление максимально над сушей внетропических широт Северного полушария, и к последнему десятилетию XXI в. относительно начала XXI в. повышение среднегодовой температуры над сушей севернее 30 с. ш. составляет от 1,2 до 5,3 C в зависимости от сценария.

К концу XXI в. среднегодовое приповерхностное потепление максимально при наиболее агрессивном сценарии RCP 8.5 и составляет 4—7 C в Евразии и 4—9 C в Северной Америке. При умеренных сценариях антропогенного воздействия RCP 4.5 и 6.0 пространственная структура изменения приповерхностной температуры сохраняется, но абсолютные значения ее приращения уменьшаются до 2—5 C в Евразии и до 2—7 C в Северной Америке. При наименее агрессивном сценарии RCP 2.6 потепление в Евразии составляет 1—2 C, в Северной Америке 1—4 C.

Изменение приповерхностной температуры в январе и июне над сушей высоких широт в 2091—2100 гг. относительно 2001—2010 гг. представлено на рис. 1. При рассматриваемых сценариях RCP потепление зимой сильнее, чем летом, над сушей Северного полушария, за исключением Чукотки, где при наиболее агрессивном сценарии антропогенного воздействия RCP 8.5 приповерхностная температура в XXI в. увеличивается на 1—2 C зимой и на 4—5 C летом. Изменение приповерхностной температуры в январе имеет выраженный максимум в средних широтах Евразии и Северной Америки (рис. 1д—з). Наибольшие изменения температуры в средних широтах (55—60 с. ш.) в Евразии вызваны максимальным проявлением положительной обратной связи температуры и альбедо поверхности. Подобный доминирующий вклад положительной обратной связи в формирование отклика температуры по результатам численных экспериментов с ансамблем климатических моделей в рамках международного проекта CMIP3 (Coupled Model Intercomparison Project, phase 3) отмечен в работе [41]. Сходная пространственная структура изменения приповерхностной зимней температуры в XXI в. получена в численных эксперимен-

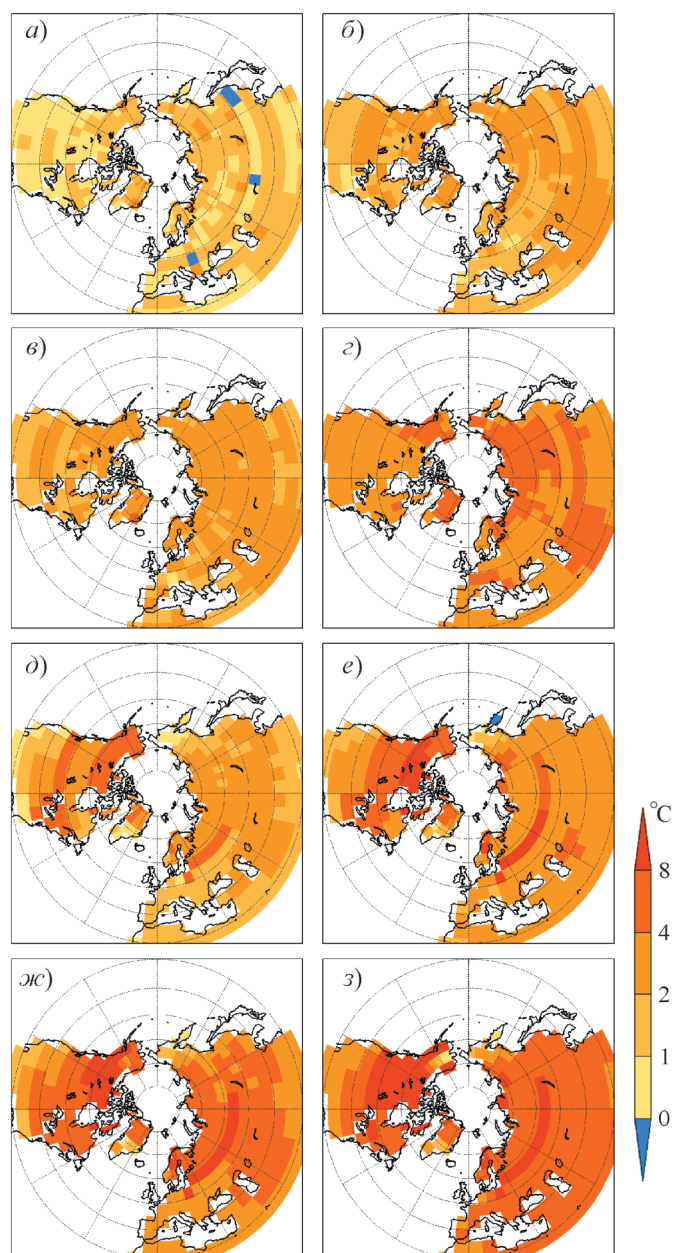


Рис. 1. Изменение летней (а—з) и зимней (д—з) приповерхностной температуры к 2091—2100 гг. относительно 2001—2010 гг. по расчетам климатической модели ИФА РАН при сценариях RCP: 2.6 (а, б), 4.5 (б, в), 6.0 (в, ж) и 8.5 (д, з).

тах с КМ ИФА РАН при альтернативных сценариях изменения содержания парниковых газов и аэрозолей в атмосфере [6]. Приповерхностное потепление в июне максимально в Евразии при сценарии RCP 8.5 (3—5°C, рис. 1з).

Общая площадь снежного покрова в Северном полушарии в феврале по расчетам климатической модели ИФА РАН для 2001—2010 гг. составляет 46 млн. км², что хорошо согласуется с эмпирическими оценками 43,2 млн. км² [18], 44—48 млн. км² [42], а также с результатами расчетов с КМ ИФА РАН для 1961—1990 гг. ($47,4 \pm 1,8$ млн. км²) [13] и в ансамблевых численных экспериментах с моделями общей циркуляции атмосферы и океана (49 ± 4 млн. км²) [23]. К последнему десятилетию XXI в. в КМ ИФА РАН при сценариях RCP площадь снежного покрова в феврале сокращается на 4—13 млн. км² в зависимости от сценария (на 8,7% при RCP 2.6 и на 28,3% при RCP 8.5). Полученные по расчетам с ансамблем климатических моделей CMIP5 оценки сокращения площади снежного покрова к концу XXI в. составляют $7,2 \pm 3,8\%$ при сценарии RCP 2.6, при сценарии RCP 8.5 $24,7 \pm 7,7\%$ [30]. Аналогичные оценки при сценариях семейства SRES составляют 13—16 млн. км² по расчетам с КМ ИФА РАН [13] и 6 ± 2 млн. км² по расчетам с ансамблем моделей общей циркуляции атмосферы и океана [23].

Модельные оценки водно-эквивалентной толщины снежного покрова в феврале для 2001—2010 гг. в Евразии составляют 10—20 см. Значения до 30 см отмечаются в Забайкалье и субарктических широтах Западной Сибири. Максимальные модельные значения водного эквивалента снега (порядка 50 см) получены для Тибета и Чукотки. Сходное пространственное распределение толщины снежного покрова в феврале в Евразии получено в работе [21] с учетом сезонных изменений плотности снега в модели теплопередачи в грунтах [36]. По сравнению с данными реанализа ERA-40 [49] значения водного эквивалента снега в КМ ИФА РАН больше в Тибете. Пространственное распределение водного эквивалента снега в Северной Америке с максимальными значениями (20—30 см) на п-ове Лабрадор и в Скалистых горах хорошо согласуется с данными работы [49].

К концу XXI в. по расчетам климатической модели ИФА РАН происходит увеличение водно-эквивалентной толщины снежного покрова в высоких широтах центральных регионов Евразии и Северной Америки (рис. 2а—г). Максимальное увеличение водно-эквивалентной толщины снежного покрова в Евразии и в Северной Америке (около 60 с. ш.) вызвано увеличением количества осадков при повышении в зимний период температуры атмосферы в этих регионах [20, 46]. Уменьшение толщины снежного покрова отмечено в умеренных широтах Северного полушария, в Тибете, на Чукотке, Аляске, п-ове Лабрадор. Изменение толщины снежного покрова в КМ ИФА РАН определяется двумя факторами: продолжительностью холодного периода года и количеством осадков. При этом в более высоких широтах преобладает эффект увеличения осадков при сохранении достаточного продолжительного холодного периода года, что приводит к увеличению снегозапаса. В средних широтах преобладает эффект уменьшения продолжительности холодного периода года.

Площадь распространения приповерхностных многолетнемерзлых грунтов суши Северного полушария в начале XXI в. по оценкам климатической модели ИФА РАН (15,8 млн. км²) находится в диапазоне эмпирических оценок (10,7—22,8 млн. км²) [50] площади сплошной и полной многолетней мерзлоты, а также согласуется со значениями, полученными

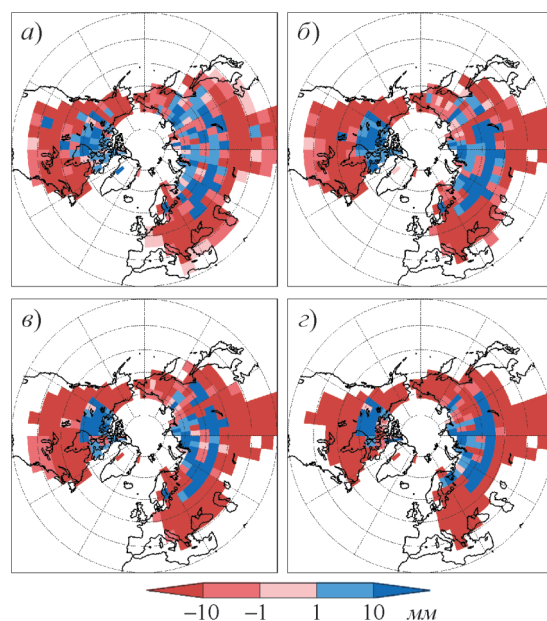


Рис. 2. Изменение водно-эквивалентной толщины снежного покрова в 2091—2100 гг. относительно 2001—2010 гг. по расчетам климатической модели ИФА РАН при сценариях RCP: 2.6 (а), 4.5 (б), 6.0 (в) и 8.5 (г).

на основе индексов относительной суровости (11—16 млн. км²) [9] и модельных расчетов (16—21 млн. км²) [4, 23, 43, 48]. Значения площади распространения многолетнемерзлых грунтов по расчетам КМ ИФА РАН в начале XXI в. составляют 11,4 млн. км² в Евразии и 4,4 млн. км² в Северной Америке. Пространственное распределение глубины сезонного протаивания в 2001—2010 гг. приведено на рис. 3. Как следует из модельных расчетов, к концу XXI в. можно отметить смещение южной границы распространения многолетнемерзлых грунтов к северу на Аляске и п-ове Лабрадор, связанное с образованием таликов в этом регионе. Наличие мерзлоты на юге Западной Сибири по данным КМ ИФА РАН связано со слабым откликом глубины протаивания торфяных залежей в этом регионе на внешние атмосферные воздействия [34]. Характерные значения глубины сезонного протаивания в начале XXI в. составляют 1,0—1,5 м в Восточной Сибири, 1,5—2,0 м в Центральной Сибири. Наибольшие значения этой величины (порядка 2,5—3,0 м) отмечаются на западе Западной Сибири и Прибайкалье. В Северной Америке модельные оценки глубины сезонного протаивания составляют 1,0—2,0 м, наименьшие значения (менее 0,5 м) получены для Тибета и Чукотки, что связано с небольшой продолжительностью теплого периода в годовом цикле в этих областях в КМ ИФА РАН (менее 50 дней).

В XXI в. при антропогенном потеплении площадь распространения приповерхностных многолетнемерзлых грунтов по расчетам климатической модели в КМ ИФА РАН сокращается при всех рассматриваемых сце-

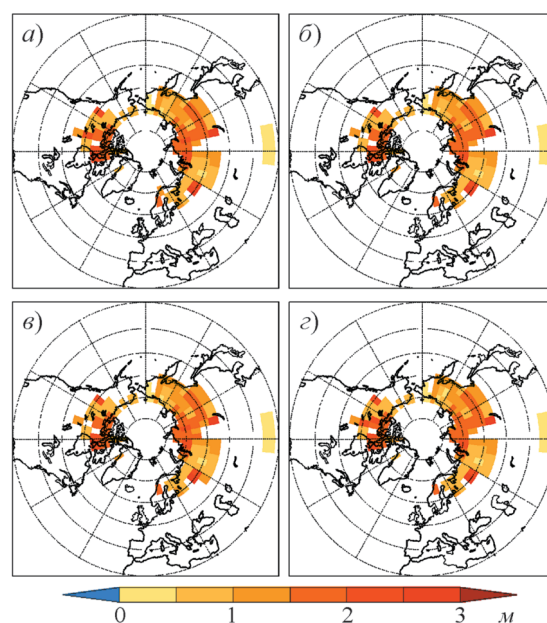


Рис. 3. Глубина сезонного протаивания в 2001—2010 гг. по расчетам климатической модели ИФА РАН при сценариях RCP: 2.6 (а), 4.5 (б), 6.0 (в) и 8.5 (г).

нариях, составляя к концу XXI в. 3 млн. км² при наиболее агрессивном сценарии антропогенного воздействия RCP 8.5 и 10,5 млн. км² при наименее агрессивном сценарии RCP 2.6 (рис. 4). Аналогичные оценки, полученные по расчетам с ансамблем моделей общей циркуляции атмосферы и океана, составляют 10 млн. км² [23].

Сокращение площади многолетнемерзлых грунтов в КМ ИФА РАН в XXI в. вызвано деградацией приповерхностных мерзлых грунтов в Центральной, Западной Сибири и Северной Америке. При наиболее агрессивном сценарии антропогенного воздействия RCP 8.5 к концу XXI в. деградация приповерхностных многолетнемерзлых грунтов происходит также в отдельных районах Восточной Сибири, что связано с увеличением продолжительности теплого периода в годовом цикле в этом регионе от 80 сут в начале XXI в. до 120 сут в конце и со значительным повышением летней температуры (рис. 1а—г). В тех регионах, где к концу XXI в. приповерхностные многолетнемерзлые грунты сохраняются, происходит увеличение глубины сезонного протаивания. Так, в Восточной Сибири значения глубины сезонного протаивания увеличиваются до 2,0—2,5 м при умеренных сценариях антропогенного воздействия и до 2,5—3,0 м при агрессивном антропогенном сценарии RCP 8.5. По результатам расчетов с КМ ИФА РАН, к концу XXI в. в Тибете не произойдет значительного увеличения глубины сезонного протаивания, что связано с небольшой продолжительностью теплого периода в годовом цикле. Следует отметить большую деградацию приповерхностных многолетнемерзлых грунтов в Северной Америке по сравнению с Евразией. Аналогичная тенденция преобладающей деградации многолетнемерзлых грунтов в Северной Америке в XXI в. выявлена по расчетам с ансамблем моделей общей циркуляции атмосферы и океана [23].

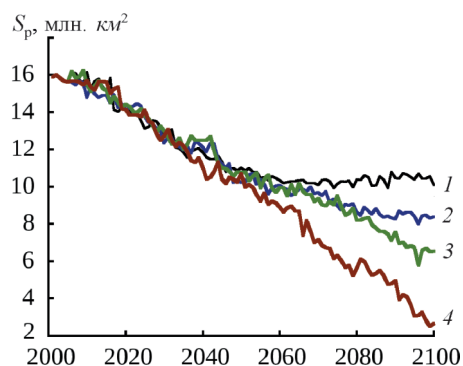


Рис. 4. Общая площадь распространения приповерхностных многолетнемерзлых грунтов суши Северного полушария по расчетам климатической модели ИФА РАН при сценариях RCP: 2.6 (1), 4.5 (2), 6.0 (3) и 8.5 (4).

Наибольшие значения осадки (0,5—0,8 м) получены для Прибайкалья, Центральной Сибири и высоких широт Северной Америки. Полученные оценки согласуются с отношением осадки поверхности к глубине талого слоя по данным спутниковой альтиметрии [35].

В областях, где режим сезонно-протаивания меняется на режим сезонного промерзания (образуются талики), происходит быстрое увеличение глубины талого слоя. Такой эффект при формировании таликов выявлен по данным наблюдений [16, 38] и результатам численных экспериментов [4, 25, 29, 51]. В зависимости от глубины талого слоя и с учетом того, что модельные значения объемной льдистости многолетнемерзлых грунтов до протаивания составляют 40—50% [16], были сделаны оценки потенциальной величины осадки поверхности мерзлых грунтов при многолетнем протаивании в XXI в. при сценариях RCP (рис. 5).

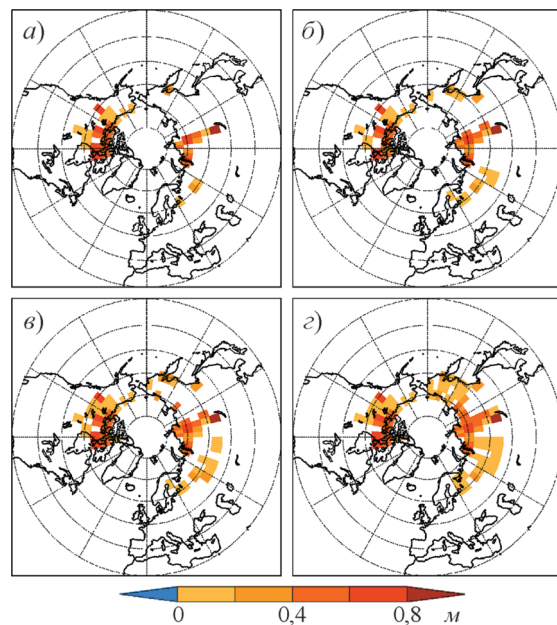


Рис. 5. Потенциальная осадка при оттаивании приповерхностных многолетнемерзлых грунтов к 2091—2100 гг. относительно 2001—2010 гг. по расчетам климатической модели ИФА РАН при сценариях RCP: 2.6 (а), 4.5 (б), 6.0 (в) и 8.5 (г).

4. Заключение

Получены оценки возможных изменений климата и динамики криоли-тозоны суши Северного полушария в XXI в. с использованием глобальной климатической модели ИФА РАН при сценариях антропогенного воздействия RCP. Увеличение глобальной среднегодовой приповерхностной температуры к концу XXI в. относительно его начала составляет 0,8—2,7°C в зависимости от сценария, среднегодовое потепление в XXI в. над сушей внетропических широт Северного полушария — 4—7 С (1—2°C) в Евразии и 4—9 С (1—4 С) в Северной Америке при наиболее (наименее) агрессивном сценарии антропогенного воздействия.

По модельным оценкам, на протяжении XXI в. произойдет общее уменьшение площади снежного покрова в Северном полушарии зимой на 4—13 млн. км² в зависимости от сценария. Увеличение водно-эквивалентной толщины снежного покрова происходит в высоких широтах центральных регионов Евразии и Северной Америки, уменьшение — на Чукотке, Тибете, Аляске и п-ове Лабрадор. При этом в более высоких широтах преобладает эффект увеличения количества осадков при сохранении достаточного продолжительного холодного периода года, что приводит к увеличению снегозапаса. В средних широтах преобладает эффект уменьшения продолжительности холодного периода года.

Площадь распространения приповерхностных многолетнемерзлых грунтов суши Северного полушария в проведенных численных экспериментах с КМ ИФА РАН к концу XXI в. сокращается на 5,3—12,8 млн. км² в зависимости от сценария. Общее уменьшение площади многолетнемерзлых грунтов составляет 20% при наименее агрессивном сценарии RCP 2.6 и 80% при наиболее агрессивном сценарии RCP 8.5 с опережающей деградацией мерзлоты в Северной Америке. К концу XXI в. при всех рассматриваемых сценариях антропогенного воздействия приповерхностные многолетнемерзлые грунты сохраняются в северных районах Западной Сибири, Забайкалье и Тибете, а при более умеренных антропогенных сценариях — также в Восточной Сибири и отдельных высокоширотных регионах Северной Америки. Деградация приповерхностных многолетнемерзлых грунтов в Прибайкалье, Центральной Сибири и Северной Америке может сопровождаться осадкой поверхности при оттаивании с максимальными значениями 0,5—0,8 м.

Работа выполнена в рамках проектов РФФИ (11-05-01139-а, 11-05-00531-а, 11-05-00576-а, 11-05-00579-а, 12-05-01092-а, 13-05-00781-а, 12-05-33050-мол-а-вед, 12-05-91323-СИГ_а, 13-05-10067-к), программ РАН, Министерства образования и науки РФ (соглашение 8833), ФЦП (Г/К № 14.740.11.1043, 02.740.11.0677, 16.525.11.5013, П523), гранта Президента РФ НШ-5467.2012.5.

Литература

1. **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.
2. **Анисимов О. А., Лавров С. А., Ренева С. А.** Эмиссия метана из многолетнемерзлых болот России в условиях изменения климата. // В сб.: Проблемы экологического моделирования и мониторинга экосистем, под ред. Ю. А. Израэля. — СПб, Гидрометеоздат, 2005, с. 124—142.
3. **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. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2008, т. 44, № 5, с. 591—610.
4. **Аржанов М. М., Демченко П. Ф., Елисеев А. В., Мохов И. И.** Моделирование осадки оттаивания многолетнемерзлых грунтов. — Криосфера Земли, 2010, т. XIV, № 3, с. 37—42.
5. **Аржанов М. М., Елисеев А. В., Демченко П. Ф., Мохов И. И.** Моделирование изменений температурного и гидрологического режимов приповерхностной мерзлоты с использованием климатических данных (реанализа). — Криосфера Земли, 2007, т. XI, № 4, с. 65—69.
6. **Аржанов М. М., Елисеев А. В., Клименко В. В. и др.** Оценки климатических изменений в Северном полушарии в XXI веке при альтернативных сценариях антропогенного воздействия. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2012, т. 48, № 6, с. 643—654.
7. **Аржанов М. М., Мохов И. И.** Температурные тренды в многолетнемерзлых грунтах Северного полушария: сравнение модельных расчетов с данными наблюдений. — Доклады АН, 2013, т. 449, № 1, с. 87—92.
8. **Гаврильев П. П., Угаров И. С.** Реакция пород ледового комплекса Центральной Якутии на потепление климата. — Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 1, с. 24—30.
9. **Демченко П. Ф., Величко А. А., Елисеев А. В. и др.** Зависимость условий распространения вечной мерзлоты от уровня глобального потепления: сравнение моделей, сценариев и данных палеорекоkonструкций. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2002, т. 38, № 2, с. 165—174.
10. **Демченко П. Ф., Елисеев А. В., Аржанов М. М., Мохов И. И.** Влияние скорости глобального потепления на таяние вечной мерзлоты. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2006, т. 45, № 6, с. 736—753.
11. **Денисов С. Н., Аржанов М. М., Елисеев А. В., Мохов И. И.** Чувствительность эмиссий метана болотными экосистемами Западной Сибири к изменениям климата: мультимодельные оценки. — Оптика атмосферы и океана, 2011, т. 24, № 4, с. 319—322.
12. **Елисеев А. В.** Оценка изменения характеристик климата и углеродного цикла в XXI веке с учетом неопределенности значений параметров наземной биоты. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2011, т. 47, № 2, с. 147—170.
13. **Елисеев А. В., Аржанов М. М., Демченко П. Ф., Мохов И. И.** Изменения климатических характеристик суши внетропических широт Северного полушария в XXI веке: оценки с климатической моделью ИФА РАН. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2009, т. 45, № 3, с. 291—304.
14. **Израэль Ю. А., Павлов А. В., Анохин Ю. А.** Эволюция криолитозоны при современных изменениях глобального климата. — Метеорология и гидрология, 2002, № 1, с. 22—34.
15. **Колмогоров А. В., Протодяконова Н. А.** Математическое моделирование геологических деформаций насыщенной пористой среды при фазовых переходах поровой влаги. — Наука и образование, 2007, № 1, с. 77—82.
16. **Мажитова Г. Г., Каверин Д. А.** Динамика глубины сезонного протаивания и осадки поверхности почвы на площадке циркумполярного мониторинга деятельного слоя (CALM) в Европейской части России. — Криосфера Земли, 2007, т. XI, № 4, с. 20—30.
17. **Мачульская Е. Е., Лыкосов В. Н.** Математическое моделирование процессов взаимодействия атмосферы и криолитозоны. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2009, т. 45, № 6, с. 736—753.

- 18. Мохов И. И.** Диагностика структуры климатической системы. — СПб, Гидрометеоздат, 1993, 271 с.
- 19. Мохов И. И., Елисеев А. В.** Моделирование глобальных климатических изменений в XX—XXIII веках при новых сценариях антропогенных воздействий RCP. — Доклады АН, 2012, т. 443, № 6, с. 732—736.
- 20. Мохов И. И., Семенов В. А., Хон В. Ч.** Оценки возможных региональных изменений гидрологического режима в XXI веке на основе глобальных климатических моделей. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2003, т. 39, № 2, с. 150—165.
- 21. Надежина Е. Д., Павлова Т. В., Школьник И. М. и др.** Модельные оценки пространственных распределений характеристик снежного покрова и многолетнемерзлых грунтов на территории России. — Криосфера Земли, 2010, т. XIV, № 2, с. 87—97.
- 22. Павлов А. В.** Мерзлотно-климатические изменения на севере России: наблюдения, прогноз. — Известия РАН. Серия геогр., 2003, № 6, с. 39—50.
- 23. Павлова Т. В., Катцов В. М., Надежина Е. Д. и др.** Расчет эволюции криосферы в XX и XXI веках с использованием глобальных климатических моделей нового поколения. — Криосфера Земли, 2007, т. XI, № 2, с. 3—13.
- 24. Ривкина Е. М., Краев Г. Н., Кривушин К. В. и др.** Метан в вечноммерзлых отложениях северо-восточного сектора Арктики. — Криосфера Земли, 2006, т. X, № 3, с. 23—41.
- 25. Сосновский А. В.** Математическое моделирование влияния толщины снежного покрова на деградацию мерзлоты при потеплении климата. — Криосфера Земли, 2006, т. X, № 3, с. 83—88.
- 26. Трофимов В. Т., Бадю Ю. Б., Дубиков Г. И.** Криогенное строение и льдистость многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской плиты. — М., Изд-во МГУ, 1980, 246 с.
- 27. Цытович Н. А.** Механика мерзлых грунтов. — М., Высшая школа, 1973, 447 с.
- 28. Arzhanov M. M.** Increasing carbon and nitrogen stocks in active layer under permafrost thawing. /In: Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling, A. Zadra (ed.). — Geneva, World Climate Research Programme, 2011, No. 1578, pp. 07.03—07.04.
- 29. Arzhanov M. M., Eliseev A. V., and Mokhov I. I.** A global climate model based, Bayesian climate projection for northern extratropical land areas. — Glob. Planet. Change, 2012, vol. 86—87, pp. 57—65.
- 30. Brutel-Vuilmet C., Menegoz M., and Krinner G.** An analysis of present and future seasonal Northern Hemisphere land snow cover simulated by CMIP5 coupled climate models. — The Cryosphere, 2013, vol. 7, pp. 67—80.
- 31. Claussen M., Mysak L. A., Weaver A. J., et al.** Earth system models of intermediate complexity: Closing the gap in the spectrum of climate system models. — Climate Dynamics, 2002, vol. 18, pp. 579—586.
- 32. Climate Change 2007: The Physical Science Basis.** S. Solomon, D. Qin, I. M. Manning, et al. (eds.). — Cambridge, New York, Cambridge University Press, 2007, 996 p.
- 33. Eby M., Weaver A. J., Alexander K., et al.** Historical and idealized climate model experiments: An EMIC intercomparison. — Climate of the Past, 2013, vol. 9, No. 3, pp. 1111—1140.
- 34. Lawrence D. M. and Slater A. G.** Incorporating organic soil into a global climate model. — Climate Dynamics, 2008, vol. 30, pp. 145—160.
- 35. Liu L., Schaefer K., Zhang T., and Wahr J.** Estimating 1992—2000 average active layer thickness on the Alaskan North Slope from remotely sensed surface subsidence. — J. Geophys. Res., 2012, vol. 117, pp. F01005.
- 36. Malevsky-Malevich S. P., Molkentin E. K., Nadyozhina E. D., and Shklyarevich O. B.** Numerical simulation of permafrost parameters distribution. — Cold Regions Sci. and Technol., 2001, No. 32, pp. 1—11.
- 37. Melnikov E. S., Leibman M. O., Moskalenko N. G., and Vasiliev A. A.** Active-layer monitoring in the cryolithozone of West Siberia. — Polar Geogr., 2004, vol. 5, No. 4, pp. 267—285.
- 38. Oberman N. G.** Contemporary permafrost degradation of northern European Russia. /In: Proc. of the Ninth Intern. Conf. on Permafrost. — Fairbanks, University of Alaska, 2008, vol. 2, pp. 1305—1310.
- 39. Osterkamp T. E. and Romanovsky V. E.** Evidence for warming and thawing of discontinuous permafrost in Alaska. — Permafrost and Periglacial Processes, 1999, vol. 10, pp. 17—37.
- 40. Petoukhov V., Claussen M., Berger A., et al.** EMIC Intercomparison Project (EMIP-CO₂): Comparative analysis of EMIC simulations of current climate and equilibrium and transient responses to atmospheric CO₂ doubling. — Climate Dynamics, 2005, vol. 25, No. 4, pp. 363—385.

41. **Qu X. and Hall A.** Assessing snow albedo feedback in simulated climate change. — J. Climate, 2006, vol. 19, No. 11, pp. 2617—2630.
42. **Robinson D. A. and Frei A.** Seasonal variability of Northern Hemisphere snow extent using visible satellite data. — Prof. Geogr., 2000, vol. 51, pp. 307—314.
43. **Saito K., Kimoto M., Zhang T., et al.** Evaluating a high-resolution climate model: Simulated hydrothermal regimes in frozen ground regions and their change under the global warming scenario. — J. Geophys. Res., 2007, vol. 112, No. 2, pp. F02S11.
44. **Schaefer K., Zhang T., Bruhwiler L., and Barret A. P.** Amount and timing of permafrost carbon release in response to climate warming. — Tellus B, 2011, vol. 63, No. 2, pp. 165—180.
45. **Schuur E. A. G., Bockheim J., Canadell J. G., et al.** Vulnerability of permafrost carbon to climate change: Implications for the global carbon cycle. — BioScience, 2008, vol. 58, No. 8, pp. 701—714.
46. **Semenov V. A. and Bengtsson L.** Secular trends in daily precipitation characteristics: Greenhouse gas simulation with a coupled AOGCM. — Climate Dynamics, 2002, vol. 19, pp. 123—140.
47. **Smith S. L., Burgess M. M., Riseborough D., and Nixon F. M.** Recent trends from Canadian permafrost thermal monitoring networks sites. — Permafrost and Pereglaç. Process., 2005, vol. 16, pp. 19—30.
48. **Tarnocai C., Canadell J. G., Schuur E. A. G., et al.** Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. — Glob. Biogeochemical Cycles, 2009, vol. 23, pp. GB2023.
49. **Uppala S. M., Kallberg P. W., Simmons A. J., et al.** The ERA-40 re-analysis. — Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 2005, vol. 131, No. 612, pp. 2961—3012.
50. **Zhang T., Barry R. G., Knowles K., et al.** Statistics and characteristics of permafrost and ground-ice distribution in the Northern Hemisphere. — Polar Geogr., 1999, vol. 23, No. 2, pp. 132—154.
51. **Zhang Y., Chen W., and Riseborough D. W.** Disequilibrium response of permafrost thaw to climate warming in Canada over 1850—2100. — Geophys. Res. Lett., 2008, vol. 35, No. 2, pp. L02502.

Поступила
5 II 2013

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

M. M. Arzhanov, A. V. Eliseev, and I. I. Mokhov

The estimates of possible climate changes and cryolitozone dynamics in the 21st century over the Northern Hemisphere land are obtained using the IAP RAS global climate model forced by the RCP (Representative Concentration Pathways) scenarios. Annual mean warming over the northern extratropical land during the 21st century amounts to 1.2–5.3 °C depending on the scenario. The snow cover area in February amounting currently to 46 million km² decreases to 33–42 million km² in the late 21st century. According to model estimates, the near-surface permafrost in the late 21st century persists in northern West Siberia, in Transbaikalia and Tibet even under the most aggressive RCP 8.5 scenario; under more moderate RCP 6.0, RCP 4.5, and RCP 2.6 scenarios, it remains in East Siberia and in some high-latitude regions of North America. The total near-surface permafrost area in the Northern Hemisphere in the current century decreases by 5.3–12.8 million km² depending on the scenario. The soil subsidence due to permafrost thawing in Central Siberia, Transbaikalia, and North America can reach 0.5–0.8 m.