

ВЫБРОСЫ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА ИЗ РЕТРОГРЕССИВНЫХ ОПОЛЗНЕЙ ПРИ ТАЯНИИ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ В СИБИРИ

БЕР К.

Факультет наук о земных системах Института грунтоведения и Центр исследований земных систем и устойчивого развития Гамбургского университета, г. Гамбург, Германия
christian.beer@uni-hamburg.de

РУНГЕ А.

Отдел мерзлотоведения Центра полярных и морских исследований имени Гельмгольца Института имени Альфреда Вегенера, г. Потсдам, Германия

ГРОССЕ Г.

Отдел мерзлотоведения Центра полярных и морских исследований имени Гельмгольца Института имени Альфреда Вегенера; Институт наук о Земле Потсдамского университета; г. Потсдам, Германия

ХУГЕЛИУС Г.

Факультет физической географии и Болинский центр исследований климата Стокгольмского университета, г. Стокгольм, Швеция

КНОБЛАУХ К.

Факультет наук о земных системах Института грунтоведения и Центр исследований земных систем и устойчивого развития Гамбургского университета, г. Гамбург, Германия

АННОТАЦИЯ

Представляем вниманию читателей адаптированный перевод статьи немецких исследователей «Выбросы углекислого газа из ретрогрессивных оползней таяния в Сибири» (Beer et al., 2023), опубликованной в журнале *Environmental Research Letters* («Ученые записки об экологических исследованиях») 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 (Beer et al., 2023) приведена в конце.

В сезон плюсовых температур таяние богатых льдом многолетнемерзлых грунтов, слагающих склоны холмов или долин, берегов рек или морей, может привести к возникновению оползней, характеризующихся быстрым ретрогрессивным развитием. То есть у подножия склона возникает термокарстовая просадка или провал. Затем стенка отрыва, вогнутая в сторону бровки, продвигается все выше, формируя подковообразное в плане углубление в склоне. Сверху и по бокам оно имеет крутые, вертикальные или уступчатые стенки. Дно у него примерно соответствует крутизне склона. По дну стекают жидкая грязь и обломки из оттаявших и эродированных материалов стенок и самого дна. Весь этот процесс обнажает и делает доступной для нагревания и эрозии все большую поверхность мерзлого грунта, что способствует таянию многолетней мерзлоты на все большей площади, иногда на многих гектарах, и меняет рельеф.

На английском языке такого рода термокарстово-термоэрозионные формы называют *retrogressive thaw slumps* (RTS). На русский язык этот термин переводят по-разному. Здесь будем переводить его как «ретрогрессивные оползни таяния» (ROT).

Развитие ROT делает органические вещества, которые были в заморозенном состоянии в течение столетий или тысячелетий, доступными для разложения. Недавние исследования показали, что за последние два десятилетия площади, затронутые такими процессами из-за потепления климата, увеличились по всей Арктике, а также на других территориях, где распространена многолетняя мерзлота.



Объединив модель динамики углерода в грунтах с дистанционно обнаруживаемыми зонами POT и базой данных по органическому углероду в почвах, авторы переведенной статьи (Beer et al., 2023) показали, что ретрогрессивные оползни таяния в Сибири превратили ранее квазинейтральные экосистемы в мощные источники углекислого газа (в среднем на уровне 367 ± 213 г атомов углерода с 1 м^2 POT в год).

В глобальном масштабе недавние выбросы CO_2 из всех Сибирских зон развития POT включили $0,42 \pm 0,22$ Tg (тераграмм) углерода в год, что пока незначительно ($1 \text{ Tg} = 10^9 \text{ кг} = 10^{12} \text{ г}$). Однако в будущем (в зависимости от дальнейших изменений климата, скорости таяния многолетнемерзлых грунтов и роста площадей POT) такие процессы на склонах могут привести к изменениям ландшафтов в районах распространения многолетней мерзлоты и начать вносить весьма значимый вклад в выбросы CO_2 в атмосферу.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

многолетняя мерзлота; потепление климата; склон; ретрогрессивный оползень таяния (POT); органические вещества; микробиологическое разложение; органический углерод; углекислый газ; эмиссия.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Бер К., Рунге А., Гроссе Г., Хугелиус Г., Кноблаух К. Выбросы углекислого газа из ретрогрессивных оползней при таянии многолетней мерзлоты в Сибири // Геоинфо. 2024. Т. 6. № 1/2. С. 64–73 DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-1/2-64-73

CARBON DIOXIDE RELEASE FROM RETROGRESSIVE THAW SLUMPS IN SIBERIA

BEER Ch.

Department of Earth System Sciences of the Institute of Soil Science and Center for Earth System Research and Sustainability, University of Hamburg, Hamburg, Germany
christian.beer@uni-hamburg.de

RUNGE A.

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

GROSSE G.

Permafrost Research Section, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, Alfred Wegener Institute and Institute of Geosciences, University of Potsdam, Potsdam, Germany

HUGELIUS G.

Department of Physical Geography and Bolin Centre for Climate Research, Stockholm University, Stockholm, Sweden

KNOBLAUCH Ch.

Department of Earth System Sciences of the Institute of Soil Science and Center for Earth System Research and Sustainability, University of Hamburg, Hamburg, Germany

ABSTRACT

We present an adapted translation of the paper “Carbon dioxide release from retrogressive thaw slumps in Siberia” by German researchers (Beer et al., 2023). This paper was published in the “Environmental Research Letters” journal 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 (Beer et al., 2023) for the presented translation is given in the end.

Thawing of ice-rich permafrost soils in sloped terrain can lead to activation of retrogressive thaw slumps (RTSs) which make organic matter available for decomposition that has been frozen for centuries to millennia. Recent studies show that the area affected by RTSs increased in the last two decades across the pan-Arctic. Combining a model of soil carbon dynamics with remotely sensed spatial details of thaw slump area and a soil carbon database, the authors show that RTSs in Siberia turned a previous quasi-neutral ecosystem into a strong source of carbon dioxide (on the average 367 ± 213 g of carbon atoms from 1 м^2 of RTS per a year). On a global scale, recent emissions from Siberian thaw slumps of 0.42 ± 0.22 Tg carbon per a year have been negligible so far. However, depending on the future evolution of permafrost thaw and hence thaw slump-affected area, such hillslope processes can transition permafrost landscapes to become a major source of additional CO_2 release into the atmosphere.

KEYWORDS:

permafrost; climate warming; hillslope; retrogressive thaw slump (RTS); organic matter; microbial decomposition; organic carbon; carbon dioxide; emission.

FOR CITATION:

Beer Ch., Runge A., Grosse G., Hugelius G., Knoblauch Ch. Vybrosy uglekislogo gaza iz retrogressivnyh opolzney pri tayanii mnogoletney merzloty v Sibiri [Carbon dioxide release from retrogressive thaw slumps in Siberia] (translated from English into Russian) // Geoinfo. 2024. T. 6. № 1/2. S. 64–73 DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-1/2-64-73 (in Rus.).



ВВЕДЕНИЕ ►

Из-за глобального потепления температура воздуха в Арктике повышается почти в четыре раза быстрее, чем в среднем по миру [1]. Это ускоренное потепление является фактором, который сильно влияет на таяние многолетней мерзлоты на суше [2, 3], особенно на постепенное углубление подошвы активного (сезонно-талого) слоя [4, 5]. Кроме того, нарушения слоев грунта, изолирующих многолетнюю мерзлоту от воздействия атмосферного воздуха (в том числе при пожарах, изменениях динамики выпадения и таяния снега, других повреждениях верхних горизонтов грунтов или растительного покрова [6–8]) могут вызвать еще более быстрое оттаивание за счет дополнительных изменений теплового режима грунтов.

В особенности в местах с большим количеством сегрегированного и неравномерно распределенного подземного льда (больших ледяных жил, массивных остатков погребенного ледникового льда и пр.) таяние может привести к резкому изменению состояния и разрушению грунта, что приведет к довольно быстрому и даже внезапным изменениям ландшафта на территории распространения многолетней мерзлоты [9], например к возникновению и развитию термоэрозионных рытвин, ложбин, оврагов, долин [10], термокарстовых озер [11], береговой эрозии [12], ретрогрессивных оползней таяния (РОТ) [13].

И постепенное, и резкое таяние многолетней мерзлоты в регионах ее распространения приводят к масштабным ландшафтными изменениям и представляют угрозу арктическим сообществам людей, инфраструктуре, экосистемам и углеродным пулам. Но эти процессы различаются по пространственным и временным масштабам.

В настоящее время в глобальных климатических моделях учитывается только постепенное таяние многолетней мерзлоты.

Хотя постепенное таяние и затрагивает более крупные территории, чем резкое, но, по оценкам Турецкого с соавторами [14], выбросы парниковых газов в результате возможного резкого оттаивания увеличат высвобождение органического углерода из многолетнемерзлых грунтов примерно на 50% к 2300 году, что внесет существенный вклад в поступление парниковых газов из регионов распространения многолетней мерзлоты.

Общая площадь нарушений грунтов и изменений ландшафтов из-за таяния

многолетней мерзлоты и вызванных этим изменений в процессах углеродного цикла до сих пор неясна.

Сочетание широкомасштабного дистанционного зондирования для определения масштабных изменений ландшафтов в результате таяния многолетнемерзлых грунтов с моделированием динамики углерода поможет количественно оценить последствия резкого таяния в континентальных масштабах. Например, Рунге с соавторами [15] оценили площадь РОТ, возникших в Сибири в 1999–2020 гг., на основе данных дистанционного зондирования с высоким разрешением, охватившего территорию площадью 8 млн км². Такие наборы данных дают уникальную возможность выполнить масштабирование измеренных в полевых условиях выбросов парниковых газов из РОТ с помощью численного моделирования.

Ретрогрессивные оползни таяния возникают в результате разрушений склонов из-за резкого оттаивания богатой льдом многолетней мерзлоты. Чаще всего они встречаются на берегах озер, рек и морей. РОТ – это образование с перемещением масс, которое после первоначального разрушения и обнажения богатых льдом грунтов состоит из подковообразной стенки отрыва, раскрытой к нижней части склона, и покрытого стекающей жидкой грязью дна, а также, часто, дренажного канала.

Процессы разрушения склонов, связанные с образованием и увеличением площади РОТ, обнажают многолетнемерзлые грунты, которые до этого были под землей в замерзшем состоянии сотни или тысячи лет. В ретрогрессивных оползнях таяния эти слои становятся частью сезонно-талого слоя и быстро разрушаются из-за термоэрозионных процессов, способствующих росту РОТ.

Потоки грязи, берущие начало на подковообразной стенке отрыва, текут по оттаивающему дну и обычно выходят через небольшие промоины в окружающую среду, расположенную ниже, например в озера, ручьи или Северный Ледовитый океан [16]. Как следствие, ранее бывшие в замерзшем состоянии органические вещества будут частично попадать в водные системы и подвергаться дальнейшим преобразованиям там [17, 18].

Кроме того, микроорганизмы начнут минерализовать оттаявшие органические вещества с выделением парниковых газов, таких как углекислый газ или метан [19]. Геоморфологические и биогеохимические процессы в РОТ обладают потенциалом гораздо более быстрого выделения парниковых газов из-за таяния

многолетней мерзлоты, чем при постепенном углублении подошвы сезонно-талого слоя. Например, в Северо-Восточной Сибири, по оценкам Кноблауха с коллегами [19], выбросы CO₂ соответствуют высвобождению в среднем 160–180 г атомов углерода с 1 м² РОТ в год.

В данной статье речь пойдет о выбросах CO₂ из оттаявших при развитии РОТ грунтов, которые не были перемещены в водные системы.

В континентальном и глобальном масштабе отсутствуют детальные оценки выбросов CO₂ из РОТ на основе комбинированных полевых исследований, дистанционного зондирования и моделирования. В этом исследовании авторы интегрировали модель динамического разложения органических веществ с картой недавнего дистанционного зондирования и с базой данных по органическому углероду в почвах, чтобы оценить недавние выбросы углекислого газа из РОТ в Сибири. Была поставлена цель решить следующие исследовательские вопросы.

1. Каково количество ранее находившихся в замороженном состоянии органических веществ в грунтах, ставших доступными для минерализации в результате недавнего развития РОТ, в континентальном масштабе в Сибири?

2. Сколько CO₂ было выброшено из РОТ в атмосферу Сибири за последнее время (в 1999–2020 гг.)?

3. Оказывает ли эта предполагаемая дополнительная эмиссия углерода в атмосферу какое-либо влияние на глобальный углеродный цикл?

МЕТОДЫ ►

Оценка уровней минерализации органических веществ в РОТ ►

Авторы оценили количество ежегодного минерализуемого органического вещества с выбросом в атмосферу CO₂, используя динамическую модель разложения первого порядка из двух пулов, реализованную в программе MathWorks MATLAB R2022b в соответствии с работами [20, 21]. Параметры модели были взяты из работы [22]. Чтобы учесть сезонность температуры грунта и ее вертикальное распределение, авторы приняли, что константа скорости разложения k зависит от температуры в соответствии с моделью Q₁₀:

$$k = k_{\text{ref}} \cdot Q_{10}^{\frac{T - T_{\text{ref}}}{10}},$$

где k_{ref} – значения параметра, взятые из работы [22]; T_{ref} – соответствующая тем-

пература (4 °C). Было принято, что параметр Q равен 2 [23, 24].

Авторы применили эту модель ко всем обнаруженным POT на всей исследуемой территории в Сибири.

В качестве входных данных для модели требовалось несколько переменных (подробнее о которых будет рассказано позже): местоположение и площадь POT; сезонность средней температуры верхнего слоя грунта и залегающих дальше от поверхности грунтов; исходные запасы органического углерода в этих грунтах.

Учитывая доступные данные о температуре грунтов, авторы провели расчеты при размерах ячеек сетки 0,5°. Сначала была построена сетка с ячейками по 0,5°. Для каждой ячейки была определена доля площади POT, среднемесячные значения температуры верхнего слоя грунта и залегающих глубже грунтов, а также исходное содержание органических веществ в этих грунтах. Затем была построена и запущена динамическая модель с использованием указанных граничных условий.

Была учтена неопределенность параметров модели с использованием всех 48 наборов параметров из работы [22] для голоценовых и плейстоценовых отложений Курунгнаха (дополнительный материал). Неопределенность поправки на площадь POT и запасов органических веществ выражалась через стандартные (среднеквадратичные) отклонения. Для каждой ячейки сетки была сделана повторная выборка нормального распределения, представляющего эти стандартные отклонения и средние значения площади и запасов органических веществ с использованием вектора из десяти значений для обеих переменных. В итоге 4800 раз были оценены выбросы углерода для каждой ячейки и зарегистрированы средние значения и стандартные отклонения для всех результатов по данным для всех ячеек сетки.

Оценка площади POT ▶

На карту всей Северо-Восточной Сибири были нанесены активные POT, чтобы определить: распространение POT в континентальном масштабе; годовую динамику таяния с 1999 по 2020 год; площадь территории, на которую в настоящее время влияет быстрое оттаивание из-за POT.

Для достижения этих целей авторы применили основанный на снимках со спутника Landsat инструмент (алгоритм) анализа трендов изменений

LandTrendr, который выполняет спектрально-временную сегментацию временных рядов данных для идентификации возникновения нарушений и периодов восстановления из ежегодных мозаик снимков Landsat [25]. Этот алгоритм был интегрирован в платформу сервиса геопространственной обработки Google Earth Engine, то есть реализован как инструмент LandTrendr-Google Earth Engine (LT-GEE) [26]. Авторы адаптировали и параметризовали алгоритм LT-GEE так, чтобы он был чувствителен к спектральным изменениям, связанным с динамикой таяния POT, и для обнаружения годовой динамики таяния в Северо-Восточной Сибири [15].

Сначала авторы расширили объем данных, добавив к изображениям со спутника Landsat также снимки со спутника Sentinel-2 для улучшения охвата исследуемой территории в высоких северных широтах [27] и применили корректировку спектральных диапазонов для гармонизации ежегодных мозаик снимков со спутников Landsat и Sentinel-2 [28].

Затем были созданы наборы достоверных данных об отдельных POT на исследуемой территории с помощью программы для синхронизации системного времени TimeSync [29], чтобы выполнить параметризацию для запуска алгоритма LT-GEE на основе такого преобразования снимков, как преобразование Каута – Томаса (методом «колпак с кисточкой»), с определением вегетационного индекса, необходимого для дешифрирования и отделения изображений зеленой вегетирующей растительности от изображений других объектов [30].

И наконец, для исследуемой территории была проведена обработка снимков за период 1999–2020 гг. по алгоритму LT-GEE с указанной параметризацией.

Кроме того, были выполнены пространственная маскировка и бинарная классификация, чтобы ограничить результаты использования LT-GEE выявлением POT и исключить другие объекты с аналогичными спектральными характеристиками (например, следы от пожаров и оползни другого рода). При этом адаптированный алгоритм LT-GEE определяет изменение спектральных характеристик, связанное с изменением поверхности земли от нетронутой растительности до оголенного грунта из-за оттаивания в течение оцениваемого периода.

Таким образом, полученные результаты выявили первичные и повторно инициированные активные POT, а также латеральный рост POT с 2000 по 2019 год.

Использованный подход к картированию не может обнаружить и учесть старые, стабилизированные и вновь заросшие растительностью POT, поскольку их спектральные характеристики сильно отличаются. Кроме того, он не учитывает стабилизацию, зарастание растительностью POT в течение периода оценки.

Всего было выявлено 50895 активных POT, что к 2020 году затронуло общую площадь 868 км².

Нанесенные на карту активные POT различались по размеру. Их средняя площадь составила 1,7 га. Наименьший и наибольший по площади POT заняли 0,36 и 15 га соответственно. Эти ограничения необходимо было применять для обеспечения надежного картографирования POT.

Указанные размеры POT в целом хорошо согласовывались с результатами других исследований, в которых говорилось, что размеры POT варьируют от 0,15 до 52 га [31–34].

Существует небольшое отклонение в сторону более крупных POT для снимков со спутника Landsat с пространственным разрешением 30 м, но наиболее часто встречающиеся размеры POT охватываются и в этом случае.

Временной анализ динамики быстро оттаивания первоначально показал устойчивое увеличение общей площади территорий, затронутых POT, в Северо-Восточной Сибири, причем более резкое увеличение началось в 2016 году и продолжается до сих пор [15].

Общая площадь POT, оцененная по снимкам со спутников Landsat и Sentinel-2 (с разрешением 30 м), затем была подтверждена с помощью мультиспектральных изображений с очень высоким разрешением (ОВР, 5 м), которые были получены от группы спутников RapidEye для всей исследуемой территории за 2018 и 2019 годы. Результирующие отклонение и диапазон неопределенности для обработанных снимков с разрешением 30 м использовались для корректировки первоначальной оценки площади POT.

Мультиспектральные изображения ОВР имеют ограничения из-за часто присутствующего облачного покрова и большой исследуемой площади. Поэтому авторы выполнили валидацию результатов на пяти целевых участках по всей исследуемой территории.

Оценка запасов органического углерода в грунтах при размерах ячеек сетки 0,5° ▶

Данные о пространственном распределении запасов органического углерода в почвах были взяты из версии 2 базы данных «Северный циркумполярный почвенный углерод» (Northern Circumpolar Soil Carbon Database, version 2 – NCSCDv2) [35, 36]. Этот набор данных был создан путем объединения грунтовых разрезов по полевым данным с несколькими картами национальных или региональных классификаций почв северного региона распространения многолетней мерзлоты. Данные по различным типам почв были оцифрованы, представлены в виде географической информационной системы (ГИС) и согласованы с общепринятой схемой классификации почв по «Таксономии почв Министерства сельского хозяйства США» [37].

В региональном масштабе данные почвенной карты затем были связаны с данными почвенных профилей, общее количество которых n составило 1778, для расчета запасов органического углерода в почвах для различных стандартных интервалов глубины. Затем данные были распределены по сетке с несколькими разными разрешениями (размерами ячеек сетки).

Для анализа в этом исследовании использовались данные для глубины 0–100 см при размере ячейки сетки 0,5°. При этом 30 и 70% общих запасов органических веществ в пределах 0–100 см от поверхности были отнесены к запасам верхнего слоя грунта и находящихся глубже грунтов соответственно.

Профиль температуры грунта при размере ячейки сетки 0,5° ▶

Временные ряды профилей температуры в ячейках сетки размером 0,5°, падающих в пределы POT, за период 1991–2010 гг. были оценены с помощью панарктического моделирования с использованием модели поверхности суши JSBACH. Эта модель недавно была усовершенствована за счет включения процессов в холодных регионах [7, 38, 39]. Для данного исследования авторы использовали версию модели, которая не учитывает слой лишайников и мохообразных, поскольку такой слой отсутствует на нарушенных участках POT. Всего в неявной численной схеме для решения уравнения теплопроводности с фазовым переходом было использовано пять динамических слоев снега и семь слоев грунтов.

Мощность слоев грунта с активными температурным и гидрологическим режимами увеличивается от 6 см у поверхности до 30 м для нижнего слоя, достигая общей глубины 53 м. Горизонтальное разрешение результатов моделирования составляет 0,5°, что соответствует разрешению данных о климатическом воздействии. Модель JSBACH интерполирует ежедневные данные о климатическом воздействии в получасовые значения, что является внутренним временным шагом модели. Набор климатических данных с шагом 0,5° за период 1901–2100 гг. представляет собой комбинацию наборов данных, основанных на наблюдениях и повторном анализе, а также результатов использования «Модели систем Земли» (Earth System Model). Подробная информация о наборе данных и методе коррекции погрешностей приведена в работе [39].

Эта версия модели оценивалась с точки зрения физических процессов в холодных регионах на уровне участков и в панарктическом масштабе многими исследователями [6, 7, 38, 39], а также, в частности, для конкретного POT в Северо-Восточной Сибири [19]. Для оценки минерализации гетеротрофного органического вещества авторы усредняли температуру для наружного (0–30 см) и залегающих глубже (30–100 см) грунтов для каждой ячейки сетки. Хотя температура грунтов может сильно варьировать между и внутри POT из-за ориентации и экспозиции склона [40], здесь авторы использовали среднее значение для ландшафта при размере ячейки сетки 0,5°, чтобы охватить сезонность и крупномасштабные колебания температуры грунтов.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ▶

Коррекция площади POT ▶

Сопоставление идентифицированных POT с изображениями ОВР показало, что средняя недооценка площади, подверженной быстрому оттаиванию, должна была составить к 2020 году 32,5% со стандартным отклонением 26%. Эту недооценку при использовании алгоритма LT-GEE можно объяснить тремя причинами.

Во-первых, пространственные разрежения объединенных наборов данных, полученных со спутников Landsat и Sentinel-2 (30 м), и изображений ОВР, полученных с помощью группы спутников RapidEye, различаются на один порядок, что приводит к пробелам в пло-

щади, особенно на границах отдельных POT из-за размера пикселя 30 м.

Во-вторых, авторы в целом недооценивали площадь, на которую влияют POT в Северо-Восточной Сибири, из-за ограничения минимальной картографической единицей в 0,36 га. POT – это в целом мелкомасштабные нарушения с типичными размерами от 0,15 га до нескольких гектаров [32, 33]. Из-за этого подход авторов к составлению карт с помощью алгоритма LT-GEE не учитывал нарушения меньших масштабов.

В-третьих, оценивалась только динамика активных POT в период с 1999 по 2020 год [15], а динамика таяния до периода оценки не могла быть учтена с помощью LT-GEE. Однако при определении границ ретрогрессивных оползней таяния их площадь на изображениях ОВР, полученных с помощью группы спутников RapidEye, полностью включала нарушения, а также в основном включала пути потоков талой грязи и их отложений, поскольку они считаются частью POT. Поскольку эти участки были нарушены до 1999 года или, как в случае с путями потоков талой грязи и их отложений, постоянно остаются нарушенными со спектральной точки зрения (нет изменений при переходе от нетронутой растительности к оголенному грунту), эти участки (возникновение которых могло предшествовать 1999 году) не были зарегистрированы как нарушения с помощью LT-GEE с 1999 по 2020 год.

Поэтому авторы скорректировали площадь каждого отдельного POT на указанное отклонение величиной $32 \pm 26\%$, в результате чего общая площадь POT составила $1145 \pm 2,5$ км².

Доступность органического углерода для разложения в зонах POT ▶

На основе базы данных NCSCDv2 авторы оценили количество органического углерода в верхнем метре грунтов отдельно для каждого POT. Из-за экспоненциального распределения площадей POT [15] общее количество органического углерода в наружном метре грунтов также следует этому распределению (рис. 1, а).

Абсолютное количество органического углерода в верхнем метре каждого POT находится в пределах от $0,05 \times 10^6$ до 43×10^6 кг (в среднем $1,25 \times 10^6$ кг). Согласно этому подходу в настоящее время в наружном метре грунта во всех закартированных сибирских POT в общей сложности при-

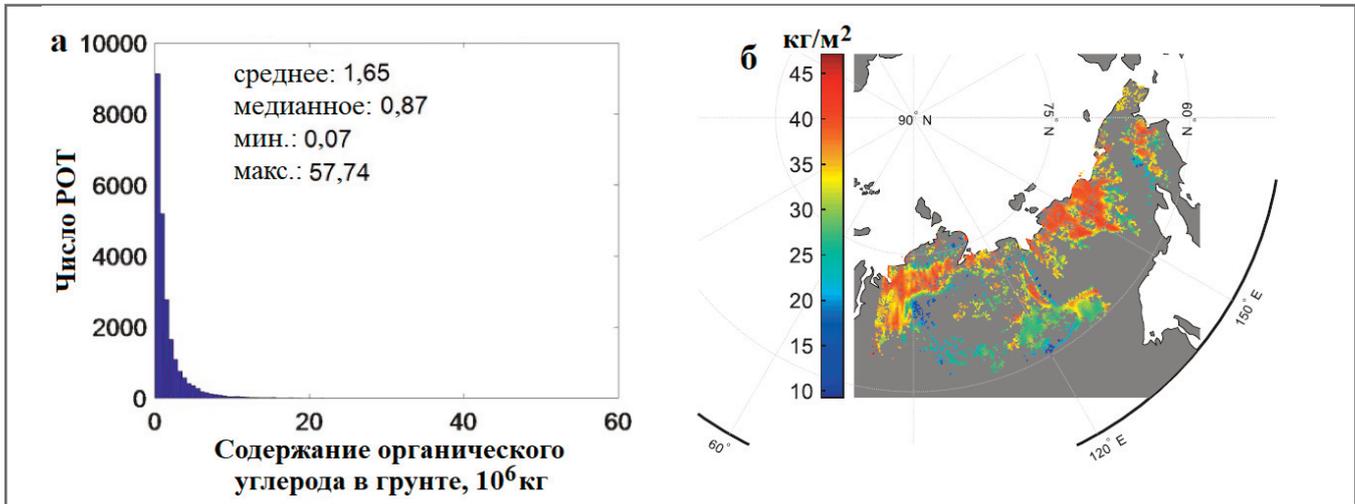


Рис. 1. Оцененное содержание органического углерода в верхнем метре грунта (COU) каждого POT: а – гистограмма COU, оцененного для каждого POT; б – пространственные детали среднего COU на 1 м² в плане

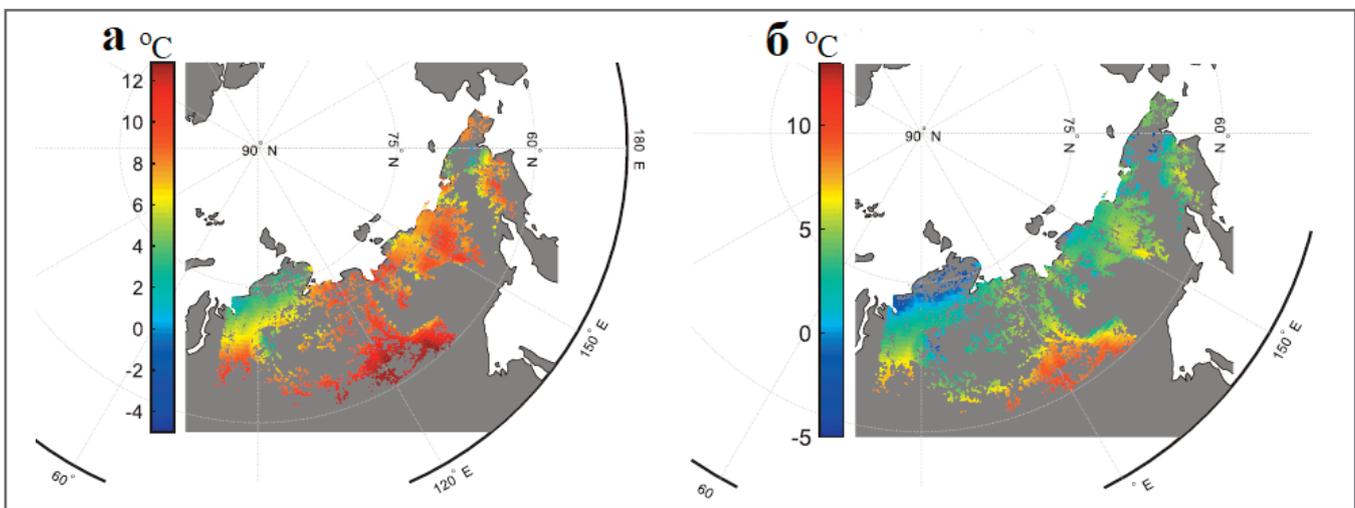


Рис. 2. Результаты моделирования средней температуры каждого POT за июнь – июль – август в грунтах на глубине 0–30 см (а) и в грунтах на глубине 30–100 см (б) за период 1991–2010 гг.

сутствует 29 Тг (29×10^9 кг) атомов органического углерода.

Среднее содержание органического углерода на 1 м² исследуемых площадей показано на рисунке 1, б. Это прямая выборка для отдельных POT из базы данных NCSCDv2. Важно отметить высокое содержание органического углерода в грунтах: Западно-Сибирских низменностей (в торфяниках); едом Якутии и Дальнего Востока (плосковершинных возвышенностей останцового типа, окруженных аласами) [41]; долин рек (вследствие неоднократных отложений аллювия). В южных горных районах содержание органического углерода ниже, что необходимо учитывать при общих оценках выбросов CO₂.

Температура грунтов POT ►

Автономное моделирование с помощью модели земной поверхности JSBACH показало, что текущие темпе-

ратуры наружного слоя грунта (0–30 см) составляют 0–12 °С летом (в июне – июле – августе) с выраженными градиентами по широте и долготе (рис. 2, а). Температура грунта выше 10 °С на юге Западной Сибири и в Якутии является причиной значительного выделения CO₂.

Температура грунтов на глубине от поверхности в среднем 30–100 см в северных регионах может быть и ниже точки заморозания в зависимости от мощности сезонно-талого слоя (рис. 2, б). Это может ограничить разложение органических веществ. Однако многие POT имеют летом положительную температуру грунтов на глубине 30–100 см (см. рис. 2, б).

Выбросы углекислого газа из POT ►

Применяя модель динамического разложения к доступным для тепла ор-

ганическим веществам с учетом конкретной температуры наружного слоя грунтов и грунтов, находящихся глубже, авторы оценили минерализацию органических веществ, в среднем соответствующую выделению 367 ± 213 г атомов углерода с 1 м² POT в год (рис. 3). Это соответствует общему выбросу $0,42 \pm 0,22$ Тг атомов углерода в составе CO₂ в год из всех POT Сибири (1 тераграмм = 10^9 кг = 10^{12} г).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ►

Таяние богатой льдом многолетней мерзлоты может привести к резким термокарстовым явлениям, термоэрозии и существенным изменениям в геоморфологии ландшафтов. На территориях с наличием склонов эти процессы могут привести к образованию POT, что делает ранее находившиеся в заморзшем состоянии (часто много тысяч лет) органические вещества доступными для

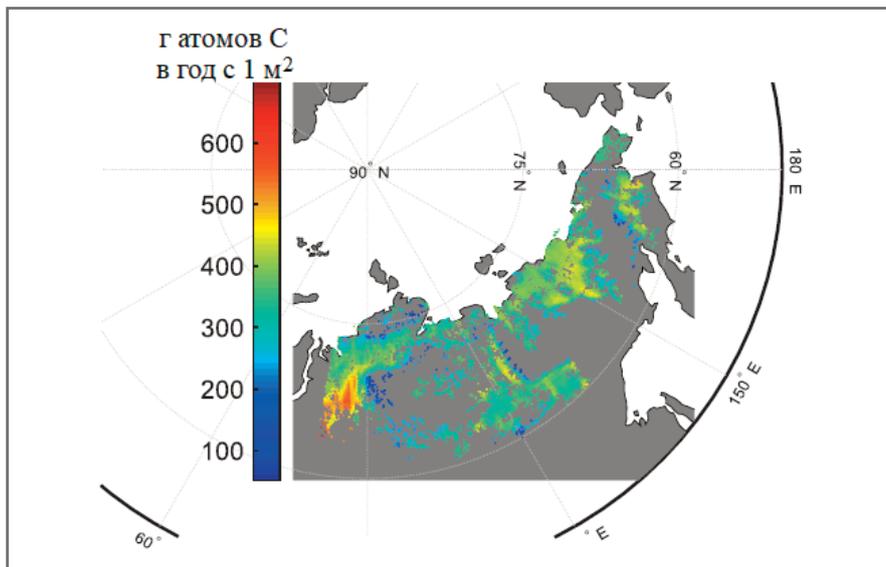


Рис. 3. Оцененные среднегодовые выбросы углекислого газа из ПОТ в период 1991–2010 гг., выраженные в граммах атомов углерода в год с 1 м²

микробиологических процессов разложения из-за того, что содержащиеся их грунты быстро оказываются обнаженными и доступными для оттаивания в летний сезон.

Является ли такое широко распространенное и часто резкое локальное явление, как возникновение и развитие ПОТ, важным в континентальном масштабе для глобального углеродного цикла? Чтобы ответить на этот вопрос, авторы впервые объединили несколько новых наборов данных о ПОТ (результаты дистанционного зондирования, базу данных по содержанию углерода в почвах, результаты исследований продуцирования CO₂) с динамическим моделированием для оценки недавних выбросов углерода из сибирских ПОТ.

Полученные результаты показали, что ПОТ являются мощными локальными источниками выбросов углекислого газа в атмосферу. Средний уровень выбросов углерода в составе CO₂ составляет 367±213 г атомов углерода с 1 м² ПОТ в год, что резко контрастирует с небольшим высвобождением органического углерода из других участков тундры в изучаемом регионе [42]. Однако площадь воздействия недавно возникших ПОТ в Сибири, составляющая 868 км², недостаточно велика для того, чтобы соответствующие выбросы углекислого газа могли сказаться на глобальном углеродном цикле. Оцененные общие для всех сибирских ПОТ выбросы углерода величиной 0,42 Тг/год (1 тераграмм=10⁹ кг) на четыре порядка ниже, чем ежегодные антропогенные выбросы углерода, составляющие около 10,6 Пг/год (1 петаграмм = 10¹² кг) [43].

Тем не менее большое количество CO₂, выбрасываемого на относительно небольшой, но быстро растущей территории ПОТ, вызывает беспокойство по поводу будущих сценариев – если нынешняя тенденция быстрого увеличения количества и площади ПОТ с 2016 года сохранится и в дальнейшем.

Увеличение площади ПОТ в Северной Сибири с 1999 по 2019 год превысило 331% [15]. Столь значительные темпы роста сибирских ПОТ сопоставимы с высокими темпами, наблюдающимися в последние десятилетия в более мелких регионах Северо-Западной Канады, таких как район дельты реки Маккензи (от 2 до 407% с 1950–1960-х годов по 2004–2008 годы) [44] или канадский остров Бэнкс (6370% с 1984 по 2015 год) [45].

Если принять постоянную площадь ПОТ и постоянное количество связанных с ней доступных для разложения органических веществ в будущем, то, по оценкам, выбросы CO₂ из всех сибирских ПОТ будут включать 0,54 Тг углерода в год в конце XXI века из-за роста температуры грунтов по сценарию RCP8.5 (в среднем 481 г углерода из грунта глубиной до 1 м для одного ПОТ).

Это означает, что будущее повышение температуры грунтов окажет не такое уж большое влияние на выбросы CO₂ из одного ПОТ. Однако общая площадь всех ПОТ может резко измениться при продолжающемся потеплении климата, особенно в высоких широтах Арктики (многие недавние исследования предполагают тесную связь между быстрым таянием многолетней мерзлоты и такими климатическими явлениями,

как экстремальные летние температуры или атмосферные осадки) [32, 45–49].

Еще одним важным аспектом является то, что объемы ПОТ трудно оценить по данным дистанционного оптического зондирования. Требуются цифровые данные по высотным отметкам, которые позволяют более детально оценивать объемы мобилизованных отложений и углерода [49]. Основываясь на сценарии RCP8.5, Турецкий с соавторами [50] предположили увеличение панарктической площади всех ПОТ с 1797 км² в 2000 году до 15725 км² в 2025 году и до 62933 км² в 2100 году (RCP8.5). Если принять, что эта площадь составит 62933 км² в 2100 году, то прогнозные выбросы в атмосферу из ПОТ к концу XXI века составят около 30,2 Тг углерода в год.

Использование линейной модели увеличения от 0,4 до 30,2 Тг углерода в год в течение 80 лет даст общее количество углерода, которое может выбрасываться в атмосферу только из панарктических ПОТ, равное 1,2 Пг в год. Это число ниже, чем 4,4 Пг углерода в год, оцененное Турецким с соавторами [50], но подтверждает порядок ранее опубликованной величины, а также то, что ПОТ могут внести весьма заметный вклад в будущее выделение углекислого газа в результате таяния многолетней мерзлоты.

Эти приблизительные оценки показывают, что основной источник неопределенности прогноза будущих выбросов парниковых газов из ПОТ связан с высокой неопределенностью общей площади ПОТ в будущем. Поэтому необходимы дальнейшие исследования по динамическому моделированию содержания сегрегированного льда в многолетнемерзлых грунтах и связанных с ним термоэрозионных процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ►

ПОТ в Сибири представляют собой места активного выброса углекислого газа в атмосферу. По сути, проседание и боковая термоэрозия в ПОТ после таяния богатых льдом многолетнемерзлых грунтов изменяют углеродный баланс экосистем, находящихся под влиянием многолетней мерзлоты, от небольшого поглощения до мощной эмиссии CO₂.

В глобальном масштабе недавние выбросы углерода из всех ПОТ незначительны по сравнению с другими процессами глобального углеродного цикла. Однако в будущем они могут стать более существенными в зависимости от динамики возникновения и роста ПОТ

на территориях распространения богатой льдом многолетней мерзлоты. 

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ ►

Данные, подтверждающие выводы, сделанные в этом исследовании, находятся в открытом доступе по адресу: zenodo.org/record/7552550 (doi.org/10.5281/zenodo.7552550).

Авторы благодарны за финансовую поддержку со стороны фондов DFG-BE 6485/1-1, DFG-BE 6485/4-1, программы ESA CCI, программы ESA CCI+Permafrost (проекта EU Horizon 2020 Arctic Passion, гранта № 101003472), проекта BMBF KoPf Synthesis (гранта 03F0834B), а также за поддержку со стороны Министерства образования и науки Герма-

нии (проекта KOPF-Synthesis Project 03F0834A) и кластера передового опыта Гамбургского университета CLICCS (EXC2037/1). Авторы также признательны за техническую поддержку CEN-IT – центрального поставщика IT-услуг Центра исследований систем Земли и устойчивого развития Гамбургского университета.

ИСТОЧНИК ДЛЯ ПЕРЕВОДА ►

(SOURCE FOR THE TRANSLATION) ►

Beer Ch., Runge A., Grosse G., Hugelius G., Knoblauch C. Carbon dioxide release from retrogressive thaw slumps in Siberia // Environmental Research Letters. Vol. 18. № 10. Article 104053. IOP Publishing Ltd, 2023. DOI: 10.1088/1748-9326/acfdbb. URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/acfdbb; iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/acfdbb/pdf

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, ИСПОЛЬЗОВАННОЙ АВТОРАМИ ПЕРЕВЕДЕННОЙ СТАТЬИ ►

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

- Rantanen M., Karpechko A.Y., Lipponen A., Nordling K., Hyvärinen O., Ruosteenoja K., Laaksonen A., Laaksonen A. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979 // Commun. Earth Environ. 2022. Vol. 3. Article 168.
- Biskaborn B.K. et al. Permafrost is warming at a global scale // Nat. Commun. 2019. Vol. 10. Article 264.
- Smith S.L., O'Neill H.B., Isaksen K., Noetzi J., Romanovsky V.E. The changing thermal state of permafrost // Nat. Rev. Earth Environ. 2022. Vol. 3. P. 10–23.
- Park H., Kim Y., Kimball J.S. Widespread permafrost vulnerability and soil active layer increases over the high northern latitudes inferred from satellite remote sensing and process model assessments // Remote Sens. Environ. 2016. Vol. 175. P. 349–358.
- Peng S. et al. Simulated high-latitude soil thermal dynamics during the past 4 decades // Cryosphere. 2016. Vol. 10. P. 179–192.
- Porada P., Ekici A., Beer C. Effects of bryophyte and lichen cover on permafrost soil temperature at large scale // The Cryosphere. 2016. Vol. 10. P. 2291–2315.
- Beer C., Porada P., Ekici A., Brakebusch M. Effects of short-term variability of meteorological variables on soil temperature in permafrost regions // Cryosphere. 2018. Vol. 12. P. 741–757.
- Heim B., Lisovski S., Wiczorek M., Morgenstern A., Juhls B., Shevtsova I., Herzsuh U., Boike J., Fedorova I., Herzsuh U. Spring snow cover duration and tundra greenness in the Lena Delta, Siberia: two decades of MODIS satellite time series (2001–2021) // Environ. Res. Lett. 2022. Vol. 17. Article 085005.
- Nitzbon J., Westermann S., Langer M., Martin L.C.P., Strauss J., Laboor S., Boike J. Fast response of cold ice-rich permafrost in northeast Siberia to a warming climate // Nat. Commun. 2020. Vol. 11. Article 2201.
- Morgenstern A., Overduin P.P., Gunther F., Stettner S., Ramage J., Schirrmeister L., Grosse G., Grosse G. Thermo-erosional valleys in Siberian ice-rich permafrost // Permafrost. Periglacial Process. 2021. Vol. 32. P. 59–75.
- Grosse G., Robinson J.E., Bryant R., Taylor M.D., Harper W., DeMasi A., Harden J.W. Distribution of late Pleistocene ice-rich syngenetic permafrost of the Yedoma Suite in east and central Siberia, Russia: Open File Report 2013-1078. U.S. Geological Survey, 2013. P. 37.
- Gunther F., Overduin P.P., Sandakov A.V., Grosse G., Grigoriev M.N. Short- and long-term thermo-erosion of ice-rich permafrost coasts in the Laptev Sea region // Biogeosciences. 2013. Vol. 10. P. 4297–4318.
- Burn C.R., Lewkowicz A.G. Canadian landform examples – 17 retrogressive thaw slumps // Can. Geogr. 1990. Vol. 34. P. 273–276.
- Turetsky M. et al. Permafrost collapse is accelerating carbon release // Nature. 2019. Vol. 569. P. 32–34.
- Runge A., Nitze I., Grosse G. Remote sensing annual dynamics of rapid permafrost thaw disturbances with LandTrendr // Remote Sens. Environ. 2022. Vol. 268. Article 112752.
- Lantuit H., Pollard W.H. Temporal stereophotogrammetric analysis of retrogressive thaw slumps on Herschel Island, Yukon Territory // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2005. Vol. 5. P. 413–423.
- Beel C.R., Lamoureux S.F., Orwin J.F., Pope M.A., Lafrenière M.J., Scott N.A. Differential impact of thermal and physical permafrost disturbances on high Arctic dissolved and particulate fluvial fluxes // Sci. Rep. 2020. Vol. 10. Article 11836.
- Kokelj S.V., Kokoszka J., van der Sluijs J., Rudy A.C.A., Tunnicliffe J., Shakil S., Zolkos S., Zolkos S. Thaw-driven mass wasting couples slopes with downstream systems, and effects propagate through Arctic drainage networks // Cryosphere. 2021. Vol. 15. P. 3059–3081.
- Knoblauch C., Beer C., Schuett A., Sauerland L., Liebner S., Steinhof A., Grigoriev M.N., Faguet A., Pfeiffer E.-M. Carbon dioxide and methane release following abrupt thaw of Pleistocene permafrost deposits in Arctic Siberia // J. Geophys. Res. 2021. Vol. 126. Article e2021JG006543.

20. Andren O., Katterer T., ICBM: the introductory carbon balance model for exploration of soil carbon balances // *Ecol. Appl.* 1997. Vol. 7. P. 1226–1236.
21. Beer C., Knoblauch C., Hoyt A.M., Hugelius G., Palmtag J., Mueller C.W., Trumbore S. Vertical pattern of organic matter decomposability in cryoturbated permafrost-affected soils // *Environ. Res. Lett.* 2022. Vol. 17. Article 104023.
22. Knoblauch C., Beer C., Sosnin A., Wagner D., Pfeiffer E.-M. Predicting long-term carbon mineralization and trace gas production from thawing permafrost of Northeast Siberia // *Glob. Change Biol.* 2013. Vol. 19. P. 1160–1172.
23. Schadel C. et al. Potential carbon emissions dominated by carbon dioxide from thawed permafrost soils // *Nat. Clim. Change.* 2016. Vol. 6. P. 950–953.
24. Vaughn L.J.S., Torn M.S. 14C evidence that millennial and fast-cycling soil carbon are equally sensitive to warming // *Nat. Clim. Change.* 2019. Vol. 9. P. 467–471.
25. Kennedy R.E., Yang Z.G., Cohen W.B. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series. 1. LandTrendr – temporal segmentation algorithms // *Remote Sens. Environ.* 2010. Vol. 114. P. 2897–2910.
26. Kennedy R.E., Yang Z.Q., Gorelick N., Braaten J., Cavalcante L., Cohen W.B., Healey S. Implementation of the LandTrendr algorithm on Google Earth Engine // *Remote Sens.* 2018. Vol. 10. № 5. Article 691. doi.org/10.3390/rs10050691691.
27. Runge A., Grosse G. Mosaicking Landsat and Sentinel-2 data to enhance Landtrendr time series analysis in Northern high latitude permafrost regions // *Remote Sens.* 2020. Vol. 12. Article 2471.
28. Runge A., Grosse G. Comparing spectral characteristics of Landsat-8 and Sentinel-2 same-day data for Arctic-Boreal regions // *Remote Sens.* 2019. Vol. 11. Article 1730.
29. Cohen W.B., Yang Z.G., Kennedy R. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series/ 2. TimeSync – tools for calibration and validation // *Remote Sens. Environ.* 2010. Vol. 114. P. 2911–2924.
30. Huang C., Wylie B., Yang L., Homer C., Zylstra G. Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance // *Int. J. Remote Sens.* 2002. Vol. 23. P. 1741–1748.
31. Gunther F., Grosse G., Wetterich S., Jones B.M., Kunitzky V.V., Kienast F., Schirrmeister L. The batagay mega thaw slump, Yana Uplands, Yakutia, Russia: permafrost thaw dynamics on decadal time scale: paper presented at the Past Gateways Palaeo-Arctic Spatial and Temporal Gateways. 2015.
32. Kokelj S.V., Tunnicliffe J., Lacelle D., Lantz T.C., Chin K.S., Fraser R. Increased precipitation drives mega slump development and destabilization of ice-rich permafrost terrain, northwestern Canada // *Glob. Planet. Change.* 2015. Vol. 129. P. 56–68.
33. Lacelle D., Brooker A., Fraser R.H., Kokelj S.V. Distribution and growth of thaw slumps in the Richardson Mountains – Peel Plateau region, northwestern Canada // *Geomorphology.* 2015. Vol. 235. P. 40–51.
34. Ramage J.L., Irrgang A.M., Herzsuh U., Morgenstern A., Couture N., Lantuit H. Terrain controls on the occurrence of coastal retrogressive thaw slumps along the Yukon Coast, Canada // *J. Geophys. Res.* 2017. Vol. 122. P. 1619–1634.
35. Hugelius G. et al. Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps // *Biogeosciences.* 2014. Vol. 11. P. 6573–6593.
36. Hugelius G., Tarnocai C., Broll G., Canadell J.G., Kuhry P., Swanson D.K. The Northern Circumpolar Soil Carbon Database: spatially distributed datasets of soil coverage and soil carbon storage in the northern permafrost regions // *Earth Syst. Sci. Data.* 2013. Vol. 5. P. 3–13.
37. Soil Survey Staff. *Soil Taxonomy: a Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys.* Handbook (2nd edn). Natural Resources Conservation Service, U.S. Department of Agriculture, 1999. Vol. 436.
38. Ekici A., Beer C., Hagemann S., Boike J., Langer M., Hauck C. Simulating high-latitude permafrost regions by the JSBACH terrestrial ecosystem model // *Geosci. Model. Dev.* 2014. Vol. 7. P. 631–647.
39. Beer C., Zimov N., Olofsson J., Porada P., Zimov S. Protection of permafrost soils from thawing by increasing herbivore density // *Sci. Rep.* 2020. Vol. 10. Article 4170.
40. Turner K.W., Pearce M.D., Hughes D.D. Detailed characterization and monitoring of a retrogressive thaw slump from remotely piloted aircraft systems and identifying associated influence on carbon and nitrogen export // *Remote Sens.* 2021. Vol. 13. № 2. Article 171. doi.org/10.3390/rs13020171.
41. Strauss J. et al. Deep Yedoma permafrost: a synthesis of depositional characteristics and carbon vulnerability // *Earth-Sci. Rev.* 2017. Vol. 172. P. 75–86.
42. Eckhardt T., Knoblauch C., Kutzbach L., Holl D., Simpson G., Abakumov E., Pfeiffer E.-M. Partitioning net ecosystem exchange of CO₂ on the pedon scale in the Lena River Delta, Siberia // *Biogeosciences.* 2019. Vol. 16. P. 1543–1562.
43. Friedlingstein P., O’Sullivan M., Jones M.W., Andrew R.M., Gregor L., Hauck J., Zheng B. Global carbon budget 2022 // *Earth Syst. Sci. Data.* 2022. Vol. 14. P. 4811–4900.
44. Segal R.A., Lantz T.C., Kokelj S.V. Acceleration of thaw slump activity in glaciated landscapes of the Western Canadian Arctic // *Environ. Res. Lett.* 2016. Vol. 11. Article 034025.
45. Lewkowicz A.G., Way R.G. Extremes of summer climate trigger thousands of thermokarst landslides in a high Arctic environment // *Nat. Commun.* 2019. Vol. 10. Article 1329.

46. Lantz T.C., Kokelj S.V. Increasing rates of retrogressive thaw slump activity in the Mackenzie Delta region, NWT, Canada // *Geophys. Res. Lett.* 2008. Vol. 35. Article. L06502.
47. Farquharson L.M., Romanovsky V.E., Cable W.L., Walker D.A., Kokelj S.V., Nicolsky D. Climate change drives widespread and rapid thermokarst development in very cold permafrost in the Canadian high Arctic // *Geophys. Res. Lett.* 2019. Vol. 46. P. 6681–6689.
48. Ward Jones M.K., Pollard W.H., Jones B.M. Rapid initialization of retrogressive thaw slumps in the Canadian high Arctic and their response to climate and terrain factors // *Environ. Res. Lett.* 2019. Vol. 14. Article 055006.
49. Bernhard P., Zwieback S., Hajsek I. Accelerated mobilization of organic carbon from retrogressive thaw slumps on the northern Taymyr Peninsula // *Cryosphere*, 2022, Vol. 16. P. 2819–2835.
50. Turetsky M.R. et al. Carbon release through abrupt permafrost thaw // *Nat. Geosci.* 2020. Vol. 13. P. 138–143.

Независимый электронный журнал **ГеоИнфо**

С 2022 года журнал «ГеоИнфо»
выходит в формате *PDF.
10 выпусков в год.



WWW.GEOINFO.RU