

1 ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА В СИБИРИ – РЕГИОН В ПЕРЕХОДНЫЙ ПЕРИОД

Рената Треффайзен, Клаус Гроссфельд

Введение

Изменение климата, вероятно, является самым серьезным вызовом нашего времени. И это уже не чисто теоретическая проблема будущего. Каждый из нас уже чувствует, что условия жизни на Земле кардинально изменяются. Так, все чаще повсюду в мире происходят экстремальные погодные явления в виде продолжительных периодов засухи, аномальной жары или обильных осадков. Повышение уровня моря также угрожает нашей жизни на побережьях.

Однако нигде на Земле изменение климата не проявляется так ощутимо, как в Арктике. Так как здесь среднегодовая температура повышается уже в два раза быстрее, чем в среднем по миру. Основной причиной этого является альbedo регенерации льда. Яркий морской лед Северного Ледовитого океана отражает большую часть поглощённой солнечной энергии обратно в космос. Повышение температуры во всем мире приводит к таянию льда и обнажению темной поверхности океана под ним. Северный Ледовитый океан поглощает больше солнечной энергии и нагревается. В результате морской лед тает еще быстрее, и тенденция к повышению температуры усиливается. Последствия можно наблюдать даже из космоса: по сравнению с данными 40-летней давности, сегодня арктический морской лед к концу лета тает более чем на половину своей площади.

Все это оказывает разрушительное влияние на разнообразие видов и уникальные экосистемы, которые приспособились к суровым условиям жизни в Арктике. Также радикально меняется жизнь людей. В российской части северной республики Якутии, например, прежде застывшая вечная мерзлота оттаивает во многих местах, так что целые деревни погружаются в грязь.

На самом деле, измерения показывают, что значительные участки арктической вечной мерзлоты в Канаде и Сибири уже нагреваются на протяжении десятилетий. Если этот грунт оттаит на большой площади, в атмосферу может быть выброшено большое количество парниковых газов, что еще больше усилит глобальное потепление. Таким образом, таяние вечной мерзлоты оказывает влияние не только на местные экосистемы и людей, но и на климат всего мира, а значит, и на жизнь всех нас.

В данной статье представлено влияние изменения климата на арктическую вечную мерзлоту на основе результатов современных научных исследований, в

частности, с акцентом на регион Восточной Сибири / Северной Якутии. Кроме того, в главе описаны возможные сценарии развития в будущем.

Роль вечной мерзлоты

Ученые говорят о вечной мерзлоте или вечномерзлой почве, как только температура почвы становится ниже нуля °C в течение как минимум двух лет подряд (Murton et al. 2021). Недра могут состоять из скальных пород, отложений или почвы и содержать до 80% общего объема льда. Например, в северо-восточной Сибири есть регионы, где 70% недр состоит из льда (Maribus 2019). Толстые слои вечной мерзлоты в Сибири очень древние и являются наследием последнего ледникового периода. Примерно 100 000-10 000 лет назад здесь были особенно холодные и продолжительные зимы. В то же время земля не была защищена ледяным покровом километровой толщины, как в Гренландии, поэтому холод мог проникать глубоко под землю.

Вечная мерзлота в основном подразделяется на наземную, подводную и горную. Горная вечная мерзлота встречается в высоких горах, подводная вечная мерзлота - это замерзшее морское дно в районах полярных океанов, а наземная вечная мерзлота встречается в основном в тундре и лесных районах Северной Америки и Евразии.

В районах вечной мерзлоты климат, как правило, чрезвычайно холодный и сухой. Верхние слои почвы бедны питательными веществами и иногда очень влажные при сезонном оттаивании. Здесь могут процветать деревья и кустарники с мелкими корнями. Различают регионы со сплошной вечной мерзлотой (особенно в Арктике), где недра промерзают на 90-100%, и регионы с преры-



Рис. 1. Основная структура вечномерзлого грунта.

вистой вечной мерзлотой, где эта доля составляет лишь от 50 до 90% площади (см. рис. 1) (Maribus 2019).

Районы вечной мерзлоты занимают около 24% площади суши в северном полушарии. Общая глобальная площадь составляет от 16 млн км² до 21 млн км² (Murton 2021). Из них 32 000 км² занимает дельта Лены только в Сибири (Hubberten et al. 2006). В некоторых районах северо-восточной Сибири вечная мерзлота достигает экстремальной толщины до 1,5 км и простирается до средних широт из-за низкого количества зимних осадков и отсутствия защитного снежного покрова (Nelson 2003). На границе с прерывистой вечной мерзлотой толщина составляет всего около 60 м, со спорадической мерзлотой – около 12 м. Некоторые вечномерзлые почвы находятся в мерзлом состоянии более 100 000 лет. Недавние исследования смогли даже определить максимальный возраст в 650 000 лет для некоторых слоев вечной мерзлоты в Восточной Сибири (Murton et al. 2021). Обзор распределения типов вечной мерзлоты в северном полушарии приведен на рис. 2.

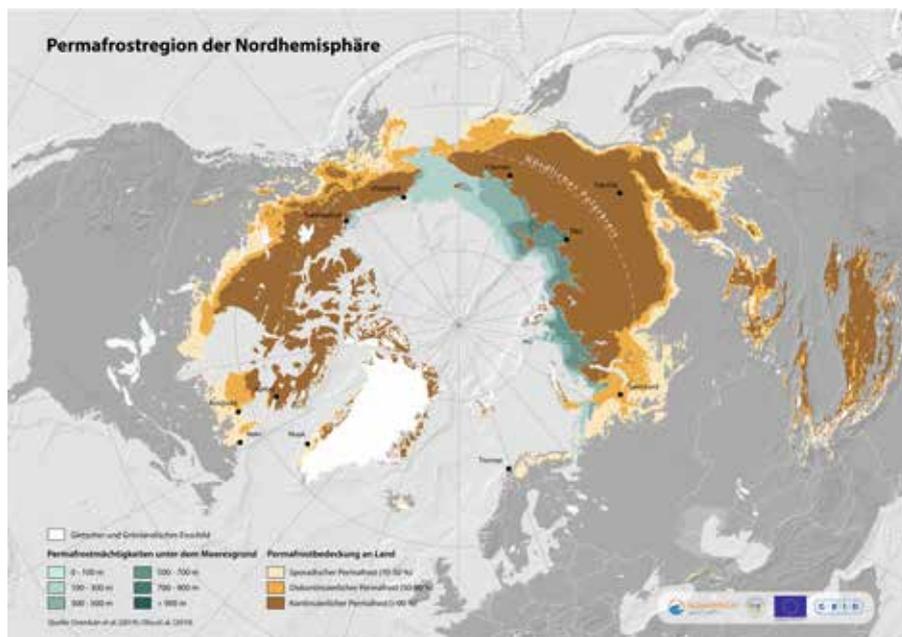


Рис. 2: Распределение различных типов вечной мерзлоты в Северном полушарии по степени покрытия (спорадическое, прерывистое или сплошное) на наземной поверхности и глубине вечной мерзлоты в морской зоне (Источник: Проект «Нунатарюк»; <https://www.flickr.com/photos/gridarendal/albums/72157713104471568>).



Рис. 3а

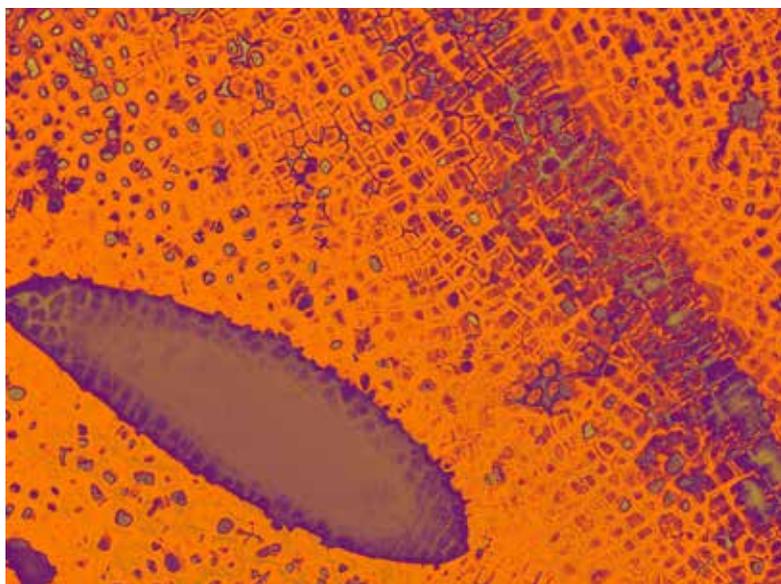


Рис. 3б

Рис. 3: (а) Сетевидные структуры из многоугольников ледяных клиньев формируют ландшафт вечной мерзлоты. Фото: Констанце Пиль/AWI.

(б) Аэрофотоснимок полигональной (многоугольной) тундры на острове Самойлова (дельта Лены, Сибирь), на котором цвета искусственно искажены, чтобы сделать более заметными некоторые ландшафтные структуры, например, водные пространства разной глубины. Фото: Джулия Бойк/AWI.

Большинство мерзлотных ландшафтов можно распознать по характерному рисунку поверхности, состоящему из правильных многоугольников – так называемых полигональных сетевых структур (рис. 3). Из-за чрезвычайно низких зимних температур замерзший грунт сжимается на поверхности, образуя трещины шириной в сантиметры и глубиной в метры. Во время таяния снега весной эти трещины заполняются водой, которая тут же снова замерзает из-за холодного грунта. Таким образом, постепенно формируются вертикальные ледяные жилы, которые в результате многократного таяния и замерзания в течение десятилетий и тысячелетий вырастают в ледяные клинья и создают типичные полигональные узоры на поверхности (см. рис. 4).

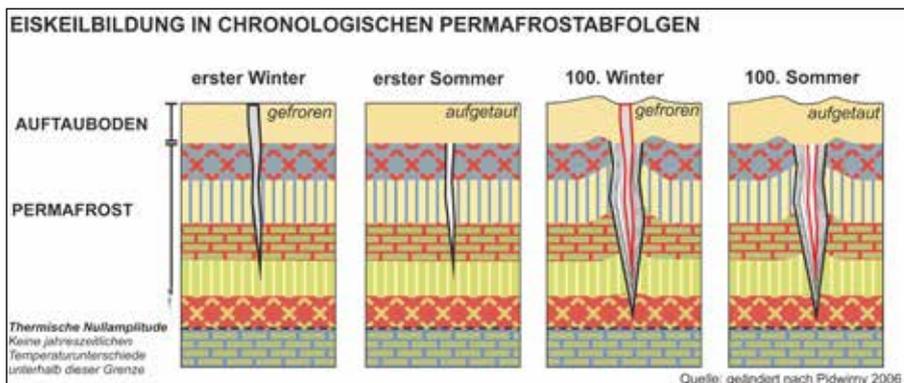


Рис. 4: Схематическое изображение формирования ледяных клиньев в хронологической мерзлотной последовательности (источник: модифицировано по Pidwirny 2006).

Типичная мерзлотная почва состоит из двух слоев: так называемого активного или оттаивающего слоя и мерзлого слоя. Активный верхний слой оттаивает каждое лето на глубину от 15 до максимум 100 см. Большая часть биологической и биохимической активности в арктических почвах происходит в этом тонком слое. Исследователи могут определить глубину оттаивания – т.е. границу слоя с вечной мерзлотой – путем регулярного измерения температуры обоих слоев.¹ Эти важные измерения дают информацию о влиянии глобального потепления на вечную мерзлоту: Краткосрочные колебания климата в основном влияют на глубину оттаивания, в то время как долгосрочные изменения климата также изменяют температуру лежащей под ним вечной мерзлоты.

В вечной мерзлоте хранится огромное количество отмерших растительных остатков. В отличие от тропического или умеренного климата этот органический материал в мерзлой почве не разлагается и не поддается воздействию микробов, поскольку они становятся активными только тогда, когда мерзлота оттаивает. Если же климат будет и дальше нагреваться, то бактерии начнут разлагать органический материал. В результате углерод, хранящийся в раститель-

ных остатках, попадёт в атмосферу в виде парникового газа (либо метана, CH_4 , либо углекислого газа, CO_2) и еще больше ускорит изменение климата.

Изменения температуры вечной мерзлоты

В недавнем прошлом во многих местах долгосрочных измерений в Северном полушарии были отмечены рекордные температуры в мерзлом слое вечной мерзлоты. В некоторых местах температура на глубине 10-20 м на 2-3° С выше, чем 30 лет назад (Десяткин и др. 2015). В среднем, температура в районах с непрерывным мерзлотным покровом увеличилась на $0,39^\circ\text{C} \pm 0,15^\circ\text{C}$ в период с 2007 по 2016 гг. В более теплых спорадических зонах с меньшим покровом увеличение за тот же период было значительно ниже $-0,20^\circ\text{C} \pm 0,10^\circ\text{C}$. Причиной этого является так называемый эффект скрытого тепла. В зонах разрывов температура чаще всего близка к нулю, поэтому в процессе потепления там тает большее количество льда. Во время этого фазового перехода из твердого состояния в жидкое происходит поглощение тепла, которое затем уже не способствует повышению температуры. Однако в результате таяния льда активный слой утолщается на большую глубину, поэтому микробное разложение растительных остатков и, соответственно, выделение парниковых газов также может увеличиться (Meredith et al. 2019).

Изменения в грунтовом льду

Таяние вечной мерзлоты и потеря льда, образовавшегося под землей – так называемого грунтового льда – приводит к опущению поверхности земли. Это может серьезно нарушить вышележащие экосистемы и тем самым нанести ущерб инфраструктуре людей – дорогам, железнодорожным путям, трубопроводам и домам. Степень, в которой изменение климата и таяние изменяют поверхность суши, зависит, прежде всего, от доли льда. Этот показатель является регионально типичным для мерзлотных почв и колеблется от 40% от общего объема в некоторых песках (песочных почвах) до 80-90% от общего объема в мелкозернистых почвах и отложениях.

Наиболее сильные изменения в связи с изменением климата следует ожидать в особенно льдистых вечномерзлых почвах, называемых «едома», в Сибири, на Аляске и канадской территории Юкон. Этот тип вечной мерзлоты имеет содержание льда от 50 до 90 процентов, массивные ледяные клинья и большое количество порового льда в грунте (см. рис. 5). В других, особенно уязвимых районах находятся крупные ледниковые льды значительной толщины и протяженности. Они встречаются, например, на северо-западе Канады, на островах Канадского архипелага, на полуостровах Ямал и Гыдан в Западной Сибири, а также на небольших территориях Восточной Сибири и Аляски.

Общий объем подземного льда, содержащегося в северных регионах вечной мерзлоты, оценивается со «средней степенью достоверности» в 5630-36550 км³ (Meredith et al. 2019). Если этот лед полностью растает, дополнительная вода поднимет уровень мирового океана на 2-10 см. Средняя степень достоверности и широкий диапазон колебаний в цифрах дают понять, что научных данных пока достаточно лишь для приблизительной оценки.

Согласно стандарту МГЭИК (Межправительственная группа экспертов по изменению климата, также известная как „Weltklimarat“), неопределенность научных утверждений выражается в пяти уровнях: очень низкая уверенность (утверждение верно менее чем в 1 случае из 10), низкая уверенность (верно в 2 случаях из 10), средняя уверенность (верно в 5 случаях из 10), высокая уверенность (верно в 8 случаях из 10), очень высокая уверенность (верно как минимум в 9 случаях из 10) (Solomon et al. 2007).



Рис. 5: Вид сбоку на ледяной утес Собо-Сисе-Едома с отколовшимися глыбами, протянувшийся примерно на 1,5 км вдоль берега Лены. В самой высокой точке обрыв вечной мерзлоты составляет 27 м – это высота многоэтажного дома. Для сравнения дан рост человека. Фото: Томас Опель/AWI.

Углеродный резервуар вечной мерзлоты

Большое количество органического углерода хранится в регионах вечной мерзлоты, который (углерод) очень чутко реагирует на изменения климата. Поэтому два самых важных вопроса в исследовании климата: сколько углерода

можно извлечь из резервуара вечной мерзлоты, когда он оттаивает в результате повышения температуры? А сколько его попадает в атмосферу в виде CO_2 и метана и ускоряет там изменение климата? (рис. 6)

Текущая наилучшая средняя оценка общего (поверхность плюс глубина) органического углерода почвы (наземного) в северном регионе вечной мерзлоты (площадь $17,8 \times 106 \text{ км}^2$) составляет от 1460 до 1600 гигатонн («средняя достоверность») (Schuur et al. 2013; Schuur et al. 2019). Некоторые дополнительные резервуары углерода пока не включены в этот рисунок, поскольку их количественная оценка может быть дана только с «низкой степенью достоверности» и поэтому все еще слишком неопределённая.



Рис. 6: Аэрофотоснимки российской тундры в дельте Лены, произведённые с российской научно-исследовательской станции «Самойлов» (на заднем плане). Фотографии были сделаны во время полета по измерению метана с помощью аппарата HELIPOD и вертолёта. Хорошо видны многоугольники ледяных клиньев, которые придают ландшафту характерный рисунок. Фото: Торстен Сакс/GFZ.

Одним из таких, все еще относительно неизвестных «углеродных бассейнов» является подводная вечная мерзлота в мелководных шельфовых морских зонах Арктического океана – также известного как Северный Ледовитый океан. То, что сейчас является морским дном, было поверхностью в разгар последнего ледникового периода 20 000 лет назад. За это время растущая на нем растительность, а также ветер и погода отложили слои почвы с остатками растений и хранящимся в них органическим углеродом. Эта подводная вечная мерзлота в настоящее время медленно тает из-за проникновения морской воды. До сих пор

во многом неясно, сколько органического углерода преобразуется в парниковые газы и сколько остается в отложениях (Meredith et al. 2019).

Когда вечная мерзлота оттаивает в активном слое летом, микробы начинают разлагать органический материал. В процессе образуется углекислый газ (CO_2) и – при отсутствии кислорода - метан (CH_4). До сих пор считалось, что в вечной мерзлоте в отсутствие кислорода может образовываться лишь небольшое количество метана. Однако более поздние исследования показывают, что метана может быть произведено столько же, сколько и CO_2 . Это вызывает особое беспокойство, поскольку метан оказывает парниковый эффект в 25 раз сильнее, чем углекислый газ (CO_2) (Knoblauch et al. 2018).

Вызванное деятельностью человека потепление может ускориться из-за эффекта положительной обратной связи в результате высвобождения метана из тающей арктической вечной мерзлоты. Расчеты предполагают дополнительное повышение средней глобальной температуры до $0,27^\circ\text{C}$ к 2100 г. и до $0,42^\circ\text{C}$ к 2300 г. в будущих сценариях, предусматривающих лишь незначительную или нулевую защиту климата (McGuire et al. 2018).

Метан может производиться не только в результате микробного разложения органических веществ в оттаивающих мерзлотных почвах (микробный метан), но и из природного газа (термогенный метан), который находится под или в слое вечной мерзлоты и высвобождается при оттаивании (Froitzheim et al. 2021).

В 2020 г. в Сибири наблюдалась экстремальная жара. Полуостров Таймыр на севере Сибири был районом с самой большой в мире положительной аномалией приземной температуры для 2020 г. – здесь было на 6°C теплее, чем в среднем за многолетний период 1979-2000 гг.² В результате тепловой волны концентрация метана в атмосфере на севере Сибири также значительно увеличилась с июня 2020 г., как показывает карта концентрации метана PULSE³. Наибольший рост наблюдался в июле-августе 2020 г. и марте-апреле 2021 г. Летом 2020 г. наблюдались две заметные вытянутые области повышенных концентраций метана, примерно параллельные друг другу, длиной в несколько сотен километров и простирающиеся с юго-запада на северо-восток. В начале 2021 г. концентрация метана увеличилась на всей территории (Froitzheim и др. 2021).

В обеих вытянутых полосах в подпочве залегают известняковые отложения. Выше этих так называемых карбонатов слой почвы тонкий или отсутствует, а водно-болотные области встречаются редко. Поэтому высокие концентрации метана, вероятно, не вызваны микробным метаном из почвы или водно-болотных областей. Вместо этого считается, что газовые гидраты (твердые включения газа и воды) в трещинах и карманах карбонатных пород в зоне вечной мерзлоты стали неустойчивыми из-за потепления поверхности. Этот процесс может в ближайшем будущем добавить в атмосферу еще неизвестное количество метана (Froitzheim et al. 2021).

Факторы разрушения вечной мерзлоты

Постоянное потепление климата приводит к повышению температуры в регионах вечной мерзлоты и постепенному оттаиванию мерзлых почв. Однако изменение климата вызывается также такими внезапными явлениями, как пожары, просадка и эрозия из-за оттаивания богатой льдом вечной мерзлоты (термокарст). Хотя эти нарушения являются естественными процессами в арктических и бореальных экосистемах, глобальное потепление изменяет их частоту и масштабы (Meredith et al. 2019).

Многие из этих нарушений уничтожают изолирующий органический слой почвы на поверхности, вызывая разрушение вечной мерзлоты. Чрезвычайным примером являются ежегодные лесные пожары на арктических территориях. В некоторых хорошо изученных регионах установлено, что выжженные площади, частота пожаров и экстремальные годы лесных пожаров сегодня выше, чем в первой половине прошлого века или даже за последние 10 000 лет (Meredith et al. 2019).

В Якутии, например, среднегодовая температура с начала 20 века потеплела на 3°С – на 2°С больше, чем в среднем по миру. Летом 2021 г. в течение многих дней был зафиксирован рекорд жары в 39°С. Хотя трудно напрямую связать отдельные пожары с изменением климата, глобальное потепление делает пожары более вероятными, поскольку более суровые и продолжительные засухи иссушают регионы, создавая идеальные условия для пожаров. А поскольку лето 2021 г., по данным местных властей, стало самым засушливым в Якутии за последние 150 лет, регион превратился в пороховую бочку: лесные пожары уничтожили более 1,5 млн га заболоченных таежных лесов (Гершкович 2021).

В Якутии – регионе с населением почти 1 миллион человек – большую часть работ по тушению лесных пожаров выполняли тысячи изнурённых пожарных и местных добровольцев, которым приходилось работать в условиях ограниченных ресурсов. Ввиду ограниченности сил, приоритетной задачей была защита населенных пунктов. Таким образом, десятки пожаров не были остановлены, и они продолжали бесконтрольно гореть.

По данным Российского агентства лесного хозяйства, с начала года (2021) по всей стране выгорело более 11,5 миллионов гектаров – намного больше среднегодового показателя в 8,9 миллионов гектаров с 2000 г. От Сибири до Урала и региона Карелии на северо-западе страны Россия пережила «нетипичные пожары» в этом сезоне. По-видимому, эти последствия связаны с изменением климата (Гершкович 2021).

Пожары не только выбрасывают в атмосферу большое количество углерода, но и разрушают саму экосистему, которая могла бы повторно поглощать выбросы. Они также способствуют тому, что уже оттаявшая вечная мерзлота в

Якутии теперь оттаивает в еще большей степени. Это приводит к выбросу еще большего количества углерода в атмосферу и тем самым ускоряет изменение климата.

Дальнейшее резкое разрушение вечной мерзлоты происходит при взаимодействии нескольких факторов. Таяние грунтового льда, например, вызывает опущение поверхности земли на большой площади. Пожары также могут сделать почву более восприимчивой к эрозии. Если экстремальные осадки приводят к накоплению стоячей или текущей воды во впадинах, почвы вечной мерзлоты могут оттаивать и в конечном итоге разрушаться гораздо глубже и быстрее, чем это было бы вызвано только повышением температуры воздуха. Поскольку изменение климата увеличивает частоту как пожаров, так и экстремальных погодных условий, резкие эрозионные явления, вероятно, будут происходить чаще (рис. 7).



Рис. 7: Фотография весеннего прилива Лены у сибирского острова Самойлова на вечной мерзлоте. Каждую весну река переносит толстые льдины в сторону Северного Ледовитого океана. Фото: Торстен Сакс.

Изменения в экосистеме

Экосистема полярных регионов была приспособлена к экстремальным погодным и климатическим условиям в течение тысяч лет. Однако они находятся в определенном температурном коридоре. Ожидается, что быстрые темпы изменения климата окажут глубокое воздействие на растения бореальных лесов на всех иерархических уровнях: от лесных зон до экосистем и видов и популяций

внутри видов. Основными зональными типами растительности, выделенными геоботаниками на равнинах Центральной Сибири, являются:

- (1) тундра;
- (2) лесотундра;
- (3) темнохвойная (сосна сибирская кедровая – *Pinus sibirica*, ель сибирская – *Picea obovata* и пихта сибирская – *Abies sibirica*) тайга (подразделяется на северную, центральную, южную) на плоскогорьях;
- (4) светлохвойная (лиственница сибирская – *Larix sibirica*, лиственница даурская – *Larix gmelinii* и сосна обыкновенная – *Pinus sylvestris*) тайга (северная, центральная, южная);
- (5) березовая (береза повислая – *Betula pendula* и береза болотная – *Betula pubescens*) и светлохвойная (лиственница сибирская – *Larix sibirica* и сосна обыкновенная – *Pinus sylvestris*) субтайга;
- (6) березовая (склоновая береза – *Betula pendula* и пушистая береза – *Betula pubescens*) и светлохвойная (сибирская лиственница – *Larix sibirica* и сосна обыкновенная – *Pinus sylvestris*) лесостепь; и
- (7) степь.

В современном климате Сибири на 65 % территории простирается тайга, 75 % которой занимает светлохвойная тайга, где доминирующими видами являются сибирская и даурская лиственницы. В более теплом климате на юге или на песчаных почвах в центральной и даже северной тайге в этих лесах может преобладать обыкновенная сосна. Темнохвойная тайга (25 %) встречается в теплом и влажном климате, например, на Западно-Сибирской равнине к западу от Енисея, вдоль Енисейского кряжа в средних широтах и на горном юге Сибири. В высоких широтах гор Путорана (севернее полярного круга) только лиственничная тайга может выдержать холодный климат и вечную мерзлоту (Tshebakova 2010).

Таяние вечной мерзлоты и увеличение глубины оттаивания имеют далеко идущие последствия для экосистемы. Важным следствием этих процессов является образование термокарста. Это просадки и обвалы грунта, которые заболачиваются и заполняются водой (рис. 8). Например, спутниковые данные показывают, что в сопредельной зоне вечной мерзлоты Сибири площадь, занятая озерами, за последние 30 лет уже увеличилась на 12 %. Напротив, там, где вечная мерзлота полностью оттаяла на всю глубину, вода просачивается, а количество и площадь озер уменьшаются. Здесь могут поселиться новые растительные сообщества, поэтому кустарниковая растительность и леса с юга смещают свои границы на север по мере повышения температуры. Растительность, распространяющаяся на север, обычно более обильная и поэтому может поглощать больше углекислого газа из атмосферы и связывать его в собственной биомассе. Однако этот эффект, замедляющий изменение климата, снижается из-за

более низкой способности кустарников и лесов к обратному рассеиванию солнечного света (альбедо), более чем компенсируется тундровыми территориями. Т.к. лесные районы, которые темнее тундровых, поглощают больше солнечной радиации и поэтому сильнее прогреваются (Maribus 2019).



Рис. 8: Термокарстовые озера на Аляске. Фото: Йозефина Ленц/AWI.

Изменение климата оказывает серьезное влияние на лиственничные леса Сибири. В отличие от сосны и лиственницы, даурская лиственница (*Larix gmelinii*) является мелкокорневищным растением, для роста которого летом достаточно глубины оттаивания всего 20-30 сантиметров. Неглубокий, плотный корневой ковер образует эффективный защитный слой для нижележащей вечной мерзлой почвы. В регионах, где были вырублены лиственничные леса, вечная мерзлота тает гораздо быстрее, чем в лесных районах (Maribus 2019). Там, где тает снег и оттаивает вечная мерзлота, скапливается талая вода, поскольку она не может просочиться из-за замерзшего грунта. Поэтому слой оттепели содержит много воды и очень подвижен. Это может привести к масштабным оползням и, соответственно, к эрозии (Maribus 2019).

В целом, глобальное потепление приведет к крупномасштабному смещению растительных зон к полюсам по всей планете (рис. 9). Согласно модельным прогнозам, к 2090 г. сибирская тайга может сократиться до половины своей нынешней площади, в то время как степная и полупустынная растительность

расширится и утроит свою площадь с примерно 20% сегодня до 60%. Более теплый климат будет благоприятствовать таким видам деревьев, как сосна обыкновенная и лиственница сибирская, в то время как такие виды, как даурская лиственница, будут испытывать все большую нагрузку. Будущий климат также может быть подходящим для лиственных пород деревьев умеренного пояса, которые сегодня в Сибири не встречаются. Пожары и оттаивание вечной мерзлоты будут способствовать дальнейшему изменению растительности. Масштабы прогнозируемого воздействия настолько велики, что для поддержания видимого равновесия между распределением растений и климатом требуется помощь человека в миграции растений (Tchebakova 2010).

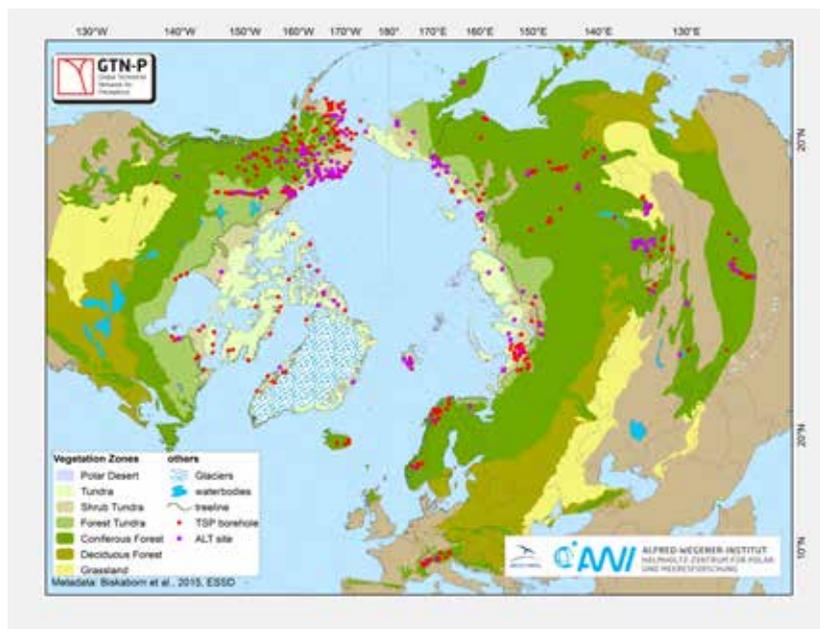


Рис. 9: На этой карте показаны скважины для измерения температуры (теплового состояния вечной мерзлоты, TSP) и толщины активного слоя (ALT) в базе данных GTN-P в сравнении с приполярными зонами растительности в Арктике (Источник: Глобальная наземная сеть по вечной мерзлоте, GTN-P.), <https://gtnp.arcticportal.org/resources/maps/12-resources/39-other-maps>.

Береговая эрозия

Побережья вечной мерзлоты в Арктике составляют более 30% береговых линий Земли и формируют границу между Северным Ледовитым океаном и сушей, затронутой вечной мерзлотой (Jones et al. 2020). Изменение климата

вызывает множество изменений, которые способствуют усилению береговой эрозии. К ним относятся снижение площади морского льда, повышение температуры воздуха и поверхности моря, абсолютное и относительное повышение уровня моря, потепление вечной мерзлоты, опущение мерзлотных ландшафтов и увеличение штормов и высоты волн. Береговая эрозия имеет значительные последствия для людей и экосистем: она изменяет береговую линию, уничтожает растительность и инфраструктуру местного населения. Области консолидированных осадочных отложений (включая пески и глины), которые составляют около 65% побережья арктической вечной мерзлоты, считаются особенно подверженными эрозии. Остальные 35% состоят из скального материала, который является более стабильным (Jones et al. 2020).

Особенно от береговой эрозии страдает Восточная Сибирь. С каждым градусом повышения температуры потеря суши, уходящей под море, ускоряется примерно на 1,2 м в год (рис. 10). Если раньше толстый слой морского льда защищал мерзлую почву почти круглый год, то в этой части Арктики он в летние месяцы отступает все дальше и дальше. Количество летних дней, когда морской лед в южной части моря Лаптевых полностью исчезает, неуклонно растет. Поэтому волны могут подрезать и размывать берега и скалы (Jones et al. 2020).

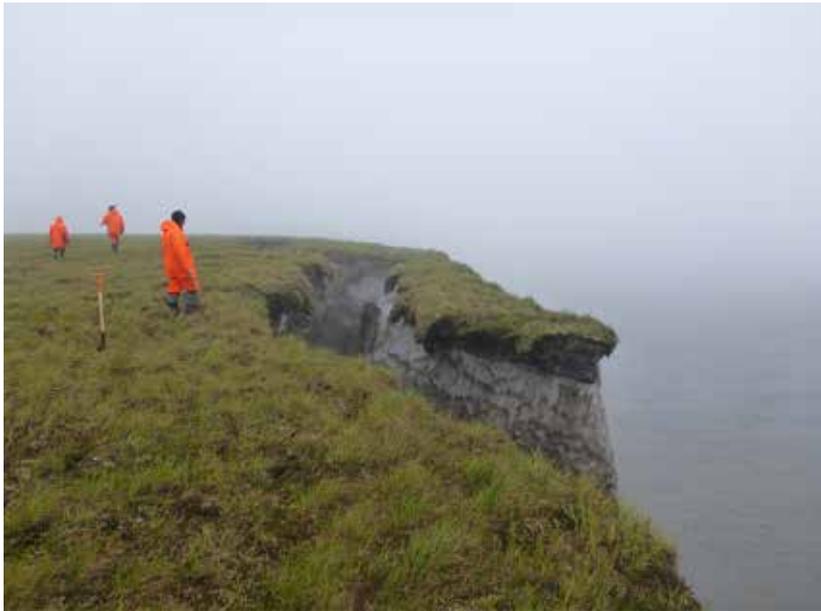


Рис. 10: Вид с верхнего края скалы Собо-Сисе на реке Лена с разрушающимся блоком вечной мерзлоты. Фото: Гвидо Гроссе/AWI.

В результате под угрозой исчезновения оказались целые острова, например, небольшой остров Муостах к востоку от дельты Лены. На его северной оконечности скорость эрозии колеблется от 10 до 20 м в год, поэтому всего за 60 лет (с 1950 по 2010 гг.) он уже потерял четверть своей площади. Кроме того, поверхность острова разрушается из-за оттаивания грунта, который здесь на 80 % состоит из льда. Всего за сто лет Муостах может распасться на несколько частей или полностью исчезнуть.

Влияние изменений на инфраструктуру

Оттаивание грунтового льда в регионах с богатой льдом вечной мерзлотой имеет заметно ощутимые последствия для арктических ландшафтов и населенных пунктов, поскольку таяние неравномерно распределенного в грунте льда также приводит к неравномерному оседанию поверхности земли, повреждая здания, дороги, железные дороги и трубопроводы (рис. 11).



Рис. 11: Таяние вечной мерзлоты также имеет далеко идущие последствия для городов и инфраструктуры, даже в городе Якутске, столице республики Саха. Фото: Рената Треффайзен/AWI.

Около половины населения Арктики и субарктических районов мира проживает в России, территория которой примерно на 66 % состоит из регионов вечной мерзлоты. Если оттаивание грунта продолжится, Российская Федерация столкнется со значительными экономическими и социальными рисками нанесения ущерба городам, муниципалитетам и наземным инфраструктурам, таким

как дороги, железные дороги и трубопроводы (Maribus 2019). Российское государство может понести расходы на ремонт и техническое обслуживание до 85 млрд долларов США, если глобальное потепление не прекратится до конца века («наихудший сценарий»).

Из-за сильного собственного тепла и вертикальных деформационных сил трубопроводные системы для транспортировки тепла, воды, нефти и природного газа на вечной мерзлоте могут быть построены только над землей, даже на большие расстояния. Только в России существует разветвленная сеть нефти – и газопроводов протяженностью более 71 000 км, и планируется построить еще больше. Деформации труб вследствие восходящих и нисходящих процессов замерзания, таяния подземного льда, заболачивания или термокарста могут иметь катастрофические последствия, например, когда утечки нефти постоянно загрязняют большие участки земли и чувствительные экосистемы (Opal und Ulrich 2015).

Будущее развитие вечной мерзлоты

В последние десятилетия в результате изменения климата потеплела не только атмосфера. Температура верхних слоев вечной мерзлоты в некоторых районах также повысилась примерно на 2°С. В результате граница между сплошной и прерывистой вечной мерзлотой сместилась дальше на север к полюсу. Тот факт, что вечная мерзлота действительно оттаивает и разрушается во многих местах, доказан, в частности, измерениями в скважинах, опубликованными в глобальной базе данных вечной мерзлоты GTN-P (gtnp.org).

Несмотря на многие неопределенности, климатические модели предсказывают, что приповерхностная вечная мерзлота значительно уменьшится при будущих сценариях глобального потепления. Это создает риск того, что в атмосферу будет выброшено еще больше углекислого газа (CO₂) и метана (CH₄), что еще больше ускорит изменение климата. Текущая проблема заключается в том, что большинство климатических моделей не учитывает эту динамику углерода вечной мерзлоты. Как долго вечная мерзлота будет оставаться стабильной, зависит не только от температуры грунта, но и от энергетического баланса на поверхности, теплоемкости и теплопроводности почвы, растительности, снежного покрова и наличия озер и рек, а также грунтовых вод в окрестностях. Все эти факторы должны быть учтены в дальнейших и более точных прогнозах.

В своем специальном докладе «1,5 градуса» Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) пришла к выводу, что при глобальном потеплении на 1,5°С площадь регионов вечной мерзлоты сократится на 21-37% по сравнению с сегодняшним днем. При потеплении до 3°С можно предположить, что они оттают в еще большей степени (Maribus 2019).

В дальнейших публикациях МГЭИК от 2021 г. (Masson-Delmotte et al. 2021) также говорится, что в условиях будущего растущего потепления сценарий с высоким уровнем выбросов парниковых газов приведет к потере углерода вечной мерзлоты в объеме от 10 до 100 гигатонн к 2100 г. При сценариях снижения выбросов МГЭИК оценивает высвобождение CO_2 из почв вечной мерзлоты к 2100 г. в 20-58 гигатонн углерода по оптимистическому сценарию и 28-92 гигатонн углерода по умеренному сценарию.

Таяние земной вечной мерзлоты в более теплом мире почти наверняка приведет к высвобождению углерода. Однако уверенность в сроках, величине и линейности обратной связи между вечной мерзлотой и климатом невелика из-за широкого диапазона опубликованных оценок и недостаточного знания, и представления о движущих силах и взаимосвязях в моделях. По результатам моделирования можно предположить, что выделение CO_2 из вечной мерзлоты к 2100 г. составит 18 (3,1-41) гигатонн углерода на 1°C , хотя относительный урон от CO_2 и CH_4 пока точно не известен. Ожидается, что дальнейшее потепление приведет к усилению таяния вечной мерзлоты и потере сезонного снежного покрова, материкового льда и арктического морского льда.

В целом, основываясь на высокой степени соответствия между климатическим моделированием (СМIP6) последнего Всемирного доклада о климате (IPCC 2021) и прогнозами более старых моделей, пониманием основных процессов и палеоклиматическими данными, можно практически с уверенностью сказать, что по мере глобального потепления протяженность и объем вечной мерзлоты будут сокращаться. Если не сократить выбросы парниковых газов, площадь вечной мерзлоты может сократиться на 25 % к 2080 г. (Masson-Delmotte et al. 2021: 2158). Это приведет к серьезным изменениям во всей экосистеме с радикальными последствиями для экологических условий жизни людей и животных.

Благодарность

Авторы выражают благодарность Леонхарду Гюнтеру (стажер) и Нильсу Эренбергу (научный журналист) за их исследования и поддержку в написании окончательного текста.

Литература

- Climate Reanalyzer*. Climate Change Institute, University of Maine, USA. <https://climatereanalyzer.org/about/>
- Desyatkin, R., Fedorov, A., Desyatkin, A., and P. Konstantinov 2015. Air Temperature Changes and Their Impact on Permafrost Ecosystems in Eastern Siberia. *Thermal Science* 19 (Suppl. 2): 351–360. <https://doi.org/10.2298/TSCI150320102D>
- Froitzheim, N., Majka, J., and D. Zastrozhnov 2021. Methane Release from Carbonate Rock Formations in the Siberian Permafrost Area During and After the 2020 Heat Wave. *Proceedings of the National Academy of Sciences* Aug 2021, 118 (32) e2107632118; DOI: 10.1073/pnas.2107632118
- Gershkovich, E. 2021. Siberia Feels the Brunt of Climate Change as Wildfires Rage. *The Moscow Times*, Article updated on Sep. 7, 2021. <https://www.themoscowtimes.com/2021/08/05/siberia-feels-the-brunt-of-climate-change-as-wildfires-rage-a74704> (Дата обращения: 8.11.2021).
- Hubberten, H. W., Wagner, D., Pfeiffer, E. M., Boike, J., Gukov, A. Y. 2006. The Russian-German Research Station Samoylov, Lena Delta – A Key Site for Polar Research in the Siberian Arctic. *Polarforschung* 73 (2–3): 111–116. Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung und Deutsche Gesellschaft für Polarforschung, Bremerhaven, Germany.
- Jones, B. M., Irrgang, A. M., Farquharson, A. M., Lantuit, H., Whalen, D., Ogorodov, S., Grigoriev, M., Tweedie, C., Gibbs, A. E., Strzelecki, M. C., Baranskaya, A., Belova, N., Sinitsyn, A., Kroon, A., Maslakov, A., Vieira, G., Grosse, G., Overduin, P., Nitze, I., Maio, C., Overbeck, J., Bendixen, M., Zagorski, P., and V. Romanovsky 2020. *Coastal Permafrost Erosion*. National Oceanic and Atmospheric Administration. United States Department of Commerce. <https://doi.org/10.25923/e47w-dw52>
- Knoblauch, C., Beer, C., Liebner, S., Grigoriev, M. N., and Pfeiffer, E. M. 2018. Methane Production as Key to the Greenhouse Gas Budget of Thawing Permafrost. *Natural Climate Change* 8: 309–312. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0095-z>
- McGuire, A. D., Lawrence, D. M., Koven, C., Klein, J. S., Burke, E., Chen, G., Jafarov, E., MacDougall, A. H., Marchenko, S., Nicolsky, D., Peng, S., Rinke, A., Ciais, P., Gouttevin, I., Hayes, D. J., Ji, D., Krinner, G., Moore, J. C., Romanovsky, V., Schädel, C., Schaefer, K., Schuur, E. A. G., and Q. Zhuang 2018. Dependence of the Evolution of Carbon Dynamics in the Northern Permafrost Region on the Trajectory of Climate Change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Apr 2018, 115 (15): 3882–3887. <https://doi.org/10.1073/pnas.171990311>
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., and Zhou,

- B. 2021. Summary for Policymakers. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (in press). https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf.
- Maribus gGmbH (ed.) 2019. Arktis und Antarktis – extrem, klimarelevant, gefährdet. *World Ocean Review* (6).
- Meredith, M., Sommerkorn, M., Cassotta, S., Derksen, C., Ekaykin, A., Hollowed, A., Kofinas, G., Mackintosh, A., Melbourne-Thomas, J., Muelbert, M. M. C., Ottersen, G., Pritchard, H., and Schuur, E. A. G. 2019. *Polar Regions*. In *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. International Panel on Climate Change. Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegria, A., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B., and N.M. Weyer (eds.), 202–319. (in press).
- Murton, J. B. 2021. Chapter 14 – Permafrost and Climate Change. In *Climate Change: Observed Impacts on Planet Earth* (Third Edition). Trevor M. Letcher (ed.), 281–326. Amsterdam: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821575-3.00014-1> (Дата обращения: 8.11.2021).
- Nelson, F. E. 2003. (Un)frozen in Time. *Nature* 299: 1673. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1081111>
- Pidwirny, M. 2006. “Periglacial Processes and Landforms”. *Fundamentals of Physical Geography*, 2nd Edition. <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/10ag.html> (Дата обращения: 8.11.2021)
- Opel, T., and A. Ulrich 2015. Permafrostdegradation in Sibirien – Sozio-ökonomische Aspekte. In *Warnsignal Klima: Das Eis der Erde*. Lozán, J. L., H. Grassl, D. Kasang, D. Notz und H. Escher-Vetter (Hrsg.), 262–270. www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. <https://doi.org/10.2312/warnsignal.klima.eis-der-erde.40> (Дата обращения: 8.11.2021).
- Puls-GHGSat. *Methan-Konzentration*. <https://pulse.ghgsat.com/> (Дата обращения: 8.11.2021)
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., and Miller, H. L. 2007. IPCC, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Schuur, E. A. G., Abbott, B. W., Bowden, W. B., Brovkin, V., Camill, P., Canadell, J. P., Chanton J. P., Chapin III, F. S., Chrsitensen, T. R., Ciais P., Crosby B. T., Czimeczik C. I., Grosse, G., Harden J., Hayes D. J., Hugelius, G., Jastrow, J. D., Jones, J. B., Kleinen, T., Koven, C. D., Krinner G., Kuhry P., Lawrence, D. M., McGuire A. D., Natali S. M., O’ Donnell, J. A., Ping C. L., Riley W. J., Rinke, A., Romanovsky, V. E., Sannel, A. B. K., Schädel C., Schaefer K., Sky J., Subin,

- Z. M., Tarnocai, C., Turetsky M. R., Waldrop M. P., Walter Anthony, K. M., Wickland K. P., Wilson C. J., and S.A. Zimov, 2013. Expert Assessment of Vulnerability of Permafrost Carbon to Climate Change. *Climatic Change* 119: 359–374. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0730-7>
- Schuur, T. 2019. Permafrost and the Global Carbon Cycle. In *Arctic Report Card*. J. Richter-Menge, M. L. Druckenmiller, and M. Jeffries (eds.). <https://arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2019/ArtMID/7916/ArticleID/844/Permafrost-and-the-Global-Carbon-Cycle> (Дата обращения: 8.11.2021).
- Tchebakova, N. M., Rehfeldt, G. E., & Parfenova, E. I. 2010. From Vegetation Zones to Climates: Effects of Climate Warming on Siberian Ecosystems. In *Permafrost Ecosystems: Siberian Larch Forests*. Osawa, A., Zyryanova, O. A., Matsuura, Y., Kajimoto, T., Wein, R. W. (eds.). *Ecological Studies* (209): 427–446. <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/36298> (Дата обращения: 8.11.2021).

