

АНТРОПОГЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ДЫХАНИЯ ПОЧВ (CO_2 , CH_4) В ЕВРОПЕЙСКОЙ АРКТИКЕ И СУБАРКТИКЕ

Карелин Д.В., Горячкин С.В., Долгих А.В., Зазовская Э.П., Люри Д.И., Мergелов Н.С.,
Шишков В.А.

Институт географии РАН (ИГ РАН), Москва, Россия
goryachkin@igras.ru

Введение. В глобальном отношении опасна ситуация, когда наблюдается взаимоусиление действия климатических (влияющих на потепление) и антропогенных факторов по принципу положительной обратной связи с выходом баланса углерода экосистем суши (прежде всего CO_2) в область источника для атмосферы. В то же время остается неясной относительная роль конкретных прямых видов антропогенных воздействий (вспашки, пожаров, выпаса, вытаптывания, транспорта, химического загрязнения и т.д.) в изменениях цикла углерода, что можно оценить уже только в местном масштабе. Нехватка «запаса прочности» экосистем в Арктике по отношению, как климату, так и антропогенным факторам, связана с их функционированием на границе зон толерантности по большинству значимых для них природных факторов, прежде всего таких, как температура и режим увлажнения, в условиях подстилающих многолетнемерзлых пород. Наиболее удобным и быстрым способом интегральной оценки функционального состояния природных экосистем является измерение их CO_2 (и CH_4)-газообмена. В отличие от оценки влияния климата, для выявления антропогенного вклада достаточно краткосрочных измерений С-потоков при разных видах воздействий. На выходе достаточно оценивать почвенную эмиссию т.к. она составляет в этих экосистемах 70-80% их валового дыхания и во многом определяет общий С-баланс. Эта компонента намного легче и быстрее оценивается в полевых условиях, чем продукция, и удобна для мониторинга.

Объекты и методы. В июле-августе 2014 г. были проведены измерения эмиссии диоксида углерода из почв в северной тайге (ключевой участок «Пинежский» $64^\circ 40'$ с.ш.), лесотундре и южной кустарниковой тундре (ключевой участок «Нарьян-Марский» $67^\circ 40'$ с.ш. и «Воркутинский» $67^\circ 20'$ с.ш., зона спорадической и островной мерзлоты), а также в арктической тундре (ключевой участок «Шпицберген» $78^\circ 04'$ с.ш., зона сплошной мерзлоты). Измерения потоков CO_2 на поверхности почвы (грунта) проводились традиционным прямоточным методом закрытых камер с помощью модифицированных портативных газоанализаторов AZ (Тайвань) с точностью 1 ppm [4]. Потоки метана определяли на основе отбора проб на участке «Воркутинский» через известные интервалы в шприцы с последующим анализом на хроматографе в лаборатории Института лесоведения РАН. Дополнительно были проведены измерения потоков почвенной эмиссии CO_2 в осенний период на Воркутинском участке (сентябрь 2014 г.). Поскольку измерения CO_2 в разных точках европейской аркто-бореальной области проводились практически одновременно и по единой методике [3, 4], это позволяет сравнивать абсолютные значения потоков между собой.

В анализ впервые для арктической и северо-бореальной зон РФ удалось включить все основные характерные для этих зон виды антропогенного воздействия (рис.1-3). По группам воздействия эти факторы объединяют (1) разные виды повышенного физического давления на грунт с удалением (или без удаления) растительного покрова, и с удалением (или без) почвы, (2) пожары с антропогенными причинами, (3) добавление органических веществ, прежде всего удобрений. Не включены, из-за отсутствия данных, оказались

только специфические факторы эмиссии, связанные с газо-, нефте- и угледобычей в этих зонах. Отчасти подавляющее действие оказывают различные биологически активные вещества (креозот) и органические отходы в зоне прямого влияния полотна ж/д, однако существенно важнее для С-обмена здесь оказывается замена почвы на гравий.

Результаты. *Различия в эмиссии в результате разных видов антропогенного воздействия.* Проведенные измерения эмиссии диоксида углерода из почв в северной тайге, лесотундре и южной кустарниковой тундре, а также в арктической тундре показали, что местные антропогенные факторы существенно меняют почвенные потоки углерода. В зависимости от конкретной формы землепользования или вида фактора может наблюдаться как увеличение, так и уменьшение эмиссии по сравнению с ее фоновыми уровнями в аналогичных местных экосистемах, незатронутых антропогенной активностью.

Так, увеличение значений почвенного дыхания (от +17 до +124% от среднего фонового) в северной тайге характерно для селитебных (поселенческих) территорий, хорошо удобряемых молодых огородов (возраст освоения менее 20 лет), огородов с возрастом освоения более 100 лет, антропогенных лугов (залежи, функционирующие в режиме некосимых лугов). Снижение значений почвенного дыхания характерно для неудобряемых молодых огородов (возраст освоения менее 20 лет) (-11%) и для лесных вырубок (-87%). В среднем это ведет к увеличению эмиссии в этой зоне одновременно с ростом ее дисперсии (рис. 1).

Для южной тундровой зоны (район Нарьян-Мара) увеличение фоновой почвенной эмиссии CO₂ (+34% (олений выпас - торфяные бугры пучения) до +130% (селитьба) отмечается в селитебных ландшафтах, оленьих выпасах в кустарничково-мохово-лишайниковых тундрах на торфах. В результате оленьего выпаса в кустарничково-мохово-лишайниковых тундрах на суглинках и песках происходит снижение (от -7% (на суглинках) до -61% (на песках) почвенной эмиссии CO₂. Аналогичные результаты получены для участка «Воркутинский» по другим формам воздействий (Рис. 2).

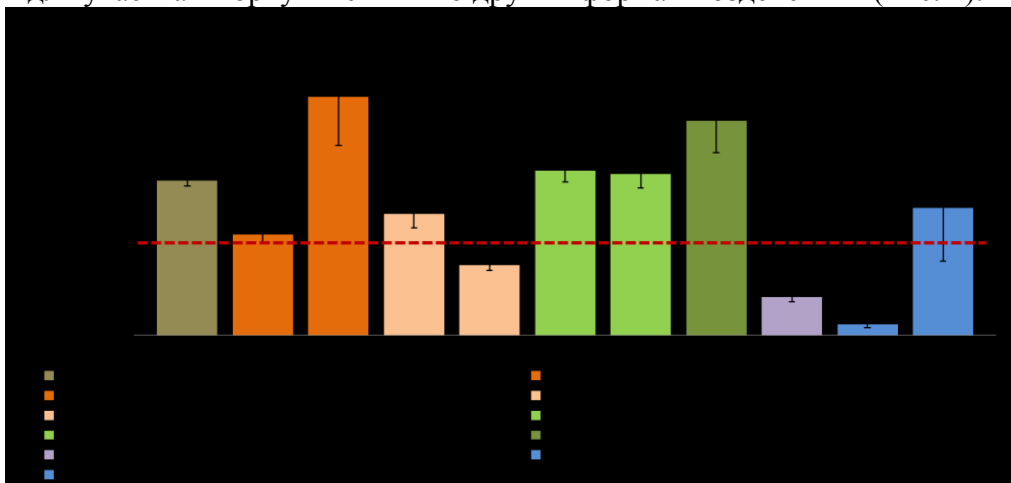


Рис. 1. Почвенная эмиссия диоксида углерода (средние значения и стандартные ошибки). Подзона северной тайги, ключевой участок «Пинежский» (N = 100, июль – август 2014). В качестве фоновое биотопа или контроля (см. пунктирную линию) приведен средний уровень эмиссии в ельнике-долгомошнике со сфагнумом (0.13 гС м⁻² час⁻¹) и сосняке-беломошнике (0.12).

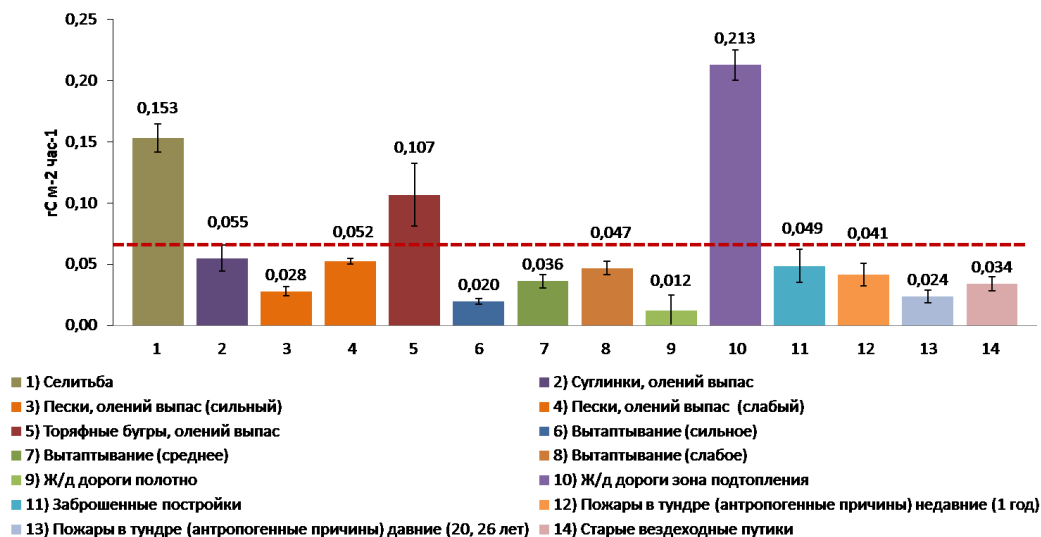


Рис. 2. Почвенная эмиссия диоксида углерода. Тундра, ключевые участки «Нарьян-Марский» (июль-август 2014 г., N = 107) и «Воркутинский» (июль-август 2014 г. N = 109). В качестве фонового биотопа или контроля (см. пунктирную линию) приведен средний уровень эмиссии в трех основных типах южной кустарниково-кустарничковой мохово-лишайниковой тундры (0.063 ± 0.01 гС м⁻² час⁻¹).

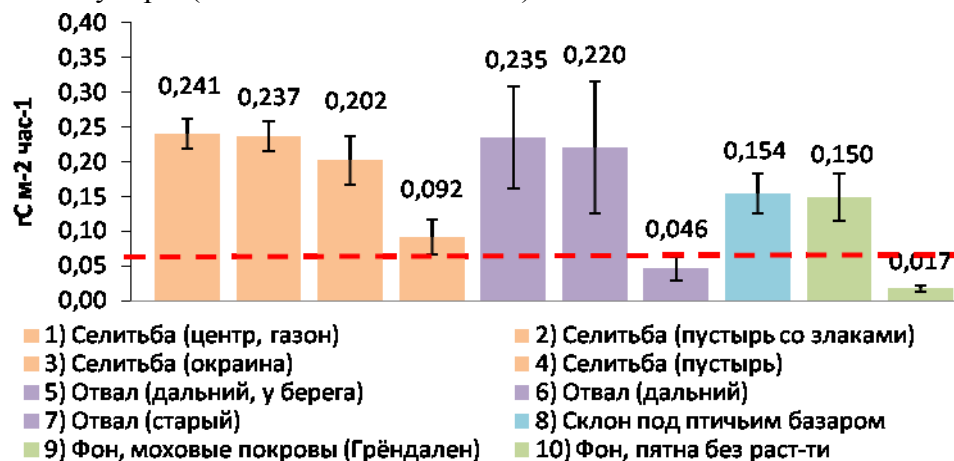


Рис. 3. Эмиссия диоксида углерода (гС м⁻² час⁻¹) из грунтов подзоны арктической тундры, ключевой участок «Шпицберген» (июль-август 2014 г., N = 49). В качестве фонового биотопа или контроля приведены уровни эмиссии в пятнистой арктической тундре. Пунктир – средний уровень фоновой эмиссии.

В подзоне арктической тундры удалось оценить новый вид воздействия - эмиссию с поверхности шахтных отвалов (после добычи угля). Для подзоны арктической тундры (рис. 3) особенность состоит в том, что при, в среднем, столь же низких фоновых потоках эмиссии CO₂ как в южной тундре, под действием конкретных антропогенных факторов почти всегда наблюдается сдвиг в сторону увеличения эмиссии. Несколько неожиданное по этим данным сходство фоновой почвенной эмиссии в южной и арктической тундрах, может объясняться как известной консервативностью почвенной эмиссии вообще, так и удобренностью арктических местных ландшафтов угольной пылью в результате многолетней угледобычи (дополнительный приток биогенов). Так, в арктических тундрах

Таймыра фоновый уровень эмиссии в пятнистой тундре составлял в тот же сезон в среднем $0.02 \text{ гС м}^{-2} \text{ час}^{-1}$ [2]. Естественной причиной может быть и то, что архипелаг находится под обогревающим влиянием Гольфстрима и среднегодовая температура (-8.2°C) здесь не намного ниже, чем в европейской южной тундре (-6°C). Для арктических тундр в среднем характерны температуры -12°C , а для арктических тундр на восточных о-вах Ледовитого океана этот показатель еще ниже: -19°C [3].

В среднем величины антропогенной эмиссии пропорциональны ее природному зональному фону. В северной тайге, где он выше, чем в тундре, антропогенные потоки также, в среднем, выше (рис. 4). При этом, как видно из того же рисунка, антропогенные факторы приводят и к значимому (и сходному в этих зонах) увеличению пространственной дисперсии фоновых потоков. Как в случае северной тайги, так и различных типов тундры, отличия средних величин естественных (фоновых) и антропогенных источников значимы. В случае тундровых ландшафтов степень усиления почвенной эмиссии при равной дисперсии – выше.

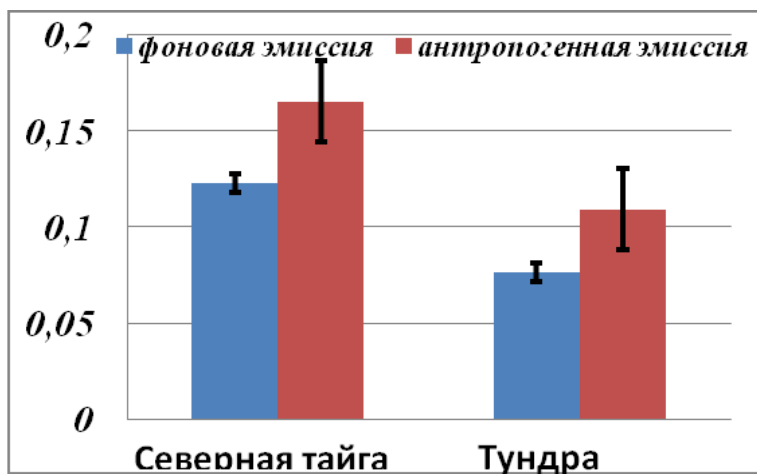


Рис. 4. Сравнение фоновой и антропогенной эмиссии ($\text{гС м}^{-2} \text{ час}^{-1}$) из почво-грунтов северной тайги и тундры в летний период года. Приведены средние и их стандартные ошибки (N меняется от 30 до 154). Различия значимы (t-тест, $P < 0.001$). Включены все рассматриваемые виды антропогенного воздействия. Для тундры данные по южной и арктической подзонам объединены.

Наибольшей эмиссией CO_2 в тундровой зоне (даже по сравнению с самыми активными по этому показателю кустарниковыми мезопонижениями) - выделяются зоны селитьбы в поселках (0.241), угольные отвалы ($0.235 \text{ гС м}^{-2} \text{ час}^{-1}$), а также участки подтопления вдоль, как действующих (0.220), так и заброшенных 60 лет назад железных дорог (0.213). Эти величины достигают максимальных значений эмиссии, которые зафиксированы в северной тайге. Однако абсолютный максимум в тундровой зоне пока фиксировался на участках селитьбы (зона поселка) с органическими отходами (0.428 , Г.Н.Краев, личное сообщение), что значительно выше, чем на активно удобряемых огородах в северной тайге (0.310). При «естественном», орнитогенном удобрении грунтов, под птичьими базарами в тундрах могут достигаться уровни (0.154 ; рис. 3), почти равные среднему уровню эмиссии при селитьбе в этой зоне (0.164). Это максимально известный нам уровень естественной эмиссии.

В случае подтопления причиной высокой эмиссии является цепь прямых положительных следствий: «защита насыпью зимой от ветров - увеличение снежного покрова – утепление и защита надземных частей зимующих растений - прирост запаса фитомассы – усиление дыхания корней и микробиоты в почве – усиление наблюдаемой эмиссии». Это известный «эффект убежища», который всегда отмечается в тундрах разного типа, в понижениях на уровне мезорельефа под более мощным слоем снега, но в данном случае в качестве усилителя эмиссии выступают не депрессии рельефа, а антропогенный фактор формирования мезорельефа. Его можно считать позитивным т.к. усиленная почвенная эмиссия является побочным следствием повышения первичной продукции, в том числе корней, дыхание которых коррелирует с их массой, а дыхание почвенной микробиоты, в свою очередь, зависит от активности корней [3].

Вторая группа антропогенных факторов, приводящих к усилению эмиссии – внесение в почву органических удобрений или отходов (огороды, удобряемые луга, свалки, места звероферм и проч.) является «негативной», т.к. способствует только усилению эмиссии, не сопровождаемой связыванием углерода. Сюда же относится орнитогенное усиление эмиссии.

Часто наблюдаемое подавление фонового уровня эмиссии антропогенными факторами (в 2-12 раз) во всех случаях обязано уничтожению растительного покрова, что обусловлено уже разными конкретными причинами (вырубки (в северной тайге), пожары, формы вытаптывания и воздействия транспорта, выпас (тундра) и проч.). Эта крайне широкая по наблюдаемым формам группа антропогенных воздействий приводит к снижению почвенной эмиссии по двум причинам: в результате снижения первичной продукции (физическое уничтожение растительности), и подавления собственно процесса разложения в почве (ухудшение водно-воздушных условий корневого и микробного дыхания, и почвенной фауны). Это также негативная по своим последствиям группа факторов, которые одновременно способствуют снижению фиксации CO_2 и росту его эмиссии.

Для проведения регрессионного анализа влияния антропогенных факторов на эмиссию, были введены три специальные переменные: общий период действия данного фактора (годы), суммарное чистое время действия фактора (в часах) и время восстановления сообщества после прекращения его действия (годы). Разница между первым и вторым факторам заключается в том, что первый фактор оценивает общую продолжительность периода от начала его действия до момента измерения эмиссии, а второй – суммирует чистое время действия фактора в часах за этот период. Например, общий период действия вытаптывания составляет 20 лет, а сумма чистого времени за эти 20 лет – только 450 часов. Кроме того, ввиду больших качественных различий между факторами не во всех случаях имелась возможность их количественно оценить. Так, пожары разных возрастов не вошли в анализ по первому и второму факторам (это не имеет смысла по отношению к пожарам), но вошли по третьему фактору. Напротив, контрольным биотопам для анализа были присвоены нулевые значения по первому и второму факторам, а по третьему они также не вошли в анализ по смыслу. Поэтому массив для регрессионного анализа оказался меньше, чем общее количество данных по потокам CO_2 . Регрессионный анализ (Таблица) выявил стимулирующее (положительное) влияние на эмиссию суммарного чистого времени антропогенного воздействия, и отрицательное влияние времени, прошедшего после начала их самовосстановления. Это говорит о том, что исследованные антропогенные факторы в целом стимулируют усиление эмиссии, а в ходе восстановления эмиссия снова снижается до исходного уровня.

Таблица. Результаты множественного линейного пошагового регрессионного анализа эмиссии диоксида углерода из антропогенно-измененных почв и грунтов в южной кустарниковой тундре (участок «Воркутинский»). Зависимая переменная - поток CO₂ (гС м⁻² час⁻¹). Независимые переменные в анализе: *T_v* – температура воздуха (°C), *T₁* – температура почвы на глубине 1 см, *T₁₀* – то же на 10 см, *SM* – объемная влажность почвы в слое 0-6 см (%), *ANTOT* - *общий период действия данного фактора (годы)*, *ANREST* – *время восстановления после прекращения действия фактора (годы)*, *ANSUM* – *суммарное чистое время действия фактора (часы)*, *PERM* – текущая глубина сезонного протаивания мерзлоты (см), *PHYTO* – запас надземной фитомассы (абс. сух. масса, г м⁻²), *MOS* – мощность мохово-лишайникового яруса, см, *SOIL* – мощность органогенного горизонта, см, *DENS* – объемная плотность почвы (грунта) г см⁻³. Все модели значимы при *P* < 0.001 (расчеты проводились в SPSS 15).

Период оценки	Модель в целом (в скобках – уровни значимости коэффициентов)	Стандартизованные коэффициенты значимых переменных	Отброшенные в ходе пошагового анализа переменные	<i>R</i> ²	<i>N</i>
Июль-август	$8.89 \cdot 10^{-8} \cdot \text{ANSUM} (<0.001) - 0.001 \cdot \text{ANREST} (0.001) + 0.00038 \cdot \text{PERM} (<0.001) + 0.0046 \cdot \text{TA} (<0.001) + 2.08 \cdot 10^{-5} \cdot \text{PHYTO} (<0.001) + 0.005 \cdot \text{SOIL} (<0.001) - 0.079 (<0.001)$	ANSUM (0.36), ANREST (-0.25), PERM (0.53), TA (0.17), SOIL (0.21), PHYTO (0.38)	T1, T10, ANTOT, DENS, SM, MOS	0.89	61
Данные за июль-август и сентябрь объединены	$1.19 \cdot 10^{-7} \cdot \text{ANSUM} (<0.001) + 0.00028 \cdot \text{PERM} (<0.001) + 0.0031 \cdot \text{TA} (<0.001) + 6.43 \cdot 10^{-6} \cdot \text{PHYTO} (0.007) + 0.008 \cdot \text{SOIL} (<0.001) - 0.058 (<0.001)$	ANSUM (0.47), PERM (0.30), TA (0.22), SOIL (0.34), PHYTO (0.14)	T1, T10, ANTOT, ANREST, DENS, SM, MOS	0.70	138

Нельзя забывать о том, что снижение почвенной эмиссии по сравнению с фоновым уровнем, в любом случае, говорит о нарушении (снижении) нормальной скорости продукции. Даже относительно слабые степени вытаптывания, которые составляют лишь 300-480 человеко-часов за 20 лет, приводят как к снижению запасов фитомассы, так и почвенной эмиссии.

Особую ситуацию представляют собой послепожарные нарушения. Сгорание наземного растительного покрова из медленно восстанавливающихся кустарников, кустарничков и лишайников, приводит к их замене на мхи. В результате снижается термоизоляция грунта и резко возрастает глубина протаивания мерзлоты, что повышает ее текучесть на склонах и появление морозобойных и иных трещин. Сгорание верхнего слоя почвы уничтожает также запас биогенов, что снижает способность экосистемы к

самовосстановлению через ограничение продукции. Протаивание мерзлоты активизирует дыхание микробиоты верхнего слоя почвы и включает в этот процесс микробные сообщества из нижележащих слоев. В первые годы после пожара дыхание почвенных микроорганизмов возрастает также за счет разложения корней погибших растений (рис. 5). С другой стороны, мхи не дают развиваться сосудистой растительности. Образуется «блок», долгое время не позволяющий восстановиться прежнему уровню С-баланса даже через 20-30 лет после пожара. Хотя годовой С-баланс при этом становится околонулевым уже через 7-8 лет после пожара [3], территории, пройденные огнем в тундрах, намного чувствительнее к любым (в том числе антропогенным) внешним изменениям.

Сезонные изменения потоков и реконструкция суммарной эмиссии с участка ландшафта южной тундры, включающего все оцениваемые виды антропогенных воздействий. Поскольку при любых оценках суммарной площадной эмиссии важен пространственно-временной масштаб, мы попытались сделать подобную оценку для минимальной площади, которая по нашим независимым оценкам обычно находится в околоравновесном состоянии по годовому С-балансу; такая площадь для европейской южной тундры должна быть не менее 0.5 км² [3]. С другой стороны, участок ландшафта, на котором мы хотим оценить «мгновенную» суммарную эмиссию CO₂, должен охватывать по возможности все местные виды антропогенного воздействия, по которым у нас имеются данные по эмиссии, что необходимо для оценки их относительного вклада. Этим критериям отвечает приведенная на рис. 7 площадь равная 3 км², границы которой включают все необходимые участки. По снимку были рассчитаны площади конкретных видов воздействий и суммарное участие криогенных мезоповышений и мезопонижений нативной тундры.

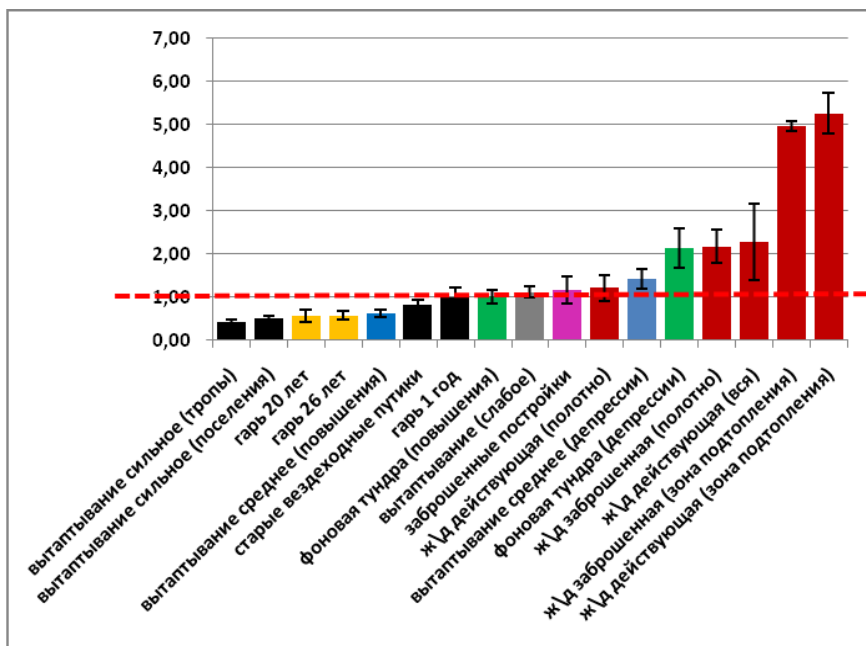


Рис. 5. Эмиссия CO₂ из почв и грунта (гС м⁻² сут⁻¹) в результате разных форм антропогенных воздействий на участке «Воркутинский» в июле-августе 2014 г. Потоки ранжированы по возрастанию. Пунктир – среднеландшафтный уровень эмиссии для контрольной тундры. Приведены средние и их стандартные ошибки.

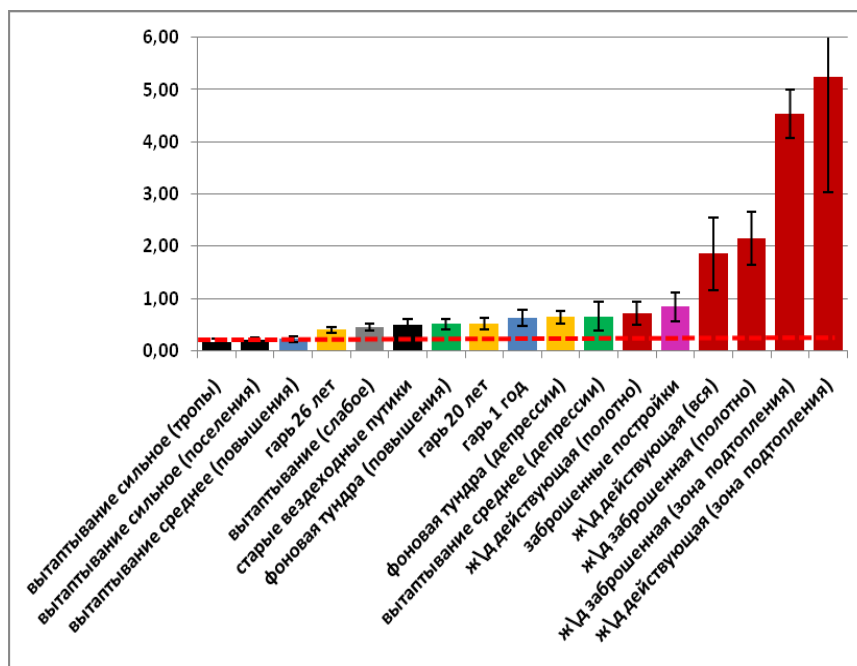


Рис. 6. Эмиссия CO₂ из почв и грунта (гС м⁻² сут⁻¹) в результате разных форм антропогенных воздействий на участке «Воркутинский» в сентябре 2014 г. Потоки ранжированы по возрастанию. Пунктир – среднеландшафтный уровень для контрольной тундры. Приведены средние и их стандартные ошибки.



Рис. 7. Космический снимок (дата снимка 30.07.2013, Google Earth) площади исследований (участок «Воркутинский», 3 км²). Овалы – границы гарей разного возраста. На снимке хорошо видны автоморфные повышения (более светлые) и гидроморфные участки депрессий (более темные) мезоландшафта.

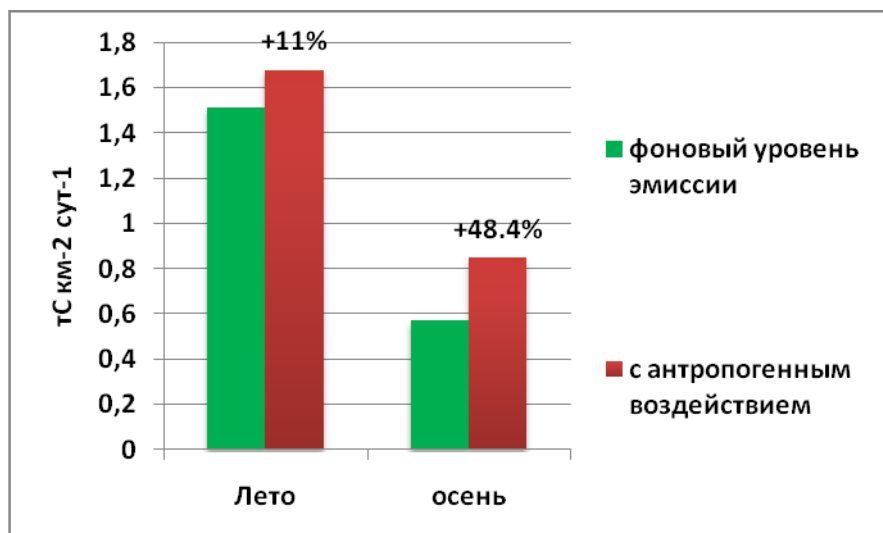


Рис. 8. Расчетная оценка среднего почвенного потока CO_2 с единицы площади для обследованного участка 3 км^2 в кустарниковой южной тундре (окрестности г. Воркута, 2014 г.). Зеленые столбцы – экстраполяция при отсутствии местных антропогенных воздействий; коричневые – с учетом всех воздействий в разные сезоны.

Расчеты показывают (рис. 8), что в результате общего действия местных антропогенных воздействий почвенная эмиссия всего 3 км^2 модельного участка в разгар летнего сезона по сравнению с контролем возрастает на 11%. Причем по мере вхождения тундровых сообществ в зимний сезон, этот относительный вклад быстро нарастает (до 48.4%). Как видно из сравнения рисунков 5 и 6, это связано с почти равным сезонным снижением эмиссии (сезонное падение активности растений и зависимой от них почвенной биоты), как на антропогенных, так и нативных участках тундры, за исключением участков ж/д, где уровень остался, как и прежде, самым высоким. Т.о. наблюдаемый эффект на обследованном 3 км^2 с высокой вероятностью свидетельствует об антропогенном усилении в этих местных ландшафтах зимней (а следовательно и годовой) эмиссии, поскольку в собственно зимний период на фоне общего снижения дыхания основной вклад в эмиссию на данном участке будет вносить зона подтопления ж/д.

Антропогенные изменения потоков метана в южной тундре (участок «Воркутинский», июль-август 2014 г.). Заметим, что мы принимаем стоки и источники этих газов в наземной растительности незначимыми, поэтому их почвенные потоки в данном случае рассматриваются как чистые потоки углерода (net flux).

Одновременные измерения напочвенных потоков метана, второго по значимости после CO_2 углеродсодержащего парникового газа, показали, что фоновые мезодепрессии, которые в норме являются источниками CH_4 для атмосферы ($+0.64 \text{ мгС-CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$), на антропогенно-измененных гидроморфных объектах становятся его более слабыми источниками ($+0.1$: $+0.2$) или слабыми стоками со средним значением $-0.15 \text{ мгС-CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$, тогда как автоморфные мезоповышения, по сравнению с контролем, не меняют знака по балансу метана, оставаясь или его стоками при тех же величинах потоков (-0.22 и -0.16 , тест Колмогорова-Смирнова, отличие незначимо при $P = 0.05$), или даже усиливая сток (-0.4 гС ; гарь 2013 г., полотно старой ж/д) (рис. 9). Лишь в 3-х биотопах из 14 потоки метана значимо не отличались от нуля.

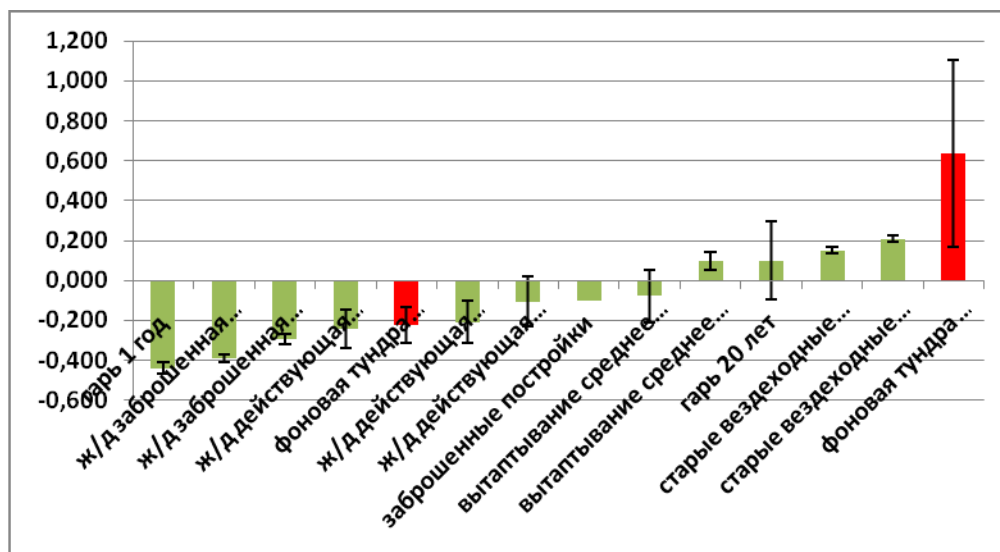


Рис.9. Поток метана CH_4 , оцененные аккумулятивным методом *in situ* за 1-3 часа (хроматограф ин-та Лесоведения РАН) на избранных участках в южной тундре (Воркута, июль 2014 г.). Отрицательные значения обозначают сток, положительные – источник для атмосферы. Приведены средние и их стандартные ошибки. Красным выделены контрольные биотопы.

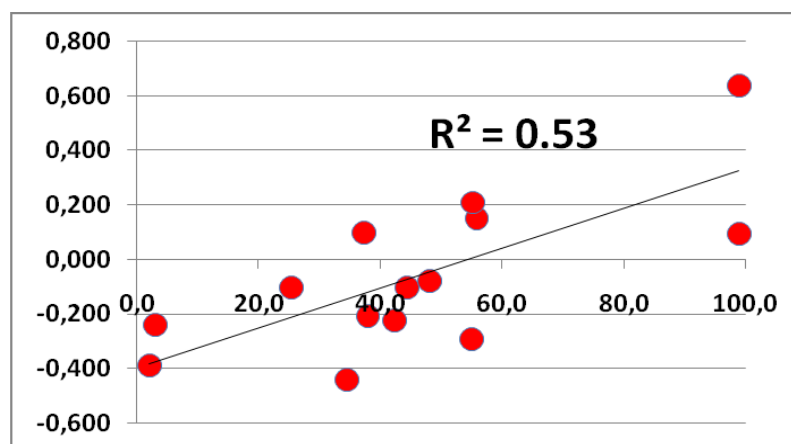


Рис. 10. Связь наблюдаемых почвенных потоков метана с объемной влажностью почвы по всем обследованным биотомам (участок Воркутинский, июль 2014 г.). Отрицательные значения обозначают сток, положительные – источник для атмосферы. Линия и коэффициент детерминации относятся к линейной регрессии.

На потоки метана из почвы антропогенные факторы влияли, главным образом, в зависимости от степени гидроморфности конкретного участка (рис. 10). При этом, на более гидроморфных участках подавлялась эмиссия метана, а на более автоморфных – усиливался сток. В среднем под действием антропогенных факторов наблюдается сдвиг в сторону ослабления эмиссии или усиления стока метана (положительный эффект).

То, что по этим данным в тундре наблюдаются не только источники метана, но и его стоки - не является артефактом. Как показывают измерения метана в заболоченных бореальных биотопах [1], на автоморфных участках болот также наблюдается его преимущественный сток за счет большей активности аэробных метанотрофных бактерий

по сравнению с доминированием анаэробных метаногенных бактерий в обводненной толще торфа. Наличие классической положительной линейной связи между влажностью почвы и потоками метана (рис. 10) - дополнительно подтверждает достоверность полученных данных.

Заключение.

- 1) Впервые для Арктики и Субарктики в их европейской части проведен анализ основных видов прямого антропогенного воздействия на эмиссию парниковых газов. В зависимости от вида и продолжительности антропогенного воздействия, может наблюдаться как увеличение (в 2-4 раза), так и уменьшение почвенной эмиссии (в 2-12 раз) по сравнению с ее фоновыми уровнями в аналогичных местных экосистемах, не затронутых антропогенной активностью. В целом антропогенные факторы приводят к повышению пространственной дисперсии потоков.
- 2) Разные по своему характеру антропогенные факторы могут приводить или к усилению (на более удобренных элементах территории или в мезодепрессиях), или к ослаблению почвенной эмиссии CO_2 (в основном, за счет подавления первичной продукции и, в меньшей степени, собственно почвенного дыхания). Поэтому интегральный ответ конкретного участка территории по эмиссии CO_2 зависит от их комбинации. Кроме того, важен период, за который проводится оценка (оптимально - проводить ее за год). Отсюда – количественное влияние местных антропогенных воздействий на эмиссию CO_2 и других парниковых газов в субарктических ландшафтах зависит, прежде всего, от пространственно-временного масштаба наблюдений, а также относительной площади и характера конкретных видов антропогенных воздействий.
- 3) В качестве наиболее значимых факторов эмиссии CO_2 в антропогенно-измененных ландшафтах выступают в порядке убывания значимости: продолжительность антропогенного воздействия, текущая глубина сезонного протаивания мерзлоты, плотность грунта, температура воздуха, максимальный запас живой надземной фитомассы и мощность органогенного горизонта. За исключением плотности грунта все эти переменные связаны с эмиссией положительно. При этом антропогенные факторы косвенно (с усилением эффекта) влияют и на остальные перечисленные значимые факторы, поэтому безоговорочно должны быть признаны ведущими.
- 4) Антропогенные факторы оказывают влияние на потоки углекислого газа и метана, однако влияние это принципиально разное. Потоки второго по значимости биогенного парникового газа метана в тундре в летне-осенний период, так же как CO_2 , зависит от вида местных антропогенных воздействий. Эти факторы сдвигают обмен в автоморфных элементах рельефа в сторону повышения стока метана, а гидроморфные – в сторону снижения его эмиссии, т.е. действуя на уровне ландшафта в одном направлении. Следовательно эффект местных антропогенных факторов на потоки метана опосредуется через их влияние на дренированность территории.
- 5) Несмотря на позитивное влияние некоторых антропогенных факторов на первичную продукцию (зоны подтопления ж/д, удобренные с/х наделы), а также в среднем снижение почвенной эмиссии по отдельным факторам, - действуя в комплексе, они с высокой вероятностью служат причиной повышения эмиссии CO_2 в местном и региональном масштабе за равновесный по С-балансу период.

Это связано с нарушением баланса продукции и дыхания в сторону последнего. Наиболее значимыми в этом отношении для северной тайги являются рубки, для тундры - выпас. Во всех случаях, в качестве постоянных и мощных источников CO_2 , поддающихся только направленной рекультивации, служат прежние и настоящие территории поселений. Наиболее серьезными пролонгированными деструктивными факторами среди изученных следует считать связанные с уничтожением почвенного слоя. На втором месте – факторы, связанные с уничтожением растительности. Пожары в этом отношении зависят от степени выгорания растительного и почвенного покрова, но в любом случае их влияние на С-баланс в мерзлотных сообществах является также очень пролонгированным. Повышение продукции в зонах подтопления ж/д уравновешено валовым дыханием, а, кроме того, слишком незначительно по удельной площади в аркто-бореальной области (менее 0.001%).

- 6) Роль всего комплекса антропогенных факторов, влияющих на С-баланс и эмиссию CO_2 , с наступлением зимнего сезона в арктических сообществах возрастает, и в осенний период он может не менее чем на ~50% увеличивать нативный уровень эмиссии ландшафта.

Благодарности.

Исследования были выполнены при финансовой поддержке программы Президиума РАН «Поисковые фундаментальные исследования в интересах развития Арктической зоны». Авторы глубоко благодарны директору ин-та Лесоведения РАН д.б.н. А.А. Сирину за проведение анализа проб метана. Неоценимую помощь в сборе материала оказали сотрудники и аспиранты А.В. Почикалов и А. Карпов.

Список литературы

1. М.В. Глаголев. Эмиссия CH_4 болотными почвами Западной Сибири: от почвенного профиля до региона. *Автореф. канд. биол. н. М.*, МГУ, 2010
2. Д.Г. Замолотчиков, Д.В. Карелин, А.И. Иващенко. *Криосфера Земли*. 1997, **1**(4), 79-84.
3. Д.В. Карелин, Д.Г. Замолотчиков. Углеродный обмен в криогенных экосистемах. М., Наука, 2008.
4. Д.В. Карелин, А.В. Почикалов, Д.Г. Замолотчиков, М.Л. Гитарский. *Лесоведение*. 2014, **4**, 56-66.