

Ученые пробурили метр вечной мерзлоты и вынули керн промерзшей почвы на опытном участке Эйт-Майл-Лейк около Хили на Аляске в сентябре. Темный цвет и структура говорят, что почва насыщена органическим веществом, которое может при разложении выделить парниковые газы.





ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА

ПРОГНОЗ ДЛЯ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ



Таяние, происходящее за Северным полярным кругом, может ускорить изменение климата. Вопрос в том, насколько сильно

Тед Шур

ОБ АВТОРЕ

Тед Шур (Ted Schuur) — эколог, специалист по экосистемам, преподает в Университете Северной Аризоны, почти 20 лет руководит полевыми исследованиями в Арктике, ведущий специалист *Permafrost Carbon Network*, международного объединения ученых, которые обобщают данные последних исследований вечной мерзлоты и климата.



Плотный 20-килограммовый ком затвердевшего снега и льда выскользнул из моих рук и упал обратно в длинную канаву, которую я рыл в глубоком снегу. Я выпрямился, чтобы перевести дыхание и разогнуть ноющую поясницу, стянутую атлетическим поясом. В этот ясный морозный денек в сердце Аляски пять ученых и я выкапывали тонны снега вдоль четвертого из шести снегозащитных заграждений, установленных на пологом холме в тундре, и вывозили снег на санях. Наш труд был частью эксперимента по моделированию потепления, направленного на выяснение, как изменения климата могут повлиять на судьбу этого отдаленного уголка у самой границы с национальным парком Денали.

Было начало апреля, мы уже больше недели убирали слежавшийся снег, что накопился вдоль заграждений, которые мы устанавливали каждую осень в этом месте. Каждый из заборов был около 1,5 м в высоту и 8 м в длину. Избыток снега здесь, подобно одеялу, охраняет землю от студеного зимнего воздуха, утепляя поверхность многолетней мерзлоты, то есть слоя почвы, что обычно остается

промерзшим круглый год. Мы удаляем лишний снег, чтобы весна работала на наших экспериментальных участках так же, как и на окружающих просторах тундры, и чтобы никакая дополнительная талая вода не просочилась и не изменила почву в отличие от всей местности.

Укутывая и утепляя промерзшую почву зимой, мы наблюдаем летом ее более быстрое и интенсивное оттаивание. Такая реакция нам как раз и нужна для наблюдений за явлениями, происходящими во время поднятия температуры в арктической зоне и бореальных экосистемах к югу от Северного полярного круга, которое происходит в два раза быстрее, чем увеличение средней температуры в мире. В состав вечной мерзлоты входят камень, замерзшая почва и лед, поэтому, когда теплеет, она размораживается, а не тает. Подобно бутерброду, вынутому из морозильной камеры, она размягчается, а не растекается. Когда вечная мерзлота оттаивает, ранее замерзшие микробы возобновляют свою деятельность и разлагают останки растений и животных, накопившиеся в мерзлой почве за сотни и тысячи лет, при этом высвобождаются диоксид углерода и метан.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Вечная мерзлота, или почвенный слой, остающийся мерзлым круглый год, протаявает повсюду в Арктике. Микробы расщепляют останки растений и животных в теплеющей почве, высвобождая углекислый газ и метан в атмосферу.
- Зона вечной мерзлоты Северного полушария обширна и содержит 1 450 млрд т органического углерода, что почти в два раза превышает содержание углерода в атмосфере Земли.
- Многочисленные данные измерений точными приборами говорят, что 5–15% этого углерода могут дать утечку в этом столетии. 130–160 млрд т углерода могут попасть в атмосферу и ускорить глобальное потепление. Замедление общего потепления — наилучший способ защиты вечной мерзлоты от подогрева.



Приборы в белых коробах измеряют почвенные поглощение и выделение диоксида углерода на участке близ снежных вершин Аляскинского хребта (1). Меган Тейлор (Meghan Taylor), исследователь из Университета Северной Аризоны, записывает показания (2).

В зоне вечной мерзлоты, что окружает Землю на севере планеты, в почвах содержится так много органического материала, что выход в атмосферу только части его в виде парниковых газов может существенно увеличить скорость глобального потепления. Наш эксперимент на Аляске — это важная часть комплексных научных исследований, проводимых в мире, чтобы выяснить, насколько может быть серьезен результат в ближайшие десятилетия. У нас уже накопилось достаточно знаний, чтобы составить основательный прогноз.

Объемы таяния

Каким образом можно определить, какое количество вечной мерзлоты оттаит и насколько быстро, а также сколь сильно высвобождение углекислого газа усугубит глобальное потепление? По количественным показателям мы смогли бы дать оценку обширным территориям на нашей планете. Зона вечной мерзлоты занимает 16,7 млн км² в Северном полушарии, или почти одну четверть не покрытой льдом суши. Мерзлый грунт может достигать от десятков до сотен метров в толщину. (На большей части Северного полушария в высоких широтах находится океан или материковый ледяной покров, поэтому распространение вечной мерзлоты здесь ограничено).

Хотя благодаря спутникам и аппаратуре для дистанционного зондирования можно точно фиксировать изменения ледниковых щитов, как, например, в Гренландии, но в отношении регионов вечной мерзлоты не создано таких полноценных систем дистанционного наблюдения. Ряд лет ученые проводят мониторинг с помощью наземных приборов, установленных в определенных

местах на вечной мерзлоте, но даже их не хватает для ведения наблюдений в мировых масштабах, и это несмотря на то, что мы неуклонно и повсеместно их добавляем. Глобальная сеть наземных наблюдений за вечной мерзлотой охватывает более 1 тыс. буровых скважин, снабженных приборами, отслеживающими температуру на глубину в несколько метров от поверхности почвы, а также и в более глубоких слоях.

Данные этой сети показывают, что вечная мерзлота непрерывно теплеет на протяжении нескольких последних десятилетий, установив новые рекорды в ряде мест в 2014 и в 2015 гг. Самые разительные потепления произошли в тех местах, где исторически были отмечены самые низкие температуры почвы — от -10° до -50° C. Мы также наблюдали повышение температуры вечной мерзлоты, где она близка к точке промерзания, от -2° до 0° C, там изменение в один градус дает самые ощутимые последствия. В отдельных местах, где вечная мерзлота немного ниже точки замерзания, активный слой — приповерхностный слой почвы, который оттаивает в летнее время и снова промерзает зимой, — становится толще. Сопоставив все измерения, собранные в мире, мы получили достоверную картину изменения температуры почв в Заполярье.

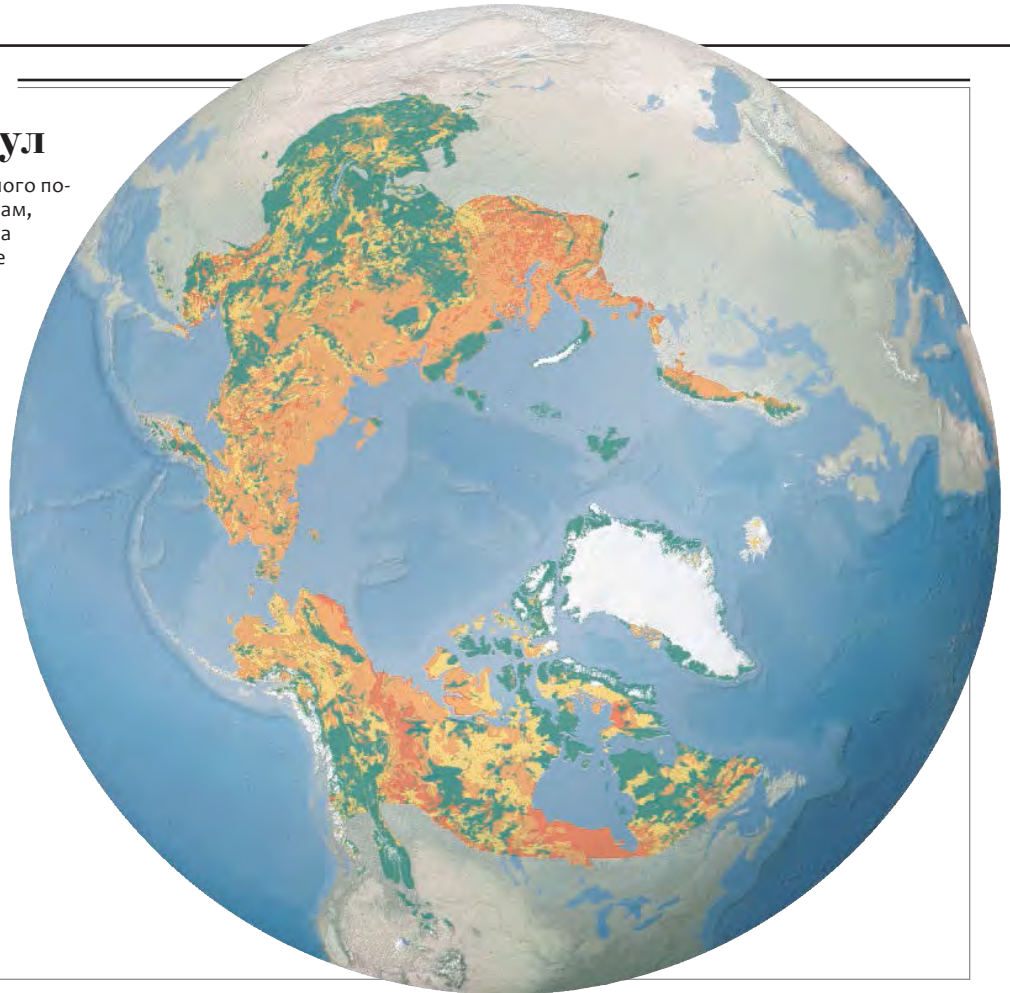
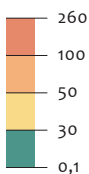
Сколько вечной мерзлоты могло бы оттаять — это только один из вопросов, поставленных нами в качестве задач вычислений. Нам также важно было узнать, сколько органического вещества содержится в оттаявшей почве. Прошлой весной на нашем научно-исследовательском полигоне Эйт-Майл-Лейк наша команда пробурила грунт и вынула полтораметровые керны, как мы делали это в разные годы со времени запуска проекта

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Углеродный пул

Зона вечной мерзлоты Северного полушария (в цвете), по подсчетам, содержит 1035 млрд т углерода в верхнем трехметровом слое мерзлого почвогрунта, в процессе таяния он может выделиться, значительно увеличив глобальное потепление. Вечная мерзлота распространена практически повсюду на Крайнем Севере. Она более прерывиста южнее, но везде во многих местах велико содержание углерода (красный и оранжевый).

Углерод
в трехметровом
почвенном слое
(кг/м² поверхности)



более десяти лет назад. Измерения, проведенные нами и другими специалистами в тундре, показывают, что в верхнем кубометре почвы содержится приблизительно 50 кг органического углерода, связанного в частично разложившихся замороженных организмах (в то время как неорганический углерод входит в состав горных пород, которые мало изменяются под действием температур). Это количество углерода в пять раз превышает его содержание в почвах тундры данного региона за пределами распространения вечной мерзлоты и в 100 раз — в местах произрастания кустарников и другой арктической растительности.

Углерод можно также обнаружить на глубине в десятки метров от поверхности Земли. В целом ученые подсчитали, что залежи органического углерода в вечной мерзлоте Северного полушария составляют от 1330 до 1580 млрд т, что в два раза больше, чем в атмосфере Земли. В трех верхних метрах вечной мерзлоты Северного полушария сосредоточено 50% углерода, содержащегося в верхнем трехметровом слое почвы всей планеты, хотя вся поверхность этой зоны вечной мерзлоты занимает только 15% всего почвенного покрытия Земли.

Кроме того, ученые проводят измерения органического углерода там, где мы их никогда не делали, а именно под водой на очень мелких участках

морского дна вдоль арктического побережья. Вечная мерзлота медленно разлагается под действием просачивания морской воды, и у нас еще нет точных данных о содержании здесь органического углерода. Углерод находится в изобилии также в толщах осадков обширных речных дельт арктической зоны, но мы не проводили там достаточно измерений. Однако мы можем предположить, что около 400 млрд т углерода могут дополнительно храниться в этих разрозненных местах.

Как много и как быстро?

Если учитывать огромные залежи органического углерода в зоне вечной мерзлоты, представляется вполне вероятным, что при таянии может образоваться колоссальный выброс парниковых газов. Количественное определение этого выброса зависит от ответа на три ключевых вопроса.

Во-первых, сколько углерода может быть превращено в парниковые газы? Микроорганизмы могут легко преобразовывать вещества в процессе обмена и освободить некоторое количество углерода, но не все. В результате некая часть его просто останется в земле, поскольку была недоступна или не съедена микробами.

Во-вторых, как быстро деятельность микробов приведет к выделению газов? Быстроразлагаемый

углерод может оказаться в атмосфере менее чем через год после оттаивания, но основная масса скорее всего будет медленно выделяться в течение десятилетий после оттаивания, отчасти потому что он уже находился в полуразложившемся состоянии, а микробы лишь продолжают процесс в дальнейшем.

В-третьих, встает вопрос, какой парниковый газ будет выделяться микробами. В конечном счете смесь двуокиси углерода и метана будет определять эффект потепления климата. Болотные слабкокислые почвы (с анаэробной средой), как, например, в торфяных болотах, обычно продуцируют больше метана, чем углекислого газа, но весовой потенциал глобального потепления за 100 лет у метана в 33 раза выше, чем у диоксида углерода.

Мы отслеживаем выпуск газов на своих опытных участках, таких как Эйт-Майл-Лейк, и прилегающих полях тундры и с помощью инфракрасных газоанализаторов измеряем концентрации газов в воздухе по секундам, дням, временам года и полным годам. В тундровой зоне на Эйт-Майл-Лейк в атмосферу выделяется больше углерода, чем поглощается. Утепление снегом вдоль заграждений помогает более быстрому и пышному росту растений, при этом из воздуха вытягивается и накапливается в почве больше CO_2 . Но в то же время происходит более интенсивное микробное разложение органики в почве. В летний период повышенный рост растений полностью возмещает дополнительный выход углерода из почвы, однако продолжительная деятельность микробов осенью и зимой во время спячки растений сдвигает годовое равновесие к чистым потерям углерода в атмосферу.

При сопоставлении наших результатов с другими, полученными в процессе разных экспериментов, проведенных в мире, мы пришли к заключению, что таяние вечной мерзлоты вносит избыток углерода в атмосферу. Исследователи объединяют свои данные в Сеть по содержанию углерода в вечной мерзлоте (*Permafrost Carbon Network*). Как в притче о слепом, описывающем слона, полевые исследования, ведущиеся в Заполярье, каждое из которых имеет свою уникальную ценность, собранные вместе дают истинное знание о размерах и природе данного явления.

Результаты комплексных научных исследований из этой сети также используются в отчетах, инструктивных совещаниях и в СМИ для оповещения лиц, принимающих решения, и широкой общественности, чтобы можно было найти ответ на глобальные изменения.

В одном из недавних обобщающих проектов был рассмотрен вопрос относительного значения выбросов двуокиси углерода и метана. В аэробных условиях (условиях сухих почв) микробы главным образом выделяют двуокись углерода. Однако в анаэробных условиях заболоченных земель



Контрольно-измерительная установка для круглогодичного определения оборота диоксида углерода и метана в почве и атмосфере показывает, испытывает ли экосистема чистую прибыль или потери газов ежегодно

и торфяных болот происходит выделение как двуокиси углерода, так и метана. Кристина Шедель (Christina Schädel), ассистент профессора Университета Северной Аризоны, работающая в нашей команде и собирающая данные для *Permafrost Carbon Network*, изучает, каким образом этот изменяющийся фактор может в итоге повлиять на климат.

В отличие от наших полевых исследований Шедель проводит опыты в лаборатории, где замороженная почва подогревается в стеклянных камерах и количество и скорость превращения почвенного углерода в двуокись углерода или метан могут быть точно измерены. Она использовала статистические методы обобщения аналогичных опытных данных, собранных по всему миру, и пришла к выводу, что двуокись углерода преобладает по массе среди парниковых газов, исходящих из сходных почвенных образцов, независимо от их происхождения в аэробных или анаэробных условиях. Как ни удивительно, но влияние на климат, оказываемое парниковым газом, образованным при разложении аэробным способом, в два раза сильнее, чем при анаэробном разложении, несмотря на добавочную эффективность метана, который выделяется только во втором случае.

Из этого вытекает вывод, что таяние в условиях вечной мерзлоты в относительно хорошо дренируемых почвах возвышенных территорий может оказать значительно большее влияние на климат, чем такое же по величине таяние заболоченных почв низменных равнин. Хотя метану все еще принадлежит ключевая роль в данном уравновешивании, но в целом распространение возвышенностей и низменностей в Арктике будет существенно определять воздействие на климат таяния вечной мерзлоты.

Ускорение изменения климата

Сопоставляя данные полевых исследований и лабораторных опытов, а затем соединяя их с компьютерными моделями будущего климатического развития, участники *Permafrost Carbon Network* сформировали ответ на главный вопрос: как таяние вечной мерзлоты может повлиять на климат? В соответствии с экспертной оценкой, углеродный пул вечной мерзлоты уменьшится в этом столетии на 5–15%, главным образом за счет освобождения CO_2 .

Мы с большей уверенностью можем говорить о десятипроцентном уменьшении углеродного пула, и это означает, что от 130 до 160 млрд т углерода могут быть прибавлены к загрязнению атмосферы. Если это количество будет поступать преимущественно в виде углекислого газа и с постоянной скоростью до конца столетия, то его можно приравнять к углероду, выпущенному сегодня во всем мире в результате обезлесивания и смены других видов землепользования. Но оно будет значительно меньше, чем привнесенное эмиссией при сжигании ископаемого топлива. Таяние вечной мерзлоты вызовет еще более быстрое изменение климата, чем предполагаемое учеными, когда они исходили из эмиссий, обусловленных только деятельностью человека. Утечка углерода при таянии вечной мерзлоты, вероятнее всего, продолжится более 100 лет. Каждая дополнительная тонна углерода, выделенная в результате таяния в Арктике, ляжет дополнительными платежами на плечи граждан.

Уменьшение таяния вечной мерзлоты какими-то местными сдерживающими мероприятиями по всему Арктическому региону кажется нереальным. Единственным выполнимым решением может быть ограничение эмиссии при использовании горючих полезных ископаемых и вследствие сведения лесов, что повсеместно замедлит потепление. Это в свою очередь уменьшит загрязнение воздуха от таяния в Арктике и даст время всем людям на всех широтах подготовиться к переменам.

Ученые впервые вывели величину в 5–15% только в прошлом году. У нас до сих пор нет полноценной системы наблюдений в области вечной мерзлоты, чтобы сделать более надежные прогнозы. Больше число приборов позволило бы нам точнее определить как медленные, так и быстрые изменения, что могло бы повысить или понизить нашу обеспокоенность. Кроме того, дополнительные измерения могли бы помочь нам выявить неожиданные происходящие важные перемены.

Новые экспериментальные проекты, как, например, проводимый Министерством энергетики США по экосистемам для будущих поколений в Арктике (*Next-Generation Ecosystem Experiments — Arctic*) и проводимый NASA по уязвимости арктических и бореальных систем (*Arctic-Boreal Vulnerability Experiment*), способствуют заполнению важных пробелов при создании моделей и расширению

масштабов конкретных измерений, вроде тех, что мы проводим на участке Эйт-Майл-Лейк, до региональных и, в конечном счете, глобальных.

Особое значение приобретает один интригующий вопрос: смог бы интенсивный рост растительности уравновесить эмиссию углерода вечной мерзлотой? На последних моделях выявилась тенденция, показывающая, что удлинение вегетационного периода, повышение температуры, увеличение доли питательных веществ под действием процессов разложения в почве и естественный сдвиг к более быстрорастущим растительным видам могли бы компенсировать выпуск углерода из вечной мерзлоты в течение настоящего столетия. Однако эта оценка приходит в противоречие с измерениями, сделанными на участке Эйт-Майл-Лейк и в других местах, которые свидетельствуют о круглогодичных чистых потерях углерода.

Более тщательное моделирование просадок грунта при таянии было бы тоже полезным. В настоящее время этот процесс упускается в крупномасштабных моделях взаимодействия углеродного кругооборота в вечной мерзлоте и изменения климата. Поскольку лед, тая в вечной мерзлоте, вымывается, грунт дает просадку, что в дальнейшем вызывает еще более резкое таяние вечной мерзлоты. Могло бы распространение оседания грунта продвинуть прогнозы эмиссии?

Мои коллеги и я наблюдали это явление в Эйт-Майл-Лейк, когда вернулись туда прошлой весной. Дощатые мостки, которые мы построили почти десять лет назад, наряду с регистраторами газовых потоков и другим оборудованием, которое мы установили, все перекрутились и клонились в разные стороны на оседающей поверхности. Ставшая волнообразной площадка была покрыта рытвинами.

К тому же и весеннее таяние на нашем опытном поле в 2016 г. проходило сильнее, чем обычно: на некоторых участках углубления превышали 1 м, в прежние годы такую глубину можно было наблюдать только к концу лета. Необычные показатели свидетельствовали о параллельно присутствующих экстремальных состояниях повсюду в Арктике: не по сезону раннем отступлении зимнего ледяного покрова в Северном Ледовитом океане, раннем снеготаянии во всем Северном полушарии и раннем таянии поверхности ледяного щита Гренландии. Эмиссия углерода из вечной мерзлоты происходит и сегодня. Выделение газов не произойдет в быстром темпе наподобие взрыва, который может резко изменить климат, как опасаются некоторые. На самом деле оно захватит широкие пространства и продлится много десятилетий, серьезно усложняя современное опасное положение. Уже сегодня общество озабочено проблемой замедления глобального потепления. ■

Перевод: В.И. Сидорова