

УДК 551.583:551.34:536.4.032

МОДЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ВНУТРИ- И МЕЖВЕКОВОЙ ДЕГРАДАЦИИ “ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ” В РЕГИОНЕ ПОЛУОСТРОВА ЯМАЛ ПРИ ПОТЕПЛЕНИИ

© 2022 г. Академик РАН И. И. Мохов^{1,2,*}, В. В. Малахова³, М. М. Аржанов¹

Поступило 30.03.2022 г.

После доработки 20.05.2022 г.

Принято к публикации 17.06.2022 г.

Получены оценки внутри- и межвековой деградации многолетнемерзлых грунтов (ММГ) на разной глубине и условий устойчивости метангидратов в регионе п-ва Ямал при потеплении на основе модели теплопереноса в грунте с использованием расчетов с глобальными климатическими моделями. В том числе использовались результаты расчетов с климатической моделью промежуточной сложности для последних 130 тыс. лет и расчеты с климатическими моделями общей циркуляции ансамбля CMIP6 (ScenarioMIP) с 1850 г. до конца XXI века при разных сценариях антропогенных воздействий семейства SSP, в частности сценария SSP5-8.5. Получены оценки предельных режимов существования ММГ на разной глубине и условий устойчивости метангидратов в регионе п-ва Ямал при продлении сценариев глобального потепления до 2300 г. в соответствии с протоколом CMIP6 и модельных расчетов для следующих 15 тысячелетий (с использованием, в частности, сценария антропогенных воздействий SSP5-8.5 до 2100 г.).

Ключевые слова: внутри- и межвековые изменения климата, моделирование, деградация вечной мерзлоты, устойчивость метангидратов, полуостров Ямал

DOI: 10.31857/S2686739722100383

ВВЕДЕНИЕ

Климат в высоких широтах характеризуется большой изменчивостью и высокой чувствительностью к естественным и антропогенным воздействиям, в том числе в российских арктических и субарктических регионах с быстрыми темпами потепления в последние десятилетия. Особо значимы климатические изменения в криолитозоне с деградацией многолетнемерзлых грунтов (ММГ) при потеплении, оценке которых посвящено много исследований [1–8].

Общее потепление с ростом температуры многолетнемерзлых пород способствует увеличению вероятности превышения равновесной температуры метастабильных метангидратов. При этом вследствие уменьшения устойчивости реликтовых гидратов газов континентальной криолито-

зоны, находящихся выше современной границы зоны стабильности, и их диссоциации увеличивается вероятность газовых выбросов в атмосферу. В последние годы на фоне быстрого потепления у поверхности (до 1 К и более за десятилетие) и таяния “вечной мерзлоты” на полуострове Ямал и в соседних регионах отмечены новые геофизические явления – кратеры в мерзлоте (с диаметром около 10–20 м) со следами выброшенной породы. В связи с таянием мерзлоты такие кратеры достаточно быстро (в пределах двух лет) заполняются водой и образуются озера. Многочисленные подобные озера в этих регионах свидетельствуют о высокой вероятности подобных явлений при современном климате и о том, что современное потепление климата может быть не только сопоставимо с потеплением оптимума голоцена около 6 тыс. лет назад, но и превосходить его, по крайней мере на региональном уровне [9, 10]. В целом это согласуется с оценками, полученными для голоцена в [11].

В [9, 12–15] на основе модельных расчетов сделаны оценки изменений региональных режимов ММГ на Ямале для последних 130 тыс. лет, в том числе с оценками возможности существования в многолетнемерзлых грунтах реликтовых метангидратов сравнительно неглубокого залегания.

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова
Российской академии наук, Москва, Россия

² Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³ Институт вычислительной математики
и математической геофизики Сибирского отделения
Российской академии наук, Новосибирск, Россия

*E-mail: mokhov@ifaran.ru

Согласно полученным результатам, образование воронок в мерзлоте, как на полуострове Ямал, можно объяснить диссоциацией метангидратов неглубокого залегания с газовыми выбросами в атмосферу при современных климатических изменениях с таянием вечной мерзлоты. Такие гидраты могли сформироваться под ледовым щитом в периоды оледенения десятки тысяч лет назад [15, 16].

В [17] наряду с внутривековыми изменениями в криолитозоне при возможных изменениях климата до конца XXI века получены модельные оценки межвековых изменений границ распространения ММГ и глубины сезонного протаивания почвы до конца XXIII века, в том числе для российских регионов. При этом для XXI века использовались разные сценарии семейства RCP (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5), а для XXII–XXIII веков использовались фиксированные на уровне 2100 г. антропогенные воздействия (в соответствии с протоколом СМIP5). Выявлено, в частности, что при наиболее агрессивном сценарии антропогенных воздействий RCP 8.5 приповерхностные ММГ повсеместно исчезают в XXIII веке. Отмечено также существенное сокращение площади регионов, подверженных зимнему промерзанию.

Наряду с полученными модельными оценками приповерхностных ММГ необходимы соответствующие оценки условий деградации при общем потеплении ММГ (и метангидратов) глубокого залегания. В данной работе представлены модельные оценки внутри- и межвековых изменений ММГ (вплоть до их исчезновения) на разной глубине при потеплении в регионе полуострова Ямал, для которого характерны быстрые современные изменения климата.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МОДЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ

Расчеты режима многолетнемерзлых грунтов и термобарических условий (*PT*-условий) устойчивости метангидратов в регионе п-ва Ямал проводились с моделью теплопереноса в грунте (МТПГ), подробно описанной в [15, 16, 18]. Распространение тепла в грунте описывалось одномерным уравнением теплопроводности с учетом фазовых переходов между талым и мерзлым слоем и влияния снежного покрова. На нижней границе области (на глубине 1500 м) задавался геотермальный поток тепла (в частности, для Ямала — 50 мВт/м²), не зависящий от времени. Теплофизические характеристики грунта определялись, в частности, как для суглинистых отложений — в соответствии с данными бурения в регионе Ямала [22]. В том числе использовались значения объемной теплоемкости мерзлого и талого грунта 2.3 МДж/(м³ °С) и 3.1 МДж/(м³ °С), а также значения коэффициента

теплопроводности мерзлого и талого грунта 1.7 и 1.5 Вт/(м °С) соответственно. При получении представленных результатов расчетов задавалась постоянная влажность грунта, соответствующая полному влагонасыщению при пористости 0.3. При промерзании грунта считалось, что в поровом пространстве вся вода превращается в лед. Учитывалась концентрация солей в поровом растворе, понижающая температуру замерзания воды в грунте. В связи с этим температура фазовых переходов вода—лед, как порог для формирования мерзлого грунта, принималась равной $T_f = -1^\circ\text{C}$.

В [16] была проведена верификация используемой модели с сопоставлением результатов расчетов с данными геологических разрезов для двух скважин на о. Новая Сибирь. Данные геологических разрезов, необходимые для решения задачи Стефана, в верхних 80 и 200 метрах (в зависимости от скважины) задавались в соответствии с результатами бурения, а ниже — в соответствии с данными геологических исследований. Проведенная коррекция свойств пород, используемых в расчетах, позволила улучшить соответствие натурных и модельных данных.

Наряду с термическим режимом грунта определялись термодинамические границы зоны стабильности газогидратов метана (ЗСГМ). Равновесное давление, при котором метан, вода или лед и гидраты могут существовать в фазовом и химическом равновесии при данной температуре, определялось аналогично [19]. В модельных расчетах давление учитывалось как гидростатическое. При отрицательных температурах грунта и давлениях ниже равновесного возможно существование метангидратов в метастабильном состоянии вне области их термодинамической стабильности. Для оценки области существования гидратов в метастабильных условиях рассчитывалась ее верхняя граница.

Температура поверхности грунта (или снежного покрова — при его наличии) принималась равной приповерхностной температуре атмосферы. Численные расчеты с моделью теплопереноса в грунте проводились с шагом по глубине 0.5 м и с шагом по времени один месяц.

С использованием МТПГ при изменениях граничных условий (на границе с атмосферой) по расчетам с глобальной климатической моделью CLIMBER-2 до 1850 г. [20] оценивались изменения ММГ и ЗСГМ в течение последних 130 тыс. лет [15]. В качестве верхних граничных условий для теплопереноса в грунте задавались вариации среднемесячной приповерхностной температуры T_a для северных регионов Западной Сибири. При этом значения толщины снежного покрова на границе атмосфера—грунт определялись по модельным расчетам среднемесячных осадков в северных регионах Западной Сибири.

Численные расчеты с МТПГ режимов ММГ и *PT*-условий для региона п-ва Ямал после 1850 г. до 2100 г. проводились с использованием результатов расчетов с ансамблем климатических моделей семейства CMIP6 при разных сценариях антропогенных воздействий семейства SSP для XXI века. В том числе, для периода 1850–2100 гг. использовались результаты расчетов приповерхностной температуры и осадков с климатическими моделями GFDL-ESM4; MPI-ESM1-2-HR и IPSL-CM6A-LR, CanESM5 при сценариях SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5. Для начального периода 1850–1950 гг. среднегодовая приповерхностная температура по использовавшимся расчетам с климатическими моделями ансамбля CMIP6 получена равной -10°C (в том числе: -9.8°C для IPSL-CM6A-LR, -10.2°C для GFDL-ESM4, -10.3°C для MPI-ESM1-2-HR).

Наряду с этим анализировались результаты расчетов с МТПГ для периода 2100–2300 гг. при граничных условиях по расчетам с климатической моделью CanESM5 при разных сценариях семейства SSP для XXI века. В рамках международного проекта сравнения климатических моделей CMIP6 (ScenarioMIP) предложено развитие сценариев семейства SSP для периода 2100–2300 гг. В том числе предложено расширение сценария SSP5-8.5 с линейным снижением антропогенных эмиссий в атмосферу CO_2 после 2100 г. до уровня менее 10 ГтС год^{-1} в 2250 г. при остающихся постоянными на уровне 2100 г. остальных антропогенных эмиссиях [21]. Кроме того, проведены численные расчеты МТПГ для периода 2300–16 850 гг. при граничных условиях по расчетам с климатической моделью CanESM5 с фиксированными на уровне 2300 г. граничными условиями (температурой и осадками, рассчитанными в соответствии со сценарием SSP5-8.5 до 2100 г. и ScenarioMIP CMIP6 для периода 2100–2300 гг.).

В целом анализировались результаты непрерывных численных расчетов режимов ММГ и *PT*-условий с МТПГ для региона п-ва Ямал для периода 130 тыс. лет в прошлом – до 1850 г. и для 15 тысяч лет после 1850 г. – до 16 850 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для расчетов режимов ММГ и *PT*-условий в регионе п-ва Ямал на основе МТПГ в качестве граничных условий использовались результаты расчетов климатических изменений, в том числе изменений приповерхностной температуры, с глобальными моделями. На рис. 1 представлены изменения среднегодовой приповерхностной температуры (T_a) в регионе п-ва Ямал, использовавшихся в качестве граничных условий, для периода 1850–2100 гг. по расчетам с ансамблем климатических моделей (в том числе, MPI-ESM1-2-HR,

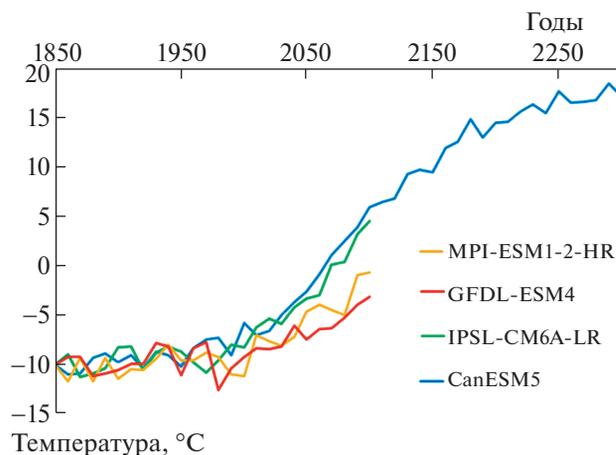


Рис. 1. Изменения среднегодовой приповерхностной температуры в регионе п-ва Ямал, использовавшихся в качестве граничных условий, для периода 1850–2100 гг. по расчетам с ансамблем климатических моделей (в том числе, MPI-ESM1-2-HR, GFDL-ESM4, IPSL-CM6A-LR и CanESM5) при сценарии антропогенных воздействий SSP5-8.5 для XXI века. Результаты расчетов T_a с климатической моделью CanESM5 приведены также для периода 2100–2300 гг. при продлении сценария SSP5-8.5 в соответствии с протоколом CMIP6 (ScenarioMIP).

GFDL-ESM4, IPSL-CM6A-LR и CanESM5) при сценарии антропогенных воздействий SSP5-8.5 для XXI века. Результаты расчетов T_a с климатической моделью CanESM5 приведены также для периода 2100–2300 гг. при продлении сценария SSP5-8.5 в соответствии с протоколом CMIP6 (ScenarioMIP).

Согласно рис. 1 к концу XXI века среднегодовая приповерхностная температура в регионе п-ва Ямал по модельным расчетам при сценарии SSP5-8.5 увеличится от -10°C в середине XX века минимально до -3°C (на 7°C), а максимально до 6°C (на 16°C). При этом к концу XXIII века при использовавшемся сценарии антропогенных воздействий величина T_a по расчетам с климатической моделью CanESM5 увеличивается до 18°C .

На рис. 2 представлены температурные профили в верхних слоях грунта для региона п-ва Ямал на разных временных горизонтах до 2100 г. по расчетам с МТПГ при климатических изменениях в соответствии со сценарием антропогенных воздействий SSP5-8.5 по расчетам с разными климатическими моделями: GFDL-ESM4 (а), IPSL-CM6A-LR (б), MPI-ESM1-2-HR (в), CanESM5 (г). Для современного периода модельные значения температуры для верхних горизонтов пород (до 100 м) в диапазоне от -6 до -7°C соответствуют данным наблюдений [23]. Согласно рис. 2, максимальные различия в приповерхностных слоях почвы около 2°C . При этом изменения температуры грунтов в криолитозоне в регионе

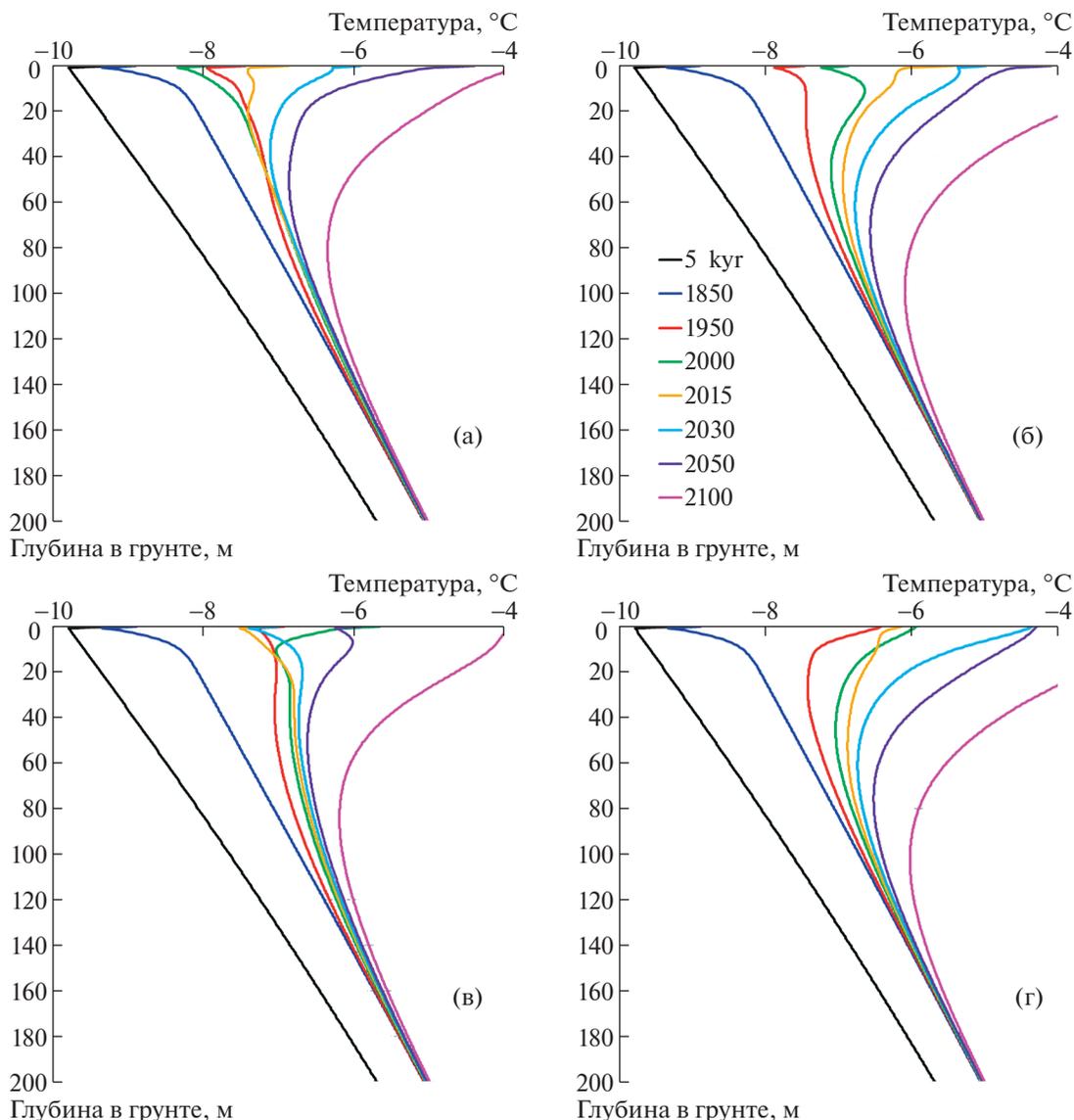


Рис. 2. Температурные профили в верхних слоях грунта (глубина в м) на разных временных горизонтах до 2100 г. по расчетам с моделью теплопереноса в грунте при климатических изменениях в соответствии со сценарием антропогенных воздействий SSP5-8.5 по расчетам с разными моделями: GFDL-ESM4 (а), IPSL-CM6A-LR (б), MPI-ESM1-2-HR (в), CanESM5 (г).

Ямала в XXI веке существенно проявляются до глубин около 100 м и глубже. При этом температурные различия в грунте при сценариях SSP5-8.5 и SSP1-2.6 к 2100 г. достигают и превышают 2°C в верхних 10 м, в верхних 30 м – 1°C , а в верхних 50 м – 0.5°C .

На рис. 3 представлены температурные профили в верхних слоях грунта (глубина в м) на разных временных горизонтах до 2300 г. по расчетам с МТПГ при климатических изменениях по расчетам с моделью CanESM5 при продлении сценария антропогенных воздействий SSP5-8.5 после 2100 г. в соответствии с протоколом CMIP6 (ScenarioMIP).

Согласно результатам модельных расчетов на рис. 3 среднегодовая температура у поверхности становится положительной (в $^{\circ}\text{C}$) в первой половине XXII века. К концу XXII века граница со среднегодовой положительной температурой достигает глубины более 20 м, а к концу XXIII века превышает 40 м. Согласно модельным расчетам изменения температуры грунтов в криолитозоне в регионе Ямала в XXII веке существенно проявляются до глубин 150 м и глубже, в XXIII веке – до глубин около 200 м и глубже.

На рис. 4 представлены температурные профили в верхних слоях грунта на разных временных горизонтах до 11000 г. по расчетам с МТПГ

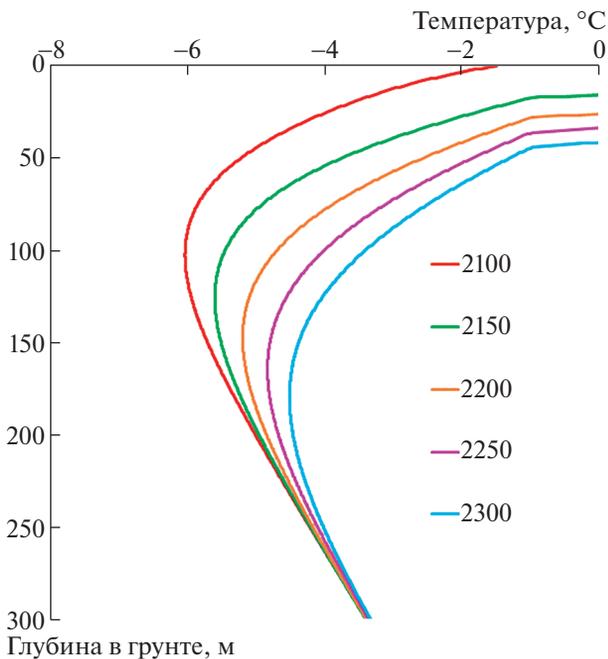


Рис. 3. Температурные профили в верхних слоях грунта (глубина в м) на разных временных горизонтах с 2100 до 2300 г. по расчетам с моделью теплопереноса в грунте при климатических изменениях по расчетам с моделью CanESM5 при продлении сценария антропогенных воздействий SSP5-8.5 после 2100 г. в соответствии с протоколом CMIP6 (ScenarioMIP).

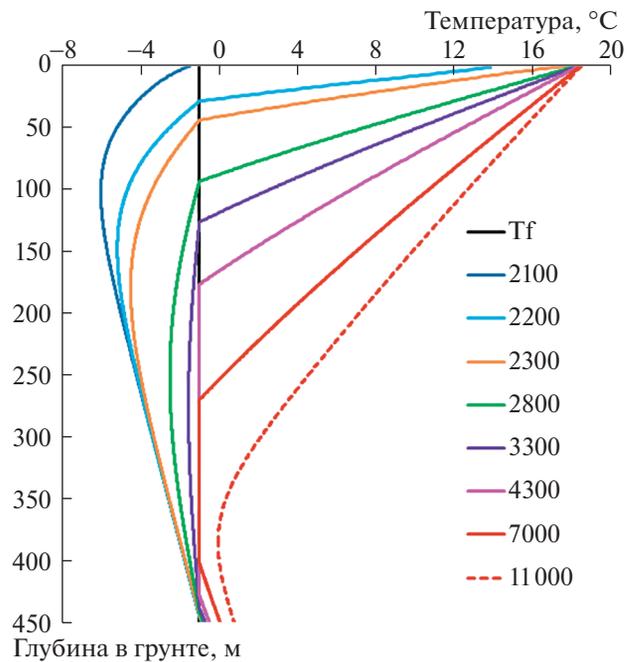


Рис. 4. Температурные профили в верхних слоях грунта на разных временных горизонтах по расчетам с моделью теплопереноса в грунте при климатических изменениях по расчетам с моделью CanESM5 при сценарии антропогенных воздействий SSP5-8.5 до 2100 г. и продлении сценария антропогенных воздействий после 2100 г. в соответствии с протоколом CMIP6 (ScenarioMIP), а также для периода 2300–16 850 гг. при фиксированных на уровне 2300 г. граничных условиях.

при климатических изменениях по расчетам с моделью CanESM5 при сценарии антропогенных воздействий SSP5-8.5 до 2100 г. и продлении сценария антропогенных воздействий после 2100 г. в соответствии с протоколом CMIP6 (ScenarioMIP), а также для периода 2300–16 850 гг. при фиксированных на уровне 2300 г. граничных условиях.

Согласно рис. 4 среднегодовая температура у поверхности в регионе п-ва Ямал по модельным оценкам ниже 0°C к концу XXI века, около 14°C к концу XXII века и достигает значений около 18°C и более после 2300 г. При этом граница со среднегодовой температурой $T_f = -1^\circ\text{C}$ для фазовых переходов вода–лед достигает глубин залегания метастабильных гидратов в третьем тысячелетии, а глубины верхней границы ЗСГМ – в пятом. К 7 тысячелетию граница с положительной температурой (в °C) достигает глубин около 250 м. С начала 5 тысячелетия температура в мерзлом слое достигает уровня температуры фазовых переходов и температурный профиль в ММГ становится безградиентным. К 11 тысячелетию ММГ полностью деградируют, и температура во всем слое грунта в регионе п-ва Ямал становится положительной.

На рис. 5 а, б приведены изменения (а) глубины верхней и нижней границы ЗСГМ и верхней

границы метастабильности гидратов, а также верхней и нижней границ многолетнемерзлого слоя в регионе п-ва Ямал по расчетам на основе МТПГ для последних 20 тысяч лет с использованием расчетов с климатической моделью CLIMBER-2 (а) и с использованием расчетов с разными климатическими моделями ансамбля CMIP6 с 1850 г. до 2100 при сценарии SSP5-8.5 с продлением сценария антропогенных воздействий после 2100 г. в соответствии с протоколом CMIP6 (ScenarioMIP), а также для периода 2300–16850 гг. при фиксированных на уровне 2300 г. граничных условиях (б). Наименьшие значения глубины залегания верхней границы ЗСГМ (около 160–170 м) и границы метастабильности (около 50 м) отмечаются во время последнего ледникового максимума около 20 тыс. лет назад с последующим понижением до глубины около 210 м и 140 м, соответственно, к 19 веку (рис. 5 а). Глубина нижней границы многолетнемерзлого слоя в течение последних 20 тыс. лет менялась в диапазоне 440–475 м. Максимальное заглубление нижней границы ММГ до 475 м отмечено для периода 15–13 тыс. лет назад. Значение мощности многолетнемерзлых пород в численных расчетах при

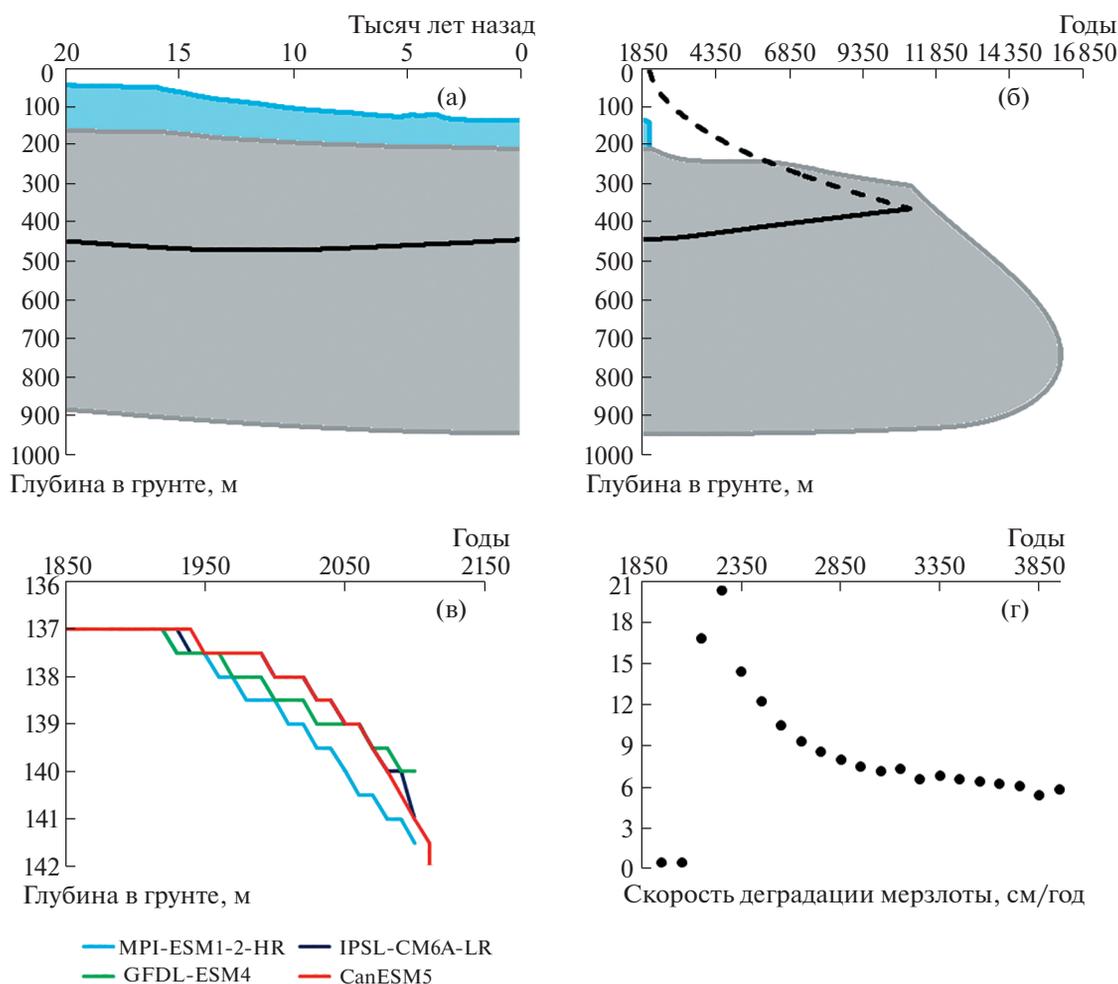


Рис. 5. Изменения слоя ЗСГМ (выделено серым цветом) и слоя метастабильности гидратов (выделено голубым цветом), а также верхней (пунктир) и нижней (черная кривая) границ многолетнемерзлого слоя в регионе п-ва Ямал по расчетам на основе МТПГ для последних 20 тыс. лет с использованием расчетов с климатической моделью CLIMBER-2 (а) и с использованием расчетов с разными климатическими моделями ансамбля CMIP6 с 1850 до 2100 г. при сценарии SSP5-8.5 с продлением сценария антропогенных воздействий после 2100 г. в соответствии с протоколом CMIP6 (ScenarioMIP), а также для периода 2300–16 850 гг. при фиксированных на уровне 2300 г. граничных условиях (б); (в) изменения верхней границы слоя метастабильности гидратов по модельным расчетам для периода 1850–2150 гг. при сценарии SSP5-8.5; (г) скорость деградации многолетнемерзлого слоя (см/год) для периода 1850–4000 гг.

современных климатических условиях (440 м) согласуется с оценками по данным наблюдений (300–500 м).

Для нижней границы ЗСГМ отмечена тенденция ее заглубления ниже 900 м, это связано с запаздыванием на больших глубинах температурного отклика на внешние воздействия [18].

На рис. 5 б приведены изменения мощности ММГ в регионе п-ва Ямал по модельным расчетам с использованием приведенных на рис. 1 изменений температуры на поверхности после 1850 г. до 2300 г. и ее неизменности в дальнейшем. Согласно рис. 5 б понижение верхней границы ММГ до глубины около 350 м, сопровождающееся повышением нижней границы ММГ (от уровня около 440–450 м), приводит к исчезновению

многолетнемерзлого слоя в регионе п-ва Ямал через 9 тыс. лет (около 11 000 г.). При этом понижение верхней границы ЗСГМ до глубины около 750 м примерно через 14 тыс. лет, сопровождающееся общим повышением нижней границы ЗСГМ (от уровня глубже 900 м), приводит к исчезновению ЗСГМ (к 16 040 г.). Значительно быстрее нарушаются условия метастабильного существования метангидратов на глубинах 140–210 м (см. рис. 5б). К концу XXI века, согласно рис. 5 в, верхняя граница слоя метастабильных гидратов по модельным расчетам для периода 1850–2100 гг. при сценарии SSP5-8.5 заглубляется на 3–5 м (с глубины 137 м до глубин 140–142 м). Условия метастабильного существования гидратов полностью нарушаются к 2110 г.

Полученные модельные оценки при анализированных сценариях антропогенных воздействий свидетельствуют о существенных изменениях скорости деградации слоя ММГ. Согласно рис. 5 г до середины XXI века средняя скорость деградации около 0.5 см/год и резко увеличивается в XXI–XXIII веках до значений около 2 м и более за десятилетие с последующим уменьшением в течение 2 тысяч лет до значений около 6 см/год.

В проведенных расчетах границ возможных зон стабильности метангидратов не учитывались затраты тепла на диссоциацию газогидратов (предполагалась нулевая гидратонасыщенность пород). Фазовые переходы при диссоциации газовых гидратов, как и при таянии льда, связаны с потреблением тепла. Скрытая теплота диссоциации гидратов метана на 30% больше, чем при таянии льда. При учете отмеченных эффектов увеличиваются периоды таяния мерзлоты и исчезновения зоны стабильности газовых гидратов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены оценки внутри- и межвековой деградации ММГ на разной глубине и условий устойчивости метангидратов в регионе п-ва Ямал при потеплении на основе модели теплопереноса в грунте с использованием расчетов с глобальными климатическими моделями. В том числе использовались результаты расчетов с климатической моделью промежуточной сложности для последних 130 тыс. лет и расчеты с климатическими моделями общей циркуляции ансамбля CMIP6 с 1850 г. до конца XXI века при разных сценариях антропогенных воздействий семейства SSP, в частности сценария SSP5-8.5. Получены оценки предельных режимов существования ММГ на разной глубине и условий устойчивости метангидратов при продлении сценариев глобального потепления до 2300 г. в соответствии с протоколом CMIP6 (ScenarioMIP), а также для следующих 15 тысячелетий.

В течение последних 20 тысяч лет глубина нижней границы многолетнемерзлого слоя менялась по модельным оценкам для региона п-ва Ямал от 475 м до 440 м. При этом для нижней и верхней границ ЗСГМ и границы метастабильности по модельным оценкам отмечена тенденция заглубления относительно наименьших значений во время последнего ледникового максимума около 20 тысяч лет назад к XIX веку.

В XXI веке изменения температуры грунтов в криолитозоне в регионе Ямала по модельным расчетам достаточно существенно проявляются до глубин около 100 м и более, в XXII веке — до глубин около 150 м и более, в XXIII веке — до глубин около 200 м и более. Скорость деградации слоя ММГ резко увеличивается в регионе п-ва Ямал до

значений около 2 м и более за десятилетие в XXI–XXIII веках с последующим трехкратным уменьшением в течение 2 тысяч лет.

При общем потеплении заглубление верхней границы ММГ до уровня около 350 м, сопровождающееся подъемом нижней границы ММГ (от уровня около 440 м), приводит к исчезновению многолетнемерзлого слоя в регионе п-ва Ямал через 9 тысяч лет. Общее заглубление верхней границы ЗСГМ (до глубины около 750 м) и общий подъем нижней границы ЗСГМ (от уровня глубже 900 м) согласно полученным модельным оценкам приводят к исчезновению ЗСГМ в 16 тысячелетий — через 5 тысячелетий после полного исчезновения мерзлоты в регионе п-ва Ямал.

Следует отметить, что в проведенных расчетах задавались постоянные по глубине теплофизические свойства пород, влажность грунта, пористость. Для более полного описания процессов деградации многолетнемерзлых пород при потеплении необходим учет влияния непостоянства свойств пород по глубине.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Анализ влияния климатических изменений на состояние мерзлоты проведен в рамках проекта РФ (19-17-00240). Оценка влияния климатических изменений на состояние метангидратов получена в рамках проекта РФ (20-11-20112).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Masson-Delmotte, V., et al. (eds.)). Cambridge Univ. Press. 2021.
2. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет. 2014. 1008 с.
3. Метеорологические и геофизические исследования. М.: Paulsen. 2011. 352 с.
4. Павлов А.В., Малкова Г.В. Мелкомасштабное картографирование трендов современных изменений температуры грунтов на севере России // Криосфера Земли. 2009. Т. 13. № 4. С. 28–38.
5. Arzhanov M.M., Eliseev A.V., Mokhov I.I. A global climate model based, Bayesian climate projection for northern extra-tropical land areas // Glob. Planet. Change. 2012. V. 86–87. P. 57–65.
6. Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzi J., et al. Permafrost is warming at a global scale // Nature Com. 2019. V. 10. 264. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4>
7. Vasiliev A.A., Drozdov D.S., Gravis A.G., Malkova G.V., Nyland K.E., Streletskiy D.A. Permafrost degradation in the Western Russian Arctic // Environ. Res. Lett. 2020.

- V. 15. 045001.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6f12>
8. Мохов И.И. Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования // Вестник РАН. 2022. Т. 92. № 1. С. 3–14.
 9. Аржанов М.М., Мохов И.И. Оценки степени устойчивости континентальных реликтовых метангидратов в оптимуме голоцена и при современных климатических условиях // ДАН. 2017. Т. 476. № 4. С. 456–460.
 10. Мохов И.И., Елисеев А.В., Гурьянов В.В. Модельные оценки глобальных и региональных изменений климата в голоцене // ДАН. 2020. Т. 490. № 1. С. 27–32.
 11. Marcott S.A., Shakun J.D., Clark P.U., Mix A.C. A reconstruction of regional and global temperature for the past 11300 years // Science. 2013. V. 339. P. 1198–1201.
 12. Аржанов М.М., Мохов И.И., Денисов С.Н. Влияние региональных климатических изменений на устойчивость реликтовых газовых гидратов // ДАН. 2016. Т. 468. № 5. С. 572–574.
 13. Аржанов М.М., Мохов И.И., Денисов С.Н. Дестабилизация реликтовых газовых гидратов при наблюдаемых региональных изменениях климата // Арктика: экология и экономика. 2016. № 4. С. 46–51.
 14. Аржанов М.М., Малахова В.В., Мохов И.И. Условия формирования и диссоциации метангидратов в течение последних 130 тысяч лет по модельным расчетам // ДАН. 2018. Т. 480. № 6. С. 725–729.
 15. 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.
 16. Gavrillov A., Malakhova V., Pizhankova E., Popova A. Permafrost and gas hydrate stability zone of the glacial part of the East-Siberian shelf // Geosciences. 2020. V. 10. 484.
<https://doi.org/10.3390/geosciences10120484>
 17. Мохов И.И., Елисеев А.В. Моделирование глобальных климатических изменений в XX–XXIII веках при новых сценариях антропогенных воздействий RCP // ДАН. 2012. Т. 443. № 6. С. 732–736.
 18. Malakhova V.V., Eliseev A.V. Uncertainty in temperature and sea level datasets for the Pleistocene glacial cycles: Implications for thermal state of the subsea sediments // Glob. Planet. Change. 2020. V. 192. P. 103249.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103249>
 19. Moridis G.J. Numerical studies of gas production from methane hydrates // Soc. Petrol. Engin J. 2003. V. 32. № 8. P. 359–370.
 20. Ganopolski A., Winkelmann R., Claussen M. Simulation of the last glacial cycle with a coupled climate ice-sheet model of intermediate complexity // Clim. Past. 2010. V. 6 (2). P. 229–244.
 21. O'Neill B.C., Tebaldi C., Vuuren D.P.v., Eyring V., Friedlingstein P., Hurtt G., Knutti R., Kriegler E., Lamarque J.-F., Lowe J. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6 // Geoscientific Model Development. 2016. V. 9. P. 3461–3482.
 22. Баулин В.В., Аксенов В.И., Дубиков Г.И., Ривкин Ф.М. Инженерно-геологический мониторинг промыслов Ямала. Том. 2. Тюмень: Институт проблем освоения Севера СО РАН. 1996. 237 с.
 23. Баду Ю.Б. Влияние газоносных структур на мощность криогенной толщи Ямала // Криосфера Земли. 2014. Т. 18. № 3. С. 11–22.

MODEL ESTIMATES OF INTRA- AND INTER-CENTURY DEGRADATION OF PERMAFROST IN THE REGION OF THE YAMAL PENINSULA UNDER WARMING

Academician of the RAS I. I. Mokhov^{a,*}, V. V. Malakhova^b, and M. M. Arzhanov^c

^a Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

^b Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

^c A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

*E-mail: mokhov@ifaran.ru

Estimates of intra- and inter-secular degradation of permafrost at different depths and stability conditions of methane hydrates in the region of the Yamal Peninsula under warming are obtained based on a model of heat transfer in soil using simulations with global climate models. Results of simulations with a climate model of intermediate complexity for the last 130 ka were used as well as simulations from 1850 to the end of the 21st century with climate general circulation models of the CMIP6 ensemble under different scenarios of anthropogenic forcings of the SSP family, in particular, the SSP5-8.5 scenario. The estimates of the limiting conditions for the existence of permafrost at different depths and the conditions for the stability of methane hydrates were obtained for the extension of global warming scenarios up to 2300 in accordance with the CMIP6 protocol (ScenarioMIP), as well as for the next 15 millennia, particularly with the extension of the scenario of anthropogenic forcings SSP5-8.5 after 2100.

Keywords: intra- and inter-century climate changes, modeling, permafrost degradation, stability of methane hydrates, Yamal Peninsula