



Источник фото: Pixabay.com
The photo source: Pixabay.com

ОБЪЯСНЕНИЕ НАБЛЮДАЕМОГО ПОТЕПЛЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ АНТРОПОГЕННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

ГУДМУНДСОН Л.

Институт наук об атмосфере и климате Швейцарского федерального технологического института, г. Цюрих, Швейцария
lukas.gudmundsson@env.ethz.ch

КИРХНЕР Й.

Берлинский университет имени Гумбольдта, г. Берлин, Германия

ГЕДЕКЕ А.

Потсдамский институт исследований воздействий на климат Объединения имени Лейбница, г. Потсдам, Германия

НЕЦЛИ Й.

Институт исследований снега и лавин (SLF) Швейцарского федерального института исследований леса, снега и ландшафтов (WSL); Исследовательский центр по изменениям климата, экстремальным явлениям и природным опасностям в альпийских регионах (CERC), г. Давос-Дорф, Швейцария.

БИСКАБОРН Б.К.

Институт Альфреда Вегенера, Центр полярных и морских исследований имени Гельмгольца, г. Потсдам, Германия

АННОТАЦИЯ

Представляем вниманию читателей немного сокращенный (без дополнительных материалов) и адаптированный перевод статьи немецких и швейцарских исследователей «Объяснение наблюдаемого потепления многолетней мерзлоты в Северном полушарии антропогенной составляющей изменений климата» (Gudmundsson et al., 2022). Она была опубликована в журнале *Environmental Research Letters* («Записки по исследованиям окружающей среды») издательством британской благотворительной научной организации IOP (Institute of Physics – «Институт физики»), ставшей фактически международной. Эта статья находится в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0, которая позволяет распространять, переводить, адаптировать и дополнять ее при условии указания типов изменений и ссылки на первоисточник. В нашем случае полная ссылка на источник для представленного перевода (Gudmundsson et al., 2022) приведена в конце.

Температура многолетней мерзлоты растет во всем мире, что может привести к неблагоприятным экологическим и социально-экономическим последствиям. Однако имеющиеся в доступной литературе объяснения этого процесса антропогенной составляющей изменений климата основываются главным образом на качественных данных.

В представленной статье сравниваются ряды длительных измерений температуры многолетней мерзлоты, полученные в 15 скважинах в Северном полушарии, и изменения температуры грунтов на основе глобальных климатических моделей, разработанных на 6-м этапе Международного проекта сравнения объединенных моделей (Coupled Model Intercomparison Project 6, CMIP6), с использованием подхода, заключающегося в выявлении и объяснении изменений климата. Показывается, что ни доиндустриальная изменчивость климата, ни естественная составляющая его изменений в индустриальную эпоху не

могут объяснить наблюдаемое увеличение температуры многолетней мерзлоты, полученное на основе усреднения реальных данных по всем скважинам. Однако результаты моделирования и наблюдений согласуются между собой, если учитывать влияние антропогенных выбросов на глобальную климатическую систему, воздействие чего на температуру многолетней мерзлоты обнаруживается в некоторых скважинах даже без усреднения. Таким образом, представленные данные подтверждают вывод о том, что антропогенная составляющая изменений климата является ключевым фактором потепления многолетней мерзлоты в Северном полушарии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

многолетняя мерзлота; глобальное потепление; выявление; объяснение.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Гудмундсон Л., Кирхнер Й., Гедеке А., Нецли Й., Бискаборн Б.К. Объяснение наблюдаемого потепления многолетней мерзлоты в Северном полушарии антропогенной составляющей изменений климата (пер. с англ.) // Геоинфо. 2024. Т. 6. № 4. С. 16–16 DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-4-6-16

ATTRIBUTING OBSERVED PERMAFROST WARMING IN THE NORTHERN HEMISPHERE TO ANTHROPOGENIC CLIMATE CHANGE

GUDMUNDSSON L.

Institute for Atmospheric and Climate Science, ETH Zurich, Zurich, Switzerland\

lukas.gudmundsson@env.ethz.ch

KIRCHNER J.

Humboldt University of Berlin, Berlin, Germany

GADEKE A.

Potsdam Institute for Climate Impact Research, Leibniz Association, Potsdam, Germany

NOETZLI J.

Institute for Snow and Avalanche Research (SLF) of the Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL); Research Center on Climate Change, Extremes and Natural Hazards in Alpine Regions, Davos Dorf, Switzerland

BISKABORN B.K.

Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, Potsdam, Germany

ABSTRACT

We present a slightly abridged (without supplementary data) and adapted translation of the paper “Attributing observed permafrost warming in the Northern hemisphere to anthropogenic climate change” by German and Swiss researchers (Gudmundsson et al., 2022). It was published in the journal “Environmental Research Letters” by the publishing company of the British scientific society “Institute of Physics” (IOP) that is now virtually international. It is an open access article under the CC BY 4.0 license that allows it to be distributed, translated, adapted, and supplemented, provided that the types of changes are noted and the original source is referred to. In our case, the full reference to the original paper (Gudmundsson et al., 2022) used for the presented translation is given in the end.

Permafrost temperatures are increasing globally with the potential of adverse environmental and socio-economic impacts. Nonetheless, the attribution of observed permafrost warming to anthropogenic climate change has relied mostly on qualitative evidence.

This paper compares long permafrost temperature records from 15 boreholes in the Northern hemisphere to simulated ground temperatures from Earth system models contributing to CMIP6, using a climate change detection and attribution approach. The article shows that neither pre-industrial climate variability nor natural drivers of climate change suffice to explain the observed warming in permafrost temperature averaged over all boreholes. However, simulations are consistent with observations if the effects of human emissions on the global climate system are considered. Moreover, the performed analysis reveals that the effect of anthropogenic climate change on permafrost temperature is detectable at some of the boreholes. Thus, the presented evidence supports the conclusion that anthropogenic climate change is the key driver of northern hemisphere permafrost warming.

KEYWORDS:

permafrost; global warming; detection; attribution.

FOR CITATION:

Gudmundsson L., Kirchner J., Gadeke A., Noetzli J., Biskaborn B.K. Ob"yasneniye nablyudaemogo potepleniya mnogoletney merzloty v Severnom polusharii antropogennoy sostavlyayushchey izmeneniy klimata [Attributing observed permafrost warming in the Northern hemisphere to anthropogenic climate change] (translated from English into Russian) // Geoinfo. 2024. T. 6. № 4. S. 6–16 DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-4-6-16 (in Rus.).



ВВЕДЕНИЕ

Такая подповерхностная особенность полярных и альпийских регионов, как многолетняя мерзлота (ММ), определяется как грунт, температура которого в течение многих лет остается не выше 0 °С. ММ влияет на функционирование природных и антропогенных систем в высоких широтах и высокогорных ландшафтах.

Все современные модели земной системы (МЗС, *англ.* *ESM*) прогнозируют масштабное сокращение распространения многолетней мерзлоты в ответ на антропогенную составляющую глобального потепления [1], которое особенно заметно в полярных и высокогорных регионах. Это указывает на растущий риск потепления и деградации ММ с далеко идущими последствиями как для местной окружающей среды, так и для динамики всей земной системы [2].

Например, в многолетней мерзлоте хранится примерно в два раза больше углерода, чем в настоящее время содержится в атмосфере планеты [3]. Благодаря процессам, известным как «обратная связь в системе «углеродный цикл – ММ»», расщепление органического углерода, связанное с деградацией ММ, может привести к выбросу в атмосферу большого количества парниковых газов и таким образом еще больше многолетней мерзлоты может оказать существенное воздействие на растительность [5] и гидрологические условия тундры [6], вызвать повреждения инфраструктуры [7, 8] или затруднить движение наземного транспорта в зимнее время [9]. А в условиях крутых склонов потепление ММ связано с увеличением масштабов и частоты склоновых (гравитационных) явлений, таких как камнепады [10–12].

В процессе научных наблюдений был зафиксировано постоянное изменение теплового состояния многолетней мерзлоты в последние годы. Например, было показано, что ее температура повышается в региональном [13–17] и глобальном [18–21] масштабах. Основным фактором потепления многолетней мерзлоты является повышение температуры воздуха. Но свой вклад также вносит дополнительное тепло, поступающее с атмосферными осадками [22], и эффекты, связанные с изменением изолирующей функции снежного покрова [23]. Потепление ММ дополнительно модулируется свойствами грунта, содержанием подземного льда, гидрологическими условиями или растительным покровом [21, 24].

Хотя потепление многолетней мерзлоты связано с повышением температуры атмосферного воздуха, наблюдаемое увеличение ее температуры до сих пор однозначно не связывали с антропогенной составляющей изменений климата. Точнее, до сих пор оставалось неясным, можно ли объяснить повышение температуры ММ антропогенной составляющей глобального потепления или же в основном его естественной составляющей.

Такие вопросы решаются с помощью такого подхода, как выявление потепления и объяснение его причин, который используется для оценки воздействия антропогенных выбросов на климат Земли [25–27]. Термин «выявление» здесь относится к «демонстрации того, что наблюдаемое изменение существенно отличается... от естественной изменчивости климата» [25]. Кроме того, приписывание наблюдаемого потепления влиянию антропогенных выбросов включает «демонстрацию того, что выявленные изменения согласуются со смоделированными, вызванными... антропогенными изменениями [например, концентрации парниковых газов] в составе атмосферы... и не согласуются с альтернативными объяснениями недавних... изменений...» [25].

Традиционно основное внимание в исследованиях по выявлению изменений и их объяснению уделялось крупномасштабным климатическим индикаторам, включая глобальные температуры воздуха [28] или зональные атмосферные осадки [29].

Все больше ученых связывают изменения в наземных системах, в том числе в речном стоке [30, 31], доступности воды [32], индикаторах засух [33] и глобальных озерных системах [34], с антропогенной составляющей изменений климата.

Рассматривая вопрос потепления многолетней мерзлоты в глобальном масштабе, авторы работы [35] продемонстрировали, что наблюдаемые изменения индекса ММ на основе температуры воздуха не согласуются с природными факторами и что в качестве объяснения необходимо рассматривать антропогенные выбросы.

Хотя предыдущие оценки и показали, что атмосферные факторы, влияющие на многолетнюю мерзлоту, меняются в ответ на антропогенные выбросы [35], до сих пор не ясно, в какой степени можно выявить влияние антропогенной составляющей изменений климата при прямых наблюдениях за температурой ММ. Однозначное объ-

яснение трендов изменений температуры ММ осложняется тремя факторами.

Во-первых, мониторинг многолетней мерзлоты основан на измерениях температуры грунта в скважинах [36]. Их бурение и длительная эксплуатация на удаленных объектах в холодном климате представляют собой сложные задачи. Поэтому количество таких скважин является ограниченным, пространственное распределение – неравномерным, а в некоторых регионах их практически нет [19]. Традиционно измерения в скважинах управлялись на региональном уровне или в рамках исследовательских проектов и работ институтов [37, 38], что еще больше усложняло оценки в глобальном масштабе. Только за последнее десятилетие Сеть глобального мониторинга криолитозоны (Global Terrestrial Network for Permafrost, GTN-P) возглавила усилия по сбору и обработке результатов долгосрочных наблюдений за многолетней мерзлотой [39, 40]. Кроме того, Глобальная служба наблюдений за криосферой (Global Cryosphere Watch) Всемирной метеорологической организации, Сеть наземных многопрофильных обсерваторий для изучения арктических взаимосвязей [41] и др. стали заинтересованными в организации и обмене данными долгосрочного мониторинга ММ.

Во-вторых, естественная изменчивость климата и окружающей среды часто маскирует признаки изменений климата в масштабе той или иной станции наблюдений [42]. Поэтому исследования по выявлению и поиску объяснений этих признаков обычно полагаются на сильное пространственное или временное агрегирование данных из многих мест для различения показателей глобальных изменений климата и его локальной изменчивости [26]. Это, например, делается путем усреднения пространственно распределенных данных (для получения глобальной средней температуры [28] или др.) или путем преобразования временной информации в пространственные модели трендов (региональных тенденций в изменениях речного стока [31] или др.). Поэтому ограничивающим фактором может быть недостаточное количество обсерваторий для долгосрочных наблюдений за многолетней мерзлотой в глобальном масштабе. Однако некоторые особенности динамики температуры ММ могут способствовать надежному выявлению и объяснению изменений климата даже в масштабе той или иной станции. В част-

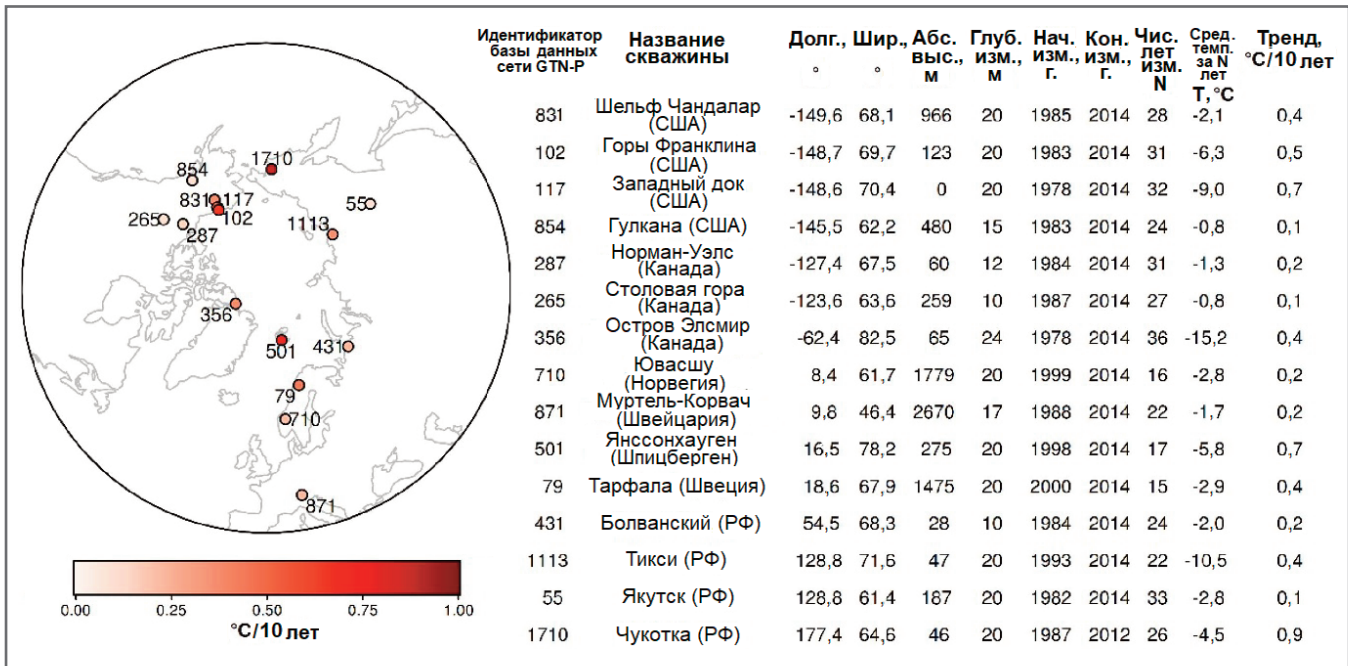


Рис. 1. Пространственное распределение рассматриваемых в статье скважин

ности, временная изменчивость температуры грунта сглаживается с увеличением глубины от поверхности земли, поэтому результаты измерений на глубине отражают долговременные климатические изменения [18]. Например, амплитуда сезонного цикла исчезает на уровне нулевых амплитуд (нулевых амплитуд годового хода температур), который обычно находится на глубине 15–20 м [18]. Следовательно, реакция температуры грунта ниже этого уровня на тренды температуры атмосферного воздуха меньше зависит от краткосрочной изменчивости, что делает ее идеальной для мониторинга долгосрочных изменений климата. Можно полагать, что такой естественный «фильтр» способствует уменьшению влияния хаотичной локальной изменчивости климата и, следовательно, повышает выявляемость общей тенденции в изменениях климата.

В-третьих, особые свойства холодных климатических систем могут еще больше изменить и даже ослабить потепление многолетней мерзлоты по сравнению с повышением температуры воздуха. Например, снежный покров может оказывать значительное влияние на температуру грунта, поскольку он изолирует поверхность земли от атмосферных условий. Более того, богатый льдом грунт при температуре лишь немного ниже 0 °C не отражает рост температуры воздуха через повышение температуры грунта, поскольку энергия расходуется на фазовый переход (влия-

ние скрытой теплоты). На этом этапе температура грунта остается более или менее постоянной.

Цель представленной работы – проверка гипотезы о том, что влияние человека на климатическую систему является ключевым фактором наблюдаемого потепления многолетней мерзлоты. Для ее достижения авторы используют подход, заключающийся в выявлении и объяснении изменений климата, и оценивают вероятность наблюдаемого потепления ММ с учетом результатов моделирования доиндустриальных и исторических изменений климата.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ ►

Наблюдаемая температура многолетней мерзлоты ►

Для обеспечения воспроизводимости рассматривались длинные временные ряды температур многолетней мерзлоты, полученные по данным сети GTN-P [39, 40] и по доступным данным из интернета [43]. Они были выбраны на основе их качества и временного охвата с последующим переводением в годовые средние значения, а также взяты из работы [18]. Эти временные ряды дали информацию для примерной глубины нулевых годовых амплитуд. Для данного исследования были выбраны скважины с длительностью наблюдений не менее 15 лет до 2014 года, поскольку этот год соответствовал времени окончания экспериментов по моделированию исторических результатов наблю-

дений. В результате было выбрано 15 скважин с измерениями, охватившими 37-летний период (1978–2014 гг.), хотя не все из них имели одинаковый временной охват (рис. 1).

Моделирование МЗС ►

Рассматривались временные ряды температуры грунта, полученные на основе МЗС. Целью моделирования было выявление основных аспектов динамики земной системы путем совместного моделирования систем океана, атмосферы и суши. Показатели для суши обычно нужны для отражения водного и энергетического баланса и учета криосферных процессов, таких как динамика снега. Грунты в МЗС были представлены наборами слоев, которые могут хранить и обмениваться энергией и водой и поэтому могут имитировать тепловое состояние подповерхностной среды.

В этом исследовании использовались МЗС, принявшие участие в 6-м этапе Международного проекта сравнения объединенных моделей (Coupled Model Intercomparison Project 6 – CMIP6) [44].

Для характеристики изменчивости климата без влияния человека применялись модели долговременных доиндустриальных изменений климата при постоянном воздействии солнечного излучения (разбитые на не перекрывающиеся друг друга 37-летние сегменты) [44]. В системе выявления и объяснения изменений климата такие модели можно использовать для оценки вероятности того, что наблюдаемое из-

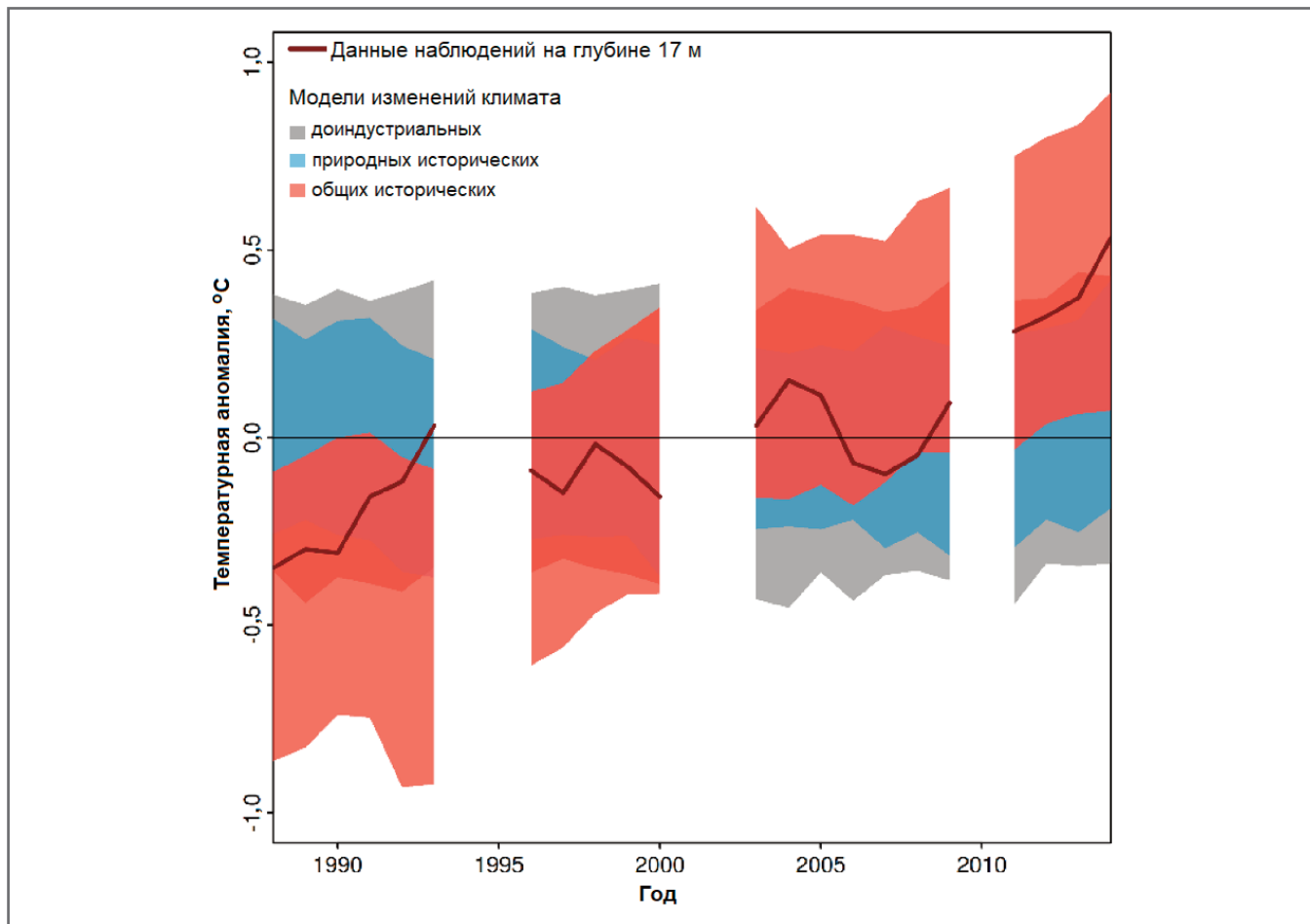


Рис. 2. Наблюдавшиеся и смоделированные аномалии (относительно условно нулевого значения) температуры грунта в скважине в скальном леднике Муртель-Корвач в Швейцарских Альпах. Модельные данные приведены в диапазоне от 10-го до 90-го процентиля в соответствии с временными охватами наблюдений

менение могло произойти только из-за естественных изменений климата без влияния человека.

Модели общих исторических изменений климата учитывали влияние антропогенных выбросов (парниковых газов, аэрозолей) на климатическую систему на протяжении прошлого столетия и вплоть до 2014 года [44]. Кроме того, эти модели также учитывали влияние естественных вариаций солнечного излучения и крупных извержений вулканов. Их можно использовать для оценки того, согласуются ли наблюдаемые изменения с данными МЗС, на которые влияют все соответствующие воздействия.

Модели естественной составляющей исторических изменений климата похожи на модели его общих исторических изменений, но учитывают только воздействие вариаций солнечного излучения и крупных извержений вулканов на протяжении прошлого столетия [45]. Они использовались для исследования того, достаточны ли естественные вариации воздействия солнечного излучения для выявления наблю-

даемых тенденций с использованием МЗС.

Все данные из проекта SMIP6 подготавливались посредством централизованной предварительной обработки [46], которая обеспечивала согласованность данных и включала интерполяцию результатов моделирования с их интеграцией в общей сетке с ячейками размером $2,5^\circ$.

Для моделирования общих исторических и естественных исторических изменений климата учитывались только данные, охватывавшие временной интервал наблюдений.

Всего для рассматриваемых исследований было доступно 500, 116 и 659 моделей общих исторических, природных исторических и доиндустриальных изменений соответственно.

Совместное рассмотрение данных МЗС и результатов наблюдений ▶

Данные МЗС сравнивали с результатами измерений в скважинах следующим образом. Сначала выбирали только те ячейки сетки, которые содержали

скважины. Затем годы, в которых отсутствовали наблюдения, сочли отсутствующими для каждой отдельной ячейки сетки. Из-за различий в том, как МЗС представляют береговые линии при сетках с крупными ячейками, количество доступных моделей для скважин в прибрежных регионах могло быть уменьшено.

В каждой из ячеек сетки использовался слой грунта, который располагался ближе всего к глубине наблюдений. Поскольку не все модели охватывали глубину измерений, также рассматривалось подмножество моделей с уровнем залегания рассматриваемого слоя грунта, соответствующим глубине наблюдений. Отметим, что для скважины Янсонхауген на Шпицбергене [47] отсутствовали модели для природных исторических изменений климата.

На рисунке 2 показаны предварительно обработанные временные ряды наблюдавшихся и смоделированных аномалий (относительно условно нулевого значения) температуры на глубине 17 м в скважине, пробуренной в скальном леднике Муртель-Корвач в Швейцар-

ских Альпах, за которой наблюдает Швейцарская сеть мониторинга многолетней мерзлоты (PERMOS) [49]. Эти временные ряды выравнились так, чтобы иметь нулевые средние величины, а значения в годы, когда отсутствовали зарегистрированные результаты измерений, также устанавливались в моделях на ноль. Для облегчения визуализации на рисунке 2 вместо отдельных ходов температуры для моделей показан диапазон от 10-го до 90-го перцентиля.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ►

Оценка трендов ►

Изменения наблюдавшейся и смоделированной температуры грунта количественно определялись с использованием линейных трендов во времени, оцененных с помощью обычной линейной регрессии в каждой локации. Тенденции выражались в таких единицах изменений, как °C/10 лет. Затем вычислялся средний тренд по всем локациям. Эта процедура привела к единой оценке среднего тренда в Северном полушарии для результатов наблюдений и каждого модельного эксперимента.

Выявление и объяснение изменений климата под антропогенным воздействием ►

Здесь будем следовать приведенному выше определению выявления и объяснения климатических изменений [25] и оценивать наблюдаемую тенденцию в контексте МЗС-экспериментов в соответствии с моделями доиндустриальных, общих исторических и естественной составляющей исторических изменений климата.

Для каждого модельного эксперимента в рамках проекта СМIP6 использовалось большое количество доступных выборок для получения эмпирического распределения трендов. Выявление изменений климата может потребоваться, если наблюдаемая тенденция маловероятна с учетом трендов, вытекающих из моделирования доиндустриальных климатических вариаций.

Чтобы утверждать, что изменения климата были вызваны деятельностью человека, необходимо выполнить следующие два условия. Во-первых, наблюдаемый тренд должен согласовываться с результатами моделирования общих исторических изменений климата. Во-вторых, наблюдаемая тенденция должна быть несовместима с трендами, вытекающими из моделирования есте-

ственной составляющей исторических изменений климата. Другими словами, можно говорить о выявлении, если рассматриваемые модели воспроизводят наблюдаемую тенденцию только с учетом влияния человека на климатическую систему.

Вероятность наблюдаемого тренда с учетом результатов модельных экспериментов количественно оценивается с использованием приблизительных величин p -уровня ее значимости (p -value), применяемого для оценки достоверности результата и определяемого как доля смоделированных тенденций, которые меньше наблюдаемого тренда. Очень большие или очень маленькие значения p -уровня указывают на то, что наблюдаемая тенденция маловероятна с учетом результатов рассматриваемого модельного эксперимента. В частности, большие величины p -уровня значимости говорят о том, что наблюдаемая тенденция превышает ожидаемые тренды. Здесь следуем терминологии и понятиям, выверенным Межправительственной группой экспертов по изменениям климата (МГЭИК, англ. IPCC) [49], и используем следующие значения: $p > 0,66$ – для обозначения вероятного выявления изменений климата, $p > 0,9$ – весьма вероятного, $p > 0,99$ – практически достоверного. Средние величины p (например, $p \approx 0,5$) указывают на согласованность между наблюдаемыми и смоделированными изменениями.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ►

Сравнение разброса для полного и сокращенного набора моделей ►

Сначала сравнивались разбросы для полного и сокращенного наборов моделей (сокращенный набор содержал только модели, охватывавшие глубину наблюдений). Результаты сравнения показали, что дисперсия для полного набора однозначно превышает таковую для сокращенного набора. Эта особенность может быть связана либо с меньшим размером выборки сокращенного набора, либо с более интенсивным ослаблением изменений моделируемой температуры грунта за каждое десятилетие с увеличением глубины. Таким образом, независимо от причин разницы в дисперсии ожидается, что оценка полного набора будет более консервативной, то есть для него наблюдаемые тренды с меньшей вероятностью окажутся в «хвостах» распределений, вытекающих из моделей.

Поэтому далее в целях предосторожности речь будет идти только о полном наборе (однако все производимые вычисления для него оставались такими же, как и для сокращенного набора).

Средний тренд по всем скважинам ►

Наблюдавшиеся и смоделированные средние тренды по всем скважинам показаны на рисунке 3, а. Средняя тенденция по результатам наблюдений соответствует росту температуры со скоростью около 0,4 °C/10 лет. Средние тренды, определенные при моделировании доиндустриальных и естественных исторических изменений климата, колеблются около нулевого уровня. Более того, наблюдаемая тенденция с высокой степенью достоверности ($p > 0,99$) превышает тренды, возникающие из-за природной изменчивости климата, и весьма вероятно ($p > 0,9$) превышает тренды, связанные с изменениями климата из-за сильно действующих природных факторов (рис. 3, б).

Напротив, тенденции, полученные при моделировании общих исторических изменений климата, четко отражают наблюдаемые. Это показывает, что наблюдаемый средний тренд можно объяснить только с помощью МЗС, сгенерированных по данным общих исторических изменений, учитывающих солнечное излучение и антропогенные выбросы.

Таким образом, анализ, представленный на рисунке 3, показывает, что наблюдаемые температуры многолетней мерзлоты в рассматриваемых скважинах отражают признаки изменений климата (и не согласуются с моделями его доиндустриальных изменений), которые можно отнести к антропогенным изменениям (согласуются с моделями общих исторических изменений и не согласуются с моделями естественных исторических изменений). Дополнительный анализ, основанный на сокращенном наборе, подтвердил эти результаты.

Тренды по данным отдельных скважин ►

С учетом значимых результатов, полученных на основе среднего тренда по всем скважинам, также была исследована вероятность наблюдаемых трендов в отдельных местах с учетом результатов моделирования доиндустриальных, естественной составляющей исторических и общих исторических изменений климата.

На рисунке 4 отражены p -уровни значимости наблюдаемых трендов во

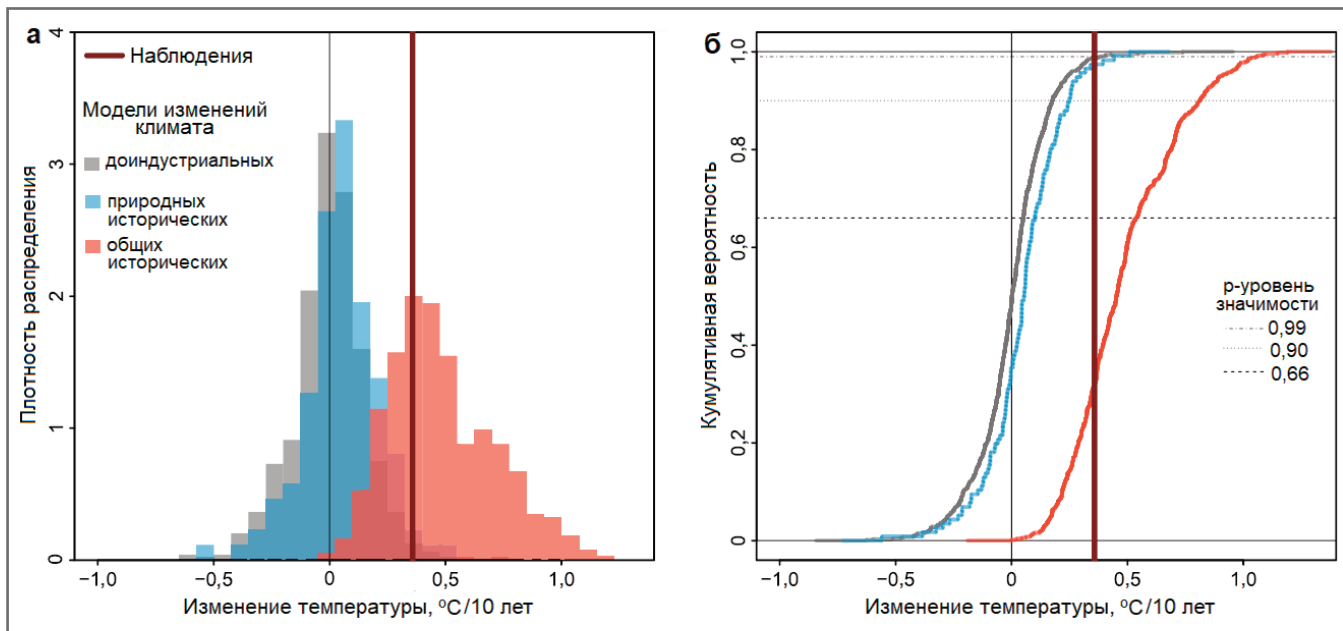


Рис. 3. Наблюдаемые и смоделированные средние тренды изменений температур многолетней мерзлоты на всех станциях наблюдений: а – гистограммы средних трендов, полученных в результате моделирования доиндустриальных, исторических природных и общих исторических изменений климата (вертикальная линия показывает глобальное среднее значение наблюдаемых трендов); б – эмпирические функции распределения трендов по рассмотренным климатическим моделям наряду с наблюдаемым средним трендом (горизонтальные линии указывают приблизительные величины p -уровня значимости, рассмотренные для данного исследования)

всех местах расположения скважин для каждого модельного эксперимента. Несмотря на низкое отношение «сигнал/шум», ожидаемое при анализе для отдельных скважин, моделирование доиндустриальных и естественной составляющей исторических изменений климата всегда дает $p > 0,66$, а для шести скважин даже получилось, что $p > 0,9$ или $p > 0,99$. Это показывает, что наблюдаемые тенденции в ходе температуры грунта во всех скважинах с большой вероятностью превышают ожидаемые тренды только из-за естественной составляющей исторических изменений климата. Более того, в большинстве скважин наблюдаемые тенденции согласуются с результатами моделирования общих исторических изменений климата, учитывающего влияние человека на климатическую систему. При этом в некоторых случаях очень низкие p -уровни значимости указывают на то, что тренды, полученные на основе таких моделей, могут систематически превосходить наблюдаемые тенденции. Это может быть напрямую связано с наблюдаемыми и смоделированными временными рядами, для которых смоделированное общее историческое потепление меньше, чем наблюдаемое повышение температуры в соответствующих местах.

Результаты анализа **сокращенного набора, в котором рассматривались только модели, достигавшие глубины наблюдений**, в целом согласуются

с результатами, полученными на основе полного набора. Тем не менее отмечаются некоторые различия.

Для *сокращенного набора моделей доиндустриальных изменений* приближительные значения p -уровня значимости результатов анализа в основном больше ($p < 0,9$ в 10 из 15 случаев), что указывает на более высокую достоверность выявления систематического тренда в масштабе отдельных скважин. Это, в свою очередь, согласуется с меньшим разбросом данных сокращенного набора.

Подобные закономерности обнаружены в большинстве скважин для *сокращенного набора моделей естественной составляющей исторических изменений*. Однако последнее следует интерпретировать с осторожностью, поскольку сокращенный набор в случае моделирования естественной составляющей состоит только из девяти данных для большинства мест расположения скважин, что подразумевает весьма неопределенные примерные значения p -уровня значимости.

Интересно, что анализ результатов при *сокращенном наборе моделей общих исторических изменений* приводит к большим приближительным значениям p -уровня значимости ($p > 0,66$ и $p > 0,9$) в шести местах. Это означает, что для этих скважин наблюдаемые тренды значительно превышают модельные. В этих случаях тщательное из-

учение соответствующих временных рядов показывает, что моделирование общих исторических изменений действительно демонстрирует тенденцию к потеплению, но недооценивает наблюдаемый тренд.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ►

Целью представленного исследования была оценка вероятности наблюдаемых трендов изменений температуры многолетней мерзлоты с помощью моделирования, учитывающего естественное и антропогенное влияние на климатическую систему в рамках системы выявления и объяснения изменений климата [25]. Для этого тренды изменений температуры многолетней мерзлоты, полученные по данным долгосрочных измерений в разных скважинах, сравнивались с распределениями трендов, полученных на основе больших наборов МЗС для доиндустриальных, естественной составляющей исторических и общих исторических изменений температуры при различных воздействиях солнечного излучения. Таким образом, выполненный анализ объединил данные наблюдений и МЗС с использованием эмпирического подхода на основе множества доступных выборок для каждого из рассматриваемых модельных экспериментов.

Отметим, что эмпирический подход к выявлению и объяснению изменений климата делает анализ потенциально

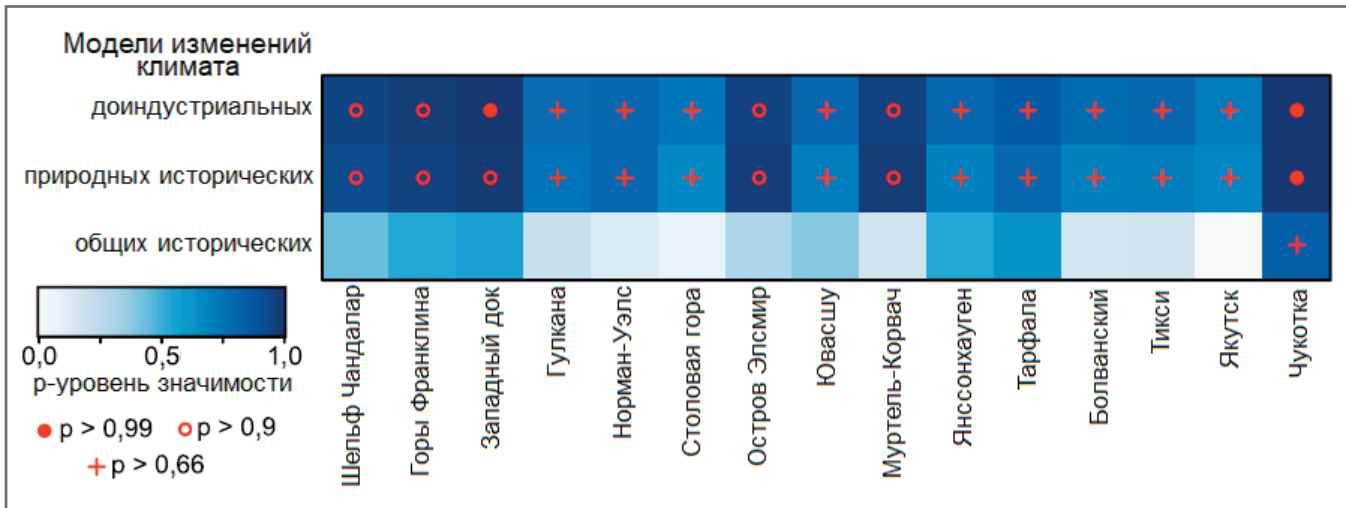


Рис. 4. Приблизительные p -уровни значимости наблюдаемых тенденций по результатам модельных экспериментов для доиндустриальных, природных исторических и общих исторических изменений климата. Большие значения p указывают на то, что наблюдаемый тренд превышает ожидаемый на основе моделирования. Промежуточные значения – на то, что наблюдаемый тренд соответствует результатам моделирования

чувствительным в случае ограниченных выборок моделей, используемых для оценки распределений трендов. Более того, рассмотрение набора возможных трендов в рамках архива проекта СМIP6 придает больший вес моделям с большим количеством членов набора начальных условий или с более долгим моделируемым доиндустриальным периодом.

Однако при теоретически более сложных подходах к выявлению и объяснению изменений климата делаются более сильные допущения относительно лежащей в основе статистической модели, обычно с включением нормального распределения случайных (остаточных) погрешностей, а также аддитивности изменений климата по естественным причинам и под влиянием человеческой деятельности [50, 51]. Хотя такие допущения часто имеют смысл и требуются для улучшения отношения «сигнал/шум», полученные в результате методы усложняют анализ и вносят в него неопределенность.

В представленном исследовании, в свою очередь, в полной мере использовалось множество интеграций данных в моделях для эмпирической аппроксимации распределений трендов изменений температуры многолетней мерзлоты при различных воздействиях солнечного излучения.

Также отметим наличие неопределенностей, связанных с упрощающими допущениями, которые необходимы при моделировании тепловых свойств грунтов в МЗС в глобальном масштабе. Например, имеется несоответствие между масштабами на уровне скважин

и на уровне разрешения моделей. Более того, модели существенно различаются по максимальной глубине залегания грунта и количеству его рассматриваемых слоев. К тому же несовершенная физика модели и процессы за пределами ее возможного разрешения могут вызвать ошибки в результатах моделирования. Более того, температуры в МЗС могут быть смещены, что приводит к различиям в их абсолютных значениях по сравнению с данными наблюдений. И наконец, не все рассматриваемые МЗС достигают глубины наблюдений.

Для сбалансированной оценки свидетельств в пользу потепления климата помимо неопределенностей в моделях необходимо учитывать пределы данных наблюдений. Самое главное, что для обеспечения воспроизводимости результатов были использованы только данные по скважинам, собранные авторами работы [18], которые находятся в открытом доступе [43]. Кроме того, в доступных климатических моделях использовались только данные наблюдений до 2014 года, что еще больше снизило вероятность выявления систематических трендов не в пользу естественных изменений климата. К тому же на наблюдения за температурой грунта в масштабах отдельных скважин значительное влияние оказывают условия окружающей среды в соответствующих местах (например, характеристики грунта и поверхностного покрова) и изменчивость климата (например, небольшие колебания температуры воздуха и атмосферных осадков), которые могут скрывать основные сигналы об изменениях климата.

Чтобы преодолеть эти проблемы, были приняты следующие меры по улучшению отношения «сигнал/шум».

Во-первых, при разработке способов анализа основное внимание уделялось температурам многолетней мерзлоты на глубине нулевых амплитуд их колебаний в течение года. На такой глубине температура ММ имеет незначительную внутригодовую и более низкую межгодовую изменчивость по сравнению с температурой поверхности земли. Поэтому краткосрочные климатические колебания оказывают там меньшее влияние на температуру ММ.

Во-вторых, анализ фокусировался на сравнении долгосрочных трендов, которые обусловлены общими изменениями климатических условий.

В-третьих, первичный анализ в представленном исследовании был сосредоточен на среднем тренде по всем скважинам, который уменьшил влияние естественной пространственной изменчивости климатических условий и, следовательно, еще больше увеличил отношение «сигнал/шум». К тому же дополнительный анализ подтвердил достоверность полученных результатов только при рассмотрении МЗС, достигавших глубин залегания грунтов, соответствующих реальным измерениям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ►

Выполненный анализ с высокой степенью достоверности подтвердил вывод о том, что наблюдаемый средний тренд изменений температуры многолетней мерзлоты во всех скважинах не согласуется с естественной составляющей исторических изменений климата и что

МЗС отражают наблюдаемый средний тренд только в том случае, если учитывается влияние человека на климатическую систему.

Кроме того, вторичный анализ выявил влияние антропогенной составляющей глобального потепления на температуру многолетней мерзлоты в масштабе скважин. Несмотря на снижение статистической достоверности, это примечательно, поскольку, как правило, считается, что выявлению и объяснению причин изменений климата в отдельных местах препятствует значительная пространственная изменчивость окружающей среды и климата [42, 52].

Хотя полученные результаты дали весомые доказательства в поддержку гипотезы о том, что влияние человека на климатическую систему приводит к наблюдаемому повышению температуры многолетней мерзлоты, следует отметить, что они отразили только то, что было возможно с помощью МЗС последнего поколения и рассмотренных данных наблюдений. Поэтому эти результаты не следует интерпретировать изолированно. Но здесь важно напомнить, что итоги представленного исследования полностью согласуются с современными представлениями о влиянии антропогенной составляющей изменений климата на температуру ММ [1,

2, 35]. Тем не менее сохраняется острая необходимость в постоянных глобальных усилиях по наблюдениям за температурой многолетней мерзлоты в Арктике и в горных регионах и распространению полученной информации для мониторинга воздействия изменений климата и для содействия адаптации к этим изменениям в условиях повышенных темпов потепления на указанных территориях.

Таким образом, в целом представленное исследование показало, что средний тренд изменений температур многолетней мерзлоты в 15 скважинах в разных местах Северного полушария можно объяснить только с помощью МЗС при учете влияния антропогенных выбросов на климатическую систему и что систематические тренды изменений климата можно заметить даже в масштабе скважин. Следовательно, комбинированный анализ средних трендов изменений температуры по всем локациям и их оценка в отдельных скважинах подтверждают гипотезу о том, что наблюдаемое потепление многолетней мерзлоты может быть связано с антропогенной составляющей изменений климата. **И**

Создание климатических моделей является результатом шестой фазы проекта CMIP6. Они доступны через

Федерацию сетей систем Земли (Earth system grid federation, ESGF, <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>). Авторы выражают благодарность Урсу Байерле, Лукасу Бруннеру и Рут Лоренц за обработку данных по проекту CMIP6 и авторам работы [19], собравшим среднегодовые данные наблюдений за состоянием многолетней мерзлоты. Эти данные доступны для скачивания по электронному адресу: <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.930669>. Следует отметить, что некоторые метаданные временных рядов являются приблизительными. Доступ к точным метаданным можно получить по электронному адресу: <http://gtndatabase.org/boreholes/xuz> (где xuz обозначает идентификатор в проекте GTN-P). Авторы также признательны всем остальным лицам и учреждениям, которые внесли свой вклад в долговременные наблюдения за температурой многолетней мерзлоты. Кроме того, была оказана поддержка со стороны Федерального министерства образования и науки Германии (BMBF), Европейского исследовательского подразделения сервисов по климату (ERA4CS) по проекту ISIPedia (ссылка на финансирование: 518, № 01LS1711C), Программы исследований и инноваций Европейского Союза Horizon 2020 по грантовому соглашению № 101003687.

ИСТОЧНИК ДЛЯ ПЕРЕВОДА ►

(SOURCE FOR THE TRANSLATION) ►

Gudmundsson L., Kirchner J., Gadeke A., Noetzli J., Biskaborn B.K. Attributing observed permafrost warming in the northern hemisphere to anthropogenic climate change // Environmental Research Letters. 2022. Vol. 17. № 9. Article 095014. DOI:10.1088/1748-9326/ac8ec2. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac8ec2>.


СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, ИСПОЛЬЗОВАННОЙ АВТОРАМИ ПЕРЕВЕДЕННОЙ СТАТЬИ ►

(REFERENCES USED BY THE AUTHORS OF THE TRANSLATED PAPER) ►

- 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 // Cryosphere. 2020. Vol. 14. P. 3155–3174.
- IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157964>.
- Schuur E.A.G., Vogel J.G., Crummer K.G., Lee H., Sickman J.O., Osterkamp T.E. The effect of permafrost thaw on old carbon release and net carbon exchange from tundra // Nature. 2009. Vol. 459. P. 556–559.
- Schuur E.A.G. et al. Climate change and the permafrost carbon feedback // Nature. 2015. Vol. 520. P. 171–179.
- Jin X.-Y., Jin H.-J., Iwahana G., Marchenko S.S., Luo D.-L., Li X.-Y., Liang S.-H. Impacts of climate-induced permafrost degradation on vegetation: a review // Adv. Clim. Change Res. 2021. Vol. 12. P. 29–47.
- Liljedahl A.K. et al. Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology // Nat. Geosci. 2016. Vol. 9. P. 312–318.
- Hjort J., Karjalainen O., Aalto J., Westermann S., Romanovsky V.E., Nelson F.E., Eitzmuller B., Luoto M. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century // Nat. Commun. 2018. Vol. 9. Article 5147.

8. Duvillard P.-A., Ravel L., Marcer M., Schoeneich P. Recent evolution of damage to infrastructure on permafrost in the French Alps // *Reg. Environ. Change*. 2019. Vol. 19. P. 1281–1293.
9. Gadeke A., Langer M., Boike J., Burke E.J., Chang J.F., Head M., Reyer C.P.O., Schaphoff S., Thiery W., Thonicke K. Climate change reduces winter overland travel across the Pan-Arctic even under low-end global warming scenarios // *Environ. Res. Lett.* 2021. Vol. 16. Article 024049.
10. Gruber S., Haeberli W. Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change // *J. Geophys. Res.* 2007. Vol. 112. Article F02S18.
11. Ravel L., Deline P. 2010. Climate influence on rockfalls in high-Alpine steep rockwalls: the north side of the Aiguilles de Chamonix (Mont Blanc massif) since the end of the “Little Ice Age” // *Holocene*. 2007. Vol. 21. P. 357–365.
12. Marcer M., Cicoira A., Cusicanqui D., Bodin X., Echelard T., Obregon R., Schoeneich P. Rock glaciers throughout the French Alps accelerated and destabilised since 1990 as air temperatures increased // *Commun. Earth Environ.* 2021. Vol. 2. Article 81.
13. Etzelmüller B., Guglielmin M., Hauck C., Hilbich C., Hoelzle M., Isaksen K., Noetzli J., Oliva M., Ramos M. Twenty years of European mountain permafrost dynamics – the PACE legacy // *Environ. Res. Lett.* 2020. Vol. 15. Article 104070.
14. 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. Vol. 15. Article 045001.
15. Zhao L. et al. Changing climate and the permafrost environment on the Qinghai-Tibet (Xizang) plateau // *Permafr. Periglac. Process.* 2020. Vol. 31. P. 396–405.
16. Haberkorn A., Kenner R., Noetzli J., Phillips M. Changes in ground temperature and dynamics in mountain permafrost in the Swiss Alps // *Front. Earth Sci.* 2021. Vol. 9. Article 626686.
17. Smith S.L et al. Permafrost / in “State of the Climate in 2020” // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2021. Vol. 102. P. 293–297.
18. Biskaborn B.K. et al. Permafrost is warming at a global scale // *Nat. Commun.* 2019. Vol. 10. Article 264.
19. Hock R. et al. High mountain areas: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (ed. by H.-O. Portner et al. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2019. P. 131–202.
20. Noetzli J., Christiansen H.H., Isaksen K., Smith S., Zhao L., Streletskiy D.A. Permafrost thermal state / in “State of the Climate in 2019” // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2020. Vol. 101. P. 34–36.
21. Smith S.L, O’Neill H.B., Isaksen K., Noetzli J., Romanovsky V.E. The changing thermal state of permafrost // *Nat. Rev. Earth Environ.* 2022. Vol. 3. P. 10–23.
22. Mekonnen Z.A., Riley W.J., Grant R.F., Romanovsky V.E. Changes in precipitation and air temperature contribute comparably to permafrost degradation in a warmer climate // *Environ. Res. Lett.* 2021. Vol. 16. Article 024008.
23. Lawrence D.M., Slater A.G. The contribution of snow condition trends to future ground climate // *Clim. Dyn.* 2010. Vol. 34. P. 969–981.
24. Stuenzi S.M., Boike J., Gadeke A., Herzsuh U., Kruse S., Pestryakova L.A., Westermann S., Langer M. Sensitivity of ecosystem-protected permafrost under changing boreal forest structures // *Environ. Res. Lett.* 2021. Vol. 16. Article 084045.
25. Hegerl G.C., Karl T.R., Allen M., Bindoff N.L., Gillett N., Karoly D., Zhang X., Zwiers F. Climate change detection and attribution: beyond mean temperature signals // *J. Clim.* 2006. Vol. 19. P. 5058–5077.
26. Bindoff N.L. et al. Detection and attribution of climate change: from global to regional // *Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (ed. by T.F. Stocker et al.). Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
27. Eyring V. et al. Human influence on the climate system // *Climate Change 2021: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (ed. by V. Masson-Delmotte et al.). Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
28. Jones G.S., Stott P.A., Christidis N. Attribution of observed historical near-surface temperature variations to anthropogenic and natural causes using CMIP5 simulations // *J. Geophys. Res.* 2013. Vol. 118. P. 4001–4024.
29. Zhang X., Zwiers F.W., Hegerl G.C., Lambert F.H., Gillett N.P., Solomon S., Stott P.A., Nozawa T. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends // *Nature*. 2007. Vol. 448. P. 461–465.
30. Gudmundsson L., Seneviratne S.I., Zhang X. Anthropogenic climate change detected in European renewable freshwater resources // *Nat. Clim. Change*. 2017. Vol. 7. P. 813–816.
31. Gudmundsson L. et al. Globally observed trends in mean and extreme river flow attributed to climate change // *Science*. 2021. Vol. 371. P. 1159–1162.
32. Padron R.S., Gudmundsson L., Decharme B., Ducharne A., Lawrence D.M., Mao J., Peano D., Krinner G., Kim H., Seneviratne S.I. Observed changes in dry-season water availability attributed to human-induced climate change // *Nat. Geosci.* 2020. Vol. 13. P. 477–481.
33. Marvel K., Cook B.I., Bonfils C.J.W., Durack P.J., Smerdon J.E., Williams A.P. Twentieth-century hydroclimate changes consistent with human influence // *Nature*. 2019. Vol. 569. P. 59–65.
34. Grant L. et al. Attribution of global lake systems change to anthropogenic forcing // *Nat. Geosci.* 2021. Vol. 14. P. 849–854.

35. Guo D., Sun J., Li H., Zhang T., Romanovsky V.E. Attribution of historical near-surface permafrost degradation to anthropogenic greenhouse gas warming // *Environ. Res. Lett.* 2020. Vol. 15. Article 084040.
36. Noetzli J. et al. Best practice for measuring permafrost temperature in boreholes based on the experience in the Swiss Alps // *Front. Earth Sci.* 2021. Vol. 9. Article 607875.
37. Juliussen H, Christiansen H.H, Strand G.S, Iversen S., Midttomme K., Ronning J.S. NORPERM, the Norwegian permafrost database – a TSP NORWAY IPY legacy // *Earth Syst. Sci. Data.* 2010. Vol. 2. P. 235–246.
38. Swiss Permafrost Bulletin 2019/2020 (ed. by J. Noetzli, C. Pellet). PERMOS, 2021. 20 p.
39. Biskaborn B.K., Lanckman J.-P., Lantuit H., Elger K., Streletskiy D.A., Cable W.L., Romanovsky V.E. The new database of the Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P) // *Earth Syst. Sci. Data.* 2015. Vol. 7. P. 245–259.
40. Streletskiy D., Noetzli J., Smith S.L., Vieira G., Schoeneich P., Hrbacek F., Irrgang A.M. Measurement Standards and Monitoring Guidelines for the Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P). 2021. DOI:10.5281/zenodo.6075468. URL: <https://gtnp.arcticportal.org/>.
41. Boike J. et al. Standardized monitoring of permafrost thaw: a user-friendly, multiparameter protocol // *Arct. Sci.* 2022. Vol. 8. P. 153–182.
42. Stott P.A., Gillett N.P., Hegerl G.C., Karoly D.J., Stone D.A., Zhang X., Zwiers F. Detection and attribution of climate change: a regional perspective // *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Change.* 2010. Vol. 1. P. 192–211.
43. GTN-P (2021). Long-term mean annual ground temperature data for permafrost // PANGAEA. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.930669>.
44. 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. Vol. 9. P. 1937–1958.
45. Gillett N.P., Shiogama H., Funke B., Hegerl G., Knutti R., Matthes K., Santer B.D., Stone D., Tebaldi C. The detection and attribution model intercomparison project (DAMIP v. 1.0) contribution to CMIP6 // *Geosci. Model Dev.* 2016. Vol. 9. P. 3685–3697.
46. Brunner L., Hauser M., Lorenz R., Beyerle U. The ETH Zurich CMIP6 Next Generation Archive: Technical Documentation // ZENODO. 2020. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3731088>.
47. Isaksen K., Sollid J.L., Holmlund P., Harris C. Recent warming of mountain permafrost in Svalbard and Scandinavia // *J. Geophys. Res.* 2007. Vol. 112. Article F02S04.
48. Swiss permafrost monitoring network database (PERMOS database) // PERMOS Data Portal. PERMOS Dataset 2021-1. 2021. DOI: <https://doi.org/10.13093/permos-2021-01>.
49. Chen D. et al. Framing, context, and methods Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (ed. by V. Masson-Delmotte et al.). Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
50. Allen M.R., Stott P.A. Estimating signal amplitudes in optimal fingerprinting. Part I: theory // *Clim. Dyn.* 2003. Vol. 21. P. 477–491.
51. Ribes A., Zwiers F.W., Azais J.-M., Naveau P. A new statistical approach to climate change detection and attribution // *Clim. Dyn.* 2016. Vol. 48. P. 367–386.
52. Zwiers F.W., Zhang X. Toward regional-scale climate change detection // *J. Clim.* 2003. Vol. 16. P. 793–797.



Телеграм-канал журнала

Геоинфо

Независимый электронный журнал

- Новости
- Статьи
- Обсуждения

<https://t.me/geoinfones>