

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 574.4

НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ПОТОКАМИ CO₂ НА АРХИПЕЛАГЕ ШПИЦБЕРГЕН: ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ ЧЕЛОВЕКОМ МЕНЯЕТ ГАЗОБМЕН АРКТИЧЕСКОЙ ТУНДРЫ

© 2019 г. Д. В. Карелин^{1,2,*}, Э. П. Зазовская¹, В. А. Шишков¹, А. В. Долгих¹, А. А. Сиринов³, Г. Г. Суворов³, А. И. Азовский⁴, Н. И. Осокин¹

¹ Институт географии РАН, Москва, Россия

² Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия

³ Институт лесоведения РАН, с. Успенское (Московская обл.), Россия

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, биологический факультет, Москва, Россия

*e-mail: dkarelin7@gmail.com

Поступила в редакцию 05.12.2018 г.; после доработки 11.04.2019 г.; принята в печать 30.05.2019 г.

Обобщены результаты многолетних наблюдений (2014–2018 гг.) за почвенной эмиссией и нетто-потоками CO₂ в естественных и антропогенно-измененных (АИ) экосистемах зональной арктической тундры на территории архипелага Шпицберген (пос. Баренцбург, 78°04' с.ш., 14°13' в.д.). Установлено, что антропогенные факторы, связанные с местным землепользованием, в период своего активного воздействия могут почти вдвое ($0.111 \pm 0.021 > 0.064 \pm 0.011$ гС м⁻²ч⁻¹) увеличивать эмиссию диоксида углерода из почвы. В тот же период нетто-баланс С на таких участках является положительным (источник для атмосферы). Самовосстанавливающиеся после антропогенного воздействия участки демонстрируют промежуточные между фоновыми и АИ участками величины почвенной эмиссии CO₂, но при этом наибольший по сравнению с ними нетто-сток С во всем диапазоне освещенности. Фоновые экосистемы демонстрируют в разгар периода вегетации равновесное состояние по С-балансу. Наибольший вклад в вариации эмиссии CO₂ из почвы вносят пространственные факторы (объясняют 56–66% дисперсии), тогда как временные факторы объясняют лишь 3.8–5.5%. Среди пространственных факторов наибольшее значение имеет мощность органического горизонта. Межгодовые флуктуации условий, среди которых наиболее важны влажность и температура верхнего (0–6 см) слоя почвы, одинаково влияют на АИ и фоновые экосистемы, поэтому пространственные различия между ними поддерживаются из года в год. Судя по предварительным оценкам, в отличие от диоксида углерода вклад потоков метана и закиси азота не зависит от антропогенного воздействия и является для местных экосистем незначимым.

Ключевые слова: почвенная эмиссия CO₂, нетто-обмен углерода, арктическая тундра, архипелаг Шпицберген, антропогенное преобразование территории.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019556-66>

ВВЕДЕНИЕ

Глобальные изменения концентрации углекислого и других парниковых газов в атмосфере оцениваются инструментально уже более 60 лет [7], однако имеются лишь приблизительные количественные оценки вкладов естественных и антропогенных стоков и источников, которые за этим стоят. При этом вклад местных факторов землепользования в этот процесс — почти неизвестен. Особенно это относится к криогенным (управляемым низкими температурами) наземным экосистемам, к которым принадлежат не только арктические, но и ультра-континенталь-

ные территории. Их биосферная значимость определяется не только тем, что они занимают на планете около 16% суши, но и тем, что они содержат около 50% запасов углерода в почвах [9] и огромные запасы метана в составе газогидратов [10]. Помимо этого, криогенные, и в частности, арктические экосистемы характеризуются нехваткой “запаса прочности”, что связано с их функционированием в условиях почти повсеместного распространения подстилающих многолетне-немерзлых пород на границе зон толерантности по значимым абиотическим факторам, прежде всего таким, как температура и влажность поч-

вы [1]. Из этого следует, что даже небольшие изменения климата или степени антропогенного воздействия могут привести здесь к ощутимым последствиям, которые будут выражаться в повышенной эмиссии парниковых газов в атмосферу. В настоящее время роль антропогенных факторов для криогенных экосистем оценивается как все более сопоставимая с климатическим вкладом за тот же период наблюдений [2,3]. Это связано с тем, что их взаимодействие с климатом основано на устойчивых положительных обратных связях через баланс выбросов и поглощения CO₂, метана и оксидов азота. При этом обычно рассматриваются крупные экосистемы, биомы или биосфера в целом. Однако остается неясным относительное значение для C-баланса конкретных видов антропогенных воздействий, не связанных с промышленными выбросами парниковых газов в результате сжигания ископаемого топлива. В частности, это селитба (промышленные и жилые постройки), антропогенные пожары, выпас и земледелие, разные формы вытаптывания, дороги, давление на грунт транспорта, химические воздействия и пр. Если для оценки климатического эффекта нужны, как правило, длительные ряды наблюдений в ключевых экосистемах, то для выявления антропогенного вклада достаточно сравнительного анализа результатов краткосрочных измерений потоков CO₂ после основных видов воздействий. При этом на выходе в качестве деструкционной компоненты C-баланса можно оценивать почвенную эмиссию, так как она составляет большую часть валового дыхания, хорошо коррелирует с величиной первичной продукции и легко оценивается в полевых условиях. В качестве оценки первичной продукции на этих участках можно дополнительно использовать наблюдаемые запасы живой надземной фитомассы, что также сравнительно легко косвенно оценивается по проективному покрытию [1].

Среди зональных экосистем такого рода данные по арктической тундре в литературе наиболее редки [2]. В предлагаемом исследовании обобщены данные многолетних наблюдений за эмиссией углекислого газа из почвы, а также ряд релевантных данных в подзоне арктической тундры на территории архипелага Шпицберген.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Полевые работы проводились на острове Западный Шпицберген архипелага Шпицберген (Норвегия), в ближайших окрестностях и на территории пос. Баренцбург (78°04' с.ш., 14°13' в.д.), где, начиная с 1932 г. согласно действующему экономическому договору между Россией и Норвегией, советской, а затем

русской компанией “Арктикуголь” производится добыча угля шахтным способом. Главная экономическая активность поселка до 2006 г. – добыча угля компанией ФГУП ГТ “Арктикуголь” и продажа его в страны Европы. С 2007 г. Баренцбург находится на автономном жизнеобеспечении. Здесь действуют шахта, теплоэлектростанция, порт и объекты жилищно-социальной инфраструктуры. В настоящее время в связи с исчерпанием угленосных пластов и новыми политико-экономическими реалиями трест “Арктикуголь” осваивает новые направления деятельности – это развитие науки (в 2013 г. создан Российский научный центр (РНЦ) на Шпицбергене) и международный туризм (Центр арктического туризма “Груммант”) [5]. Благодаря этому, поселок и его ближайшие окрестности представляют собой, в нашем случае, компактный “полигон” для изучения влияния на углеродные потоки антропогенных факторов, связанных с длительным землепользованием. Дополнительное удобство представляет наличие в поселке полнофункциональной круглогодичной метеостанции.

Местный климат относится к морскому арктическому, однако из-за влияния теплого Северо-Атлантического течения он относительно мягок, и сильные морозы бывают редко. По данным многолетних метеонаблюдений, среднегодовая температура составляет –4.9 °С, средняя температура самого холодного месяца –12.7 °С, что существенно теплее, чем на более восточных арктических островах в тех же широтах. Дополнительный эффект обогрева дают фьорды, проникающие здесь далеко в глубь островов. Общее количество осадков за год составляет 340–550 мм, что создает существенный защитный снежный покров в понижениях, а их выпадение по месяцам – равномерно [4, 8]. Сумма положительных температур составляет около 550 градусо-дней. Такие показатели вполне отвечают европейским типичным тундрам. Тем не менее, по характеру растительных сообществ исследуемая территория соответствует подзоне арктической тундры [8].

Район исследований представляет собой зону сплошного залегания многолетней мерзлоты. Максимальное сезонное протаивание составляет 80–180 см. Исключение составляют небольшие по площади селитебные территории и долины крупных ручьев, где мерзлота часто отсутствует. Из-за отепляющего влияния Западно-Шпицбергенской ветви Гольфстрима местная флора достаточно разнообразна, несмотря на значительное удаление от Евразии (около 700 км). По числу видов сосудистых и особенно мхов архипелаг превышает показатели сравнимых по высокоширотному расположению и площади

Земли Франца-Иосифа и Новосибирских о-вов, несмотря на близость последних к материка [4]. В зоне низменных приморских равнин на отложениях морских аккумулятивных террас преобладают полигональные кустарничково-моховые арктические тундры. Общие запасы живой фитомассы ($2.9 \text{ т а.с.м. га}^{-1}$) и первичная продукция (0.6 т га^{-1} в год) в этих сообществах традиционно невелики, как и для аналогичных экосистем в Арктике; в основном они приходятся на наземные части растений и мхи. Однако здесь есть и существенно более продуктивные экосистемы: это пушицево-моховые заболоченные тундры (5.46 т га^{-1} и 2.25 т га^{-1} в год соответственно) и орнитогенные растительные сообщества. Надземная продукция последних максимальна ($2.5\text{--}4.0 \text{ т га}^{-1}$ в год) и на порядок превышает аналогичную продуктивность окружающих ландшафтов [8]. Реже, в понижениях и на защищенных снегом участках встречаются субарктические (типичные) тундры из *Betula nana L.*, *Empetrum spp.* и зеленых мхов. С высотой, уже на 50–100 м над у.м. здесь доминируют горные полярные пустыни с редкой растительностью из лишайников и единичных цветковых растений на каменистых россыпях и скалах. В целом, как отмечается, относительно теплые для полярных широт условия архипелага способствуют повышенным удельным запасам фотосинтезирующих частей растений (мхов и сосудистых) в местных сообществах [8].

Полевые исследования проводились ежегодно с конца июля по середину августа в 2014–2018 гг. В 2014 г. в качестве постоянных участков для наблюдений за потоками CO_2 и других биогенных парниковых газов были выбраны следующие: 1) полигональная кустарничково-моховая арктическая тундра с доминированием по трещинам *Dryas octopetala L.*, *Cassiope tetragona L.* и *Salix polaris L.*, а также мхами вокруг полигонов, покрытых водорослевыми и цианобактериальными пленками. Иногда такие тундры называются пятнистыми (медальонными), в случае выраженности пятен открытого грунта в центре полигонов. Такие тундры представляют собой начальные стадии зарастания пятен мерзлотного пучения, что относится и к нашему случаю. Этот участок использовался в качестве основного контроля при сравнении с антропогенно-измененными территориями; 2) орнитогенный арктический луг в районе птичьего базара с нитрофильной растительностью на хорошо дренированном склоне юго-западной ориентации; 3) различные варианты антропогенно-измененных территорий: угольные отвалы разного возраста и степени зарастания, сельтуба, грунтовые дороги с разным уровнем нагрузки. Среди этих вариантов выделяли участки с активной антропогенной нагрузкой (дороги, се-

лительба и пр.) и самовосстанавливающиеся после прекращения нагрузки территории (зарастающие угольные отвалы и пр.). Всего за годы наблюдений по состоянию на 2018 г. оценено 22 таких выдела. Часть из них (фоновые участки) измеряется ежегодно (12), а кроме того, дополнительно каждый год включаются новые участки для пополнения базы данных по пространственной вариативности потоков.

Измерения потоков CO_2 с поверхности почвы (почвенной эмиссии) проводили прямоточным методом закрытых камер с помощью портативных инфракрасных CO_2 -анализаторов со встроенной помпой, выполненных на основе датчиков AZ 7752 или AZ 77532 (Temp- CO_2) (КНР, Тайвань), а также высокоточным полевым анализатором CO_2 и паров воды Li-6400 XT (США LiCorCorp.). Для проведения замеров почвенной эмиссии на каждом изучаемом объекте в почву (грунт) вкапывалось по 5–10 цилиндрических ПВХ-оснований, объемом около 2 л, на расстоянии от 3 до 10 м друг от друга. Основания устанавливались на глубину 2–3 см за 2 ч до начала измерений, после чего проводился замер эмиссии CO_2 в течение 3 мин на каждом из оснований. Всего за период исследований было проведено 474 (2014–2018 гг.) единичных измерений почвенного дыхания, а также валового дыхания и нетто-потоков диоксида углерода в ключевых точках (2017–2018: 58).

В 2017 г. были взяты пробы поверхностных потоков метана и закиси азота на избранных участках (8 измерений). Дополнительно оценивались температуры воздуха и почвы на глубине 1 и 5 см, объемная влажность почвы в слое 0–6 см, проективное покрытие и высота ярусов растений, мощность подстилки, мохово-лишайникового и гумусового горизонтов, экспозиция склона, характер почвы или грунта, а также отбирались монолиты почвы для определения объемной плотности, pH и содержания углерода и азота. Кроме того, оценивали проективное покрытие растительности (%) и общий запас наземной фитомассы (г а.с.м.), мощность мохового или мохово-лишайникового покрова (см), мощность органогенного горизонта (см), мощность дернины (см), гранулометрический состав субстрата, мощность сезонно-талого слоя (см), уклон местности (градусы) и экспозицию. Привязка каждого объекта осуществлялась с помощью навигатора GARMIN GPSmap 62s (США). Измерение потоков метана и закиси азота проводили отбором газовых проб в вакуумированные флаконы из тех же герметично закрытых ПВХ-оснований (общая экспозиция на почве составляла 120 или 180 мин с отбором проб в начальный момент и через каждый час).

В 2017–2018 гг. дополнительно проводились исследования по оценке чистого потока углерода, валовой первичной продукции и валового дыхания. С этой целью на участки почвы с растительностью на предварительно вкопанные базы устанавливали прозрачные для фотосинтетически активной радиации (ФАР) камеры размером 40 × 40 × 40 см. Интенсивность солнечной радиации (микроэйнштейн (μЕ) м⁻²с⁻¹) определяли с помощью переносного датчика ФАР и логгера (HOBO DataLogger, США). Герметичность достигалась с помощью водяного затвора. Измерения на свету проводили около 3 мин, затем проветривали и накрывали непрозрачным для ФАР материалом и измеряли еще 3 мин. Показатель потока на свету служил оценкой чистого потока CO₂, а в темноте – валового дыхания. Валовую первичную продукцию оценивали по их разнице.

Статистическую обработку данных и расчеты проводили с помощью пакетов Microsoft Excel, SPSS Statistics V.20.0 (IBM), а также PRIMER V.7 (PRIMER-E Ltd).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полевые наблюдения на опытных участках в районе пос. Баренцбург (Западный Шпицберген) впервые позволили проследить 5-летнюю (2014–2018 гг.) динамику изменений почвенной эмиссии CO₂ в наблюдаемых антропогенно-измененных (АИ) и контрольных (фоновых) экотопах арктической тундры (рис. 1). Среди обследованных АИ экотопов наименьшие уровни эмиссии демонстрируют грунтовые дожди разного возраста и строительные площадки

(0.053 гСм⁻²ч⁻¹), наибольшие – загоны для животных (0.330), участки селитьбы (0.130) и угольные отвалы разного возраста и степени зарастания (0.119). Среди незатронутых антропогенной активностью естественных участков наибольшие уровни эмиссии отмечены в орнитогенных нитрофильных сообществах (0.129), вдвое превышающие потоки в пятнистых моховых тундрах (0.063). В составе этих тундр центры полигонов (пятна пучения грунта) занимают в среднем 1/3 их площади и являются очень слабыми эмиттерами CO₂ (0.025), а окружающие их заросшие растительностью понижения (трещины) выделяют втрое больше углекислого газа (0.083). Последнее связано не только с наличием растительности и органогенного слоя почвы в трещинах, но и с облегченным транспортом газа. При этом, в разные годы, несмотря на флуктуации потоков, связанные с погодными изменениями, сохраняются соотношения между уровнями эмиссии в отдельных экотопах, что говорит об устойчивом преобладании пространственных факторов эмиссии над временными во внутригодовом масштабе.

Как видно из рис. 1, межгодовые потоки почвенной эмиссии в вегетационный сезон могут существенно (в 2 раза) меняться даже за относительно небольшой, 5-летний, период наблюдений. Судя по полученным данным, эта динамика определяется, в основном, значимыми погодными изменениями. В основном это зависит от влажности верхнего слоя почвы, которая, в свою очередь, определяется выпадением осадков.

Температура воздуха является, на первый взгляд, малозначимым фактором, поскольку

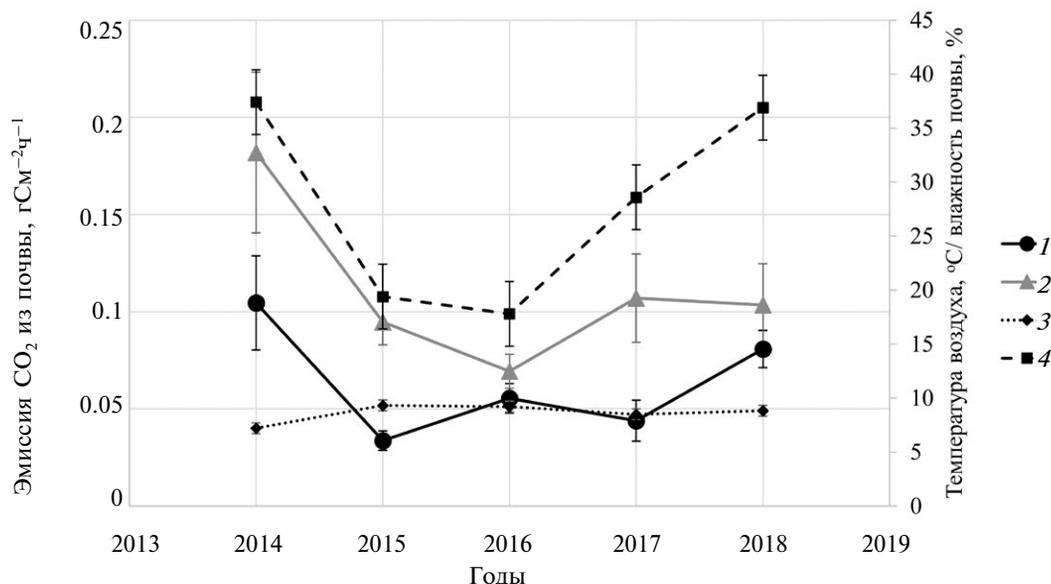


Рис. 1. Многолетняя изменчивость потоков почвенной эмиссии CO₂ за 2014–2018 гг. в фоновых (1) и антропогенно-измененных (2) экотопах на участках наблюдений на о-ве Западный Шпицберген в зависимости от температуры воздуха (3) и влажности верхнего (0–6 см) слоя почвы (4). Приведены средние и их стандартные ошибки.

за период наблюдений она менялась очень незначительно. В целом за 5 лет наблюдений отмечена тенденция к небольшому, но значимому снижению уровня почвенной эмиссии как в АИ, так и в фоновых экотопах. При этом влажность почвы и температура воздуха несколько возросли (см. рис. 1), что отвечает современному тренду потепления в Арктике [4]. Это говорит о том, что влажность почвы уже достигла зоны верхнего субоптимума для почвенного дыхания, когда оно начинает подавляться, тогда как прирост температуры еще не оказывает на него заметного положительного влияния. Сравнение уровней эмиссии CO_2 из почв показывает, что фоновые пятнистые тундры меньше реагируют на меняющиеся внешние условия (прежде всего, изменения влажности почвы) по сравнению с АИ экотопами.

Различия в уровнях потоков CO_2 между отдельными экотопами определяются, главным образом, разным характером и состоянием почв и грунтов, т.е. пространственными особенностями. Несмотря на то что влияние погодных условий может существенно сблизить уровни эмиссии (см. 2016 г. на рис. 1), антропогенно-измененные участки во все годы наблюдений продолжают устойчиво демонстрировать почти вдвое более высокие значения почвенной эмиссии по сравнению с фоновыми ($0.111 \pm 0.021 > 0.064 \pm 0.011 \text{ гС м}^{-2}\text{ч}^{-1}$; t -тест, $P < 0.05$). С учетом более чем в 6 раз более низких, в среднем, запасов живой надземной фи-

томассы на антропогенно-измененных участках ($311.9 > 52.04 \text{ г а.с.м. м}^{-2}$, t -тест, $P < 0.001$), это может служить косвенным подтверждением, что последние являются устойчивыми нетто-источниками CO_2 для атмосферы.

На рис. 2. обобщены полученные за все годы наблюдений данные по потокам почвенной эмиссии CO_2 на фоновых участках на участках, где многолетнее антропогенное воздействие продолжается и на участках, которые можно отнести к самовосстанавливающимся.

Как видим, участки с продолжающимся активным антропогенным воздействием существенно превышают по эмиссии фоновую тундру почти во всем диапазоне изменчивости. При этом диапазон наблюдаемых величин эмиссии также существенно выше. Исключение среди фоновых участков составляют орнитогенные почвы, находящиеся под влиянием птичьих базаров (точки по порядку выделов с 18 по 23), с высоким содержанием биогенных элементов (азота, в частности). Положение участков где активное антропогенное воздействие прекратилось (в основном, это угольные отвалы) является промежуточным между двумя описанными кривыми. Его можно охарактеризовать как стремящийся к фоновому уровню.

Помимо измерений почвенного дыхания в контрольных и АИ экосистемах в 2017–2018 гг. проводились оценки чистого потока C , валовой первичной продукции и валового дыхания. Как

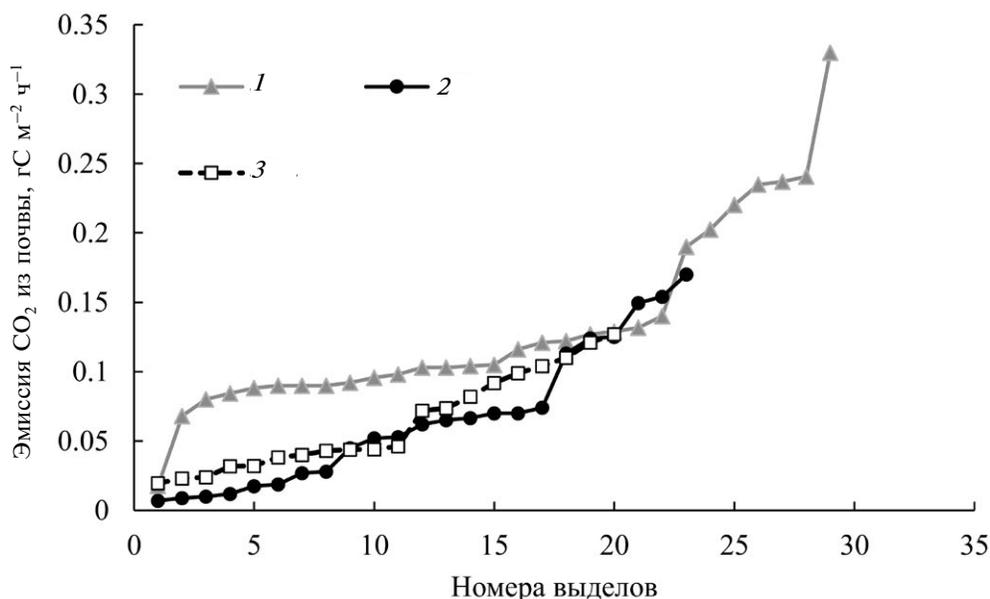


Рис. 2. Ранжированные по возрастанию величины почвенной эмиссии CO_2 (1) на участках, где активное многолетнее антропогенное воздействие продолжается ($N = 29$), (2) на фоновых участках ($N = 23$), и (3) на самовосстанавливающихся участках, где активное антропогенное влияние прекратилось 5–30 лет назад; $N = 20$ (Западный Шпицберген, 2014–2018 гг.).

показали наблюдения и модельные расчеты, даже в условиях оптимальной для зоны арктической тундры освещенности и температуры воздуха пятнистые тундры, равно как АИ участки, не продемонстрировали суточного стока С и находились в равновесном (околонулевом) по С-балансу состоянии (рис. 3). Согласно расчетам, это свидетельствует о том, что по отношению к году в целом эти участки с высокой вероятностью являются источниками С для атмосферы. В то же время, АИ участки, которые находятся на стадии активного восстановления и зарастания растительностью (зарастающие старые угольные отвалы, зарастающие участки селитыбы и пр.) и больше не подвергаются активному антропогенному воздействию, демонстрируют сток углерода в условиях даже низкой освещенности (см. рис. 3). К третьей категории относятся участки (на рис. 3 они обозначены как участки с активным антропогенным воздействием), которые продолжают подвергаться значительному антропогенному прессу (участки дорог и складов, активная селитебная зона, свалки, домовые и инженерные строения и пр.). Для них характерен положительный баланс углерода (источник для атмосферы) вне зависимости от уровня освещенности.

Хотя круглосуточных измерений для оценки суточного нетто-баланса С не проводили, была сделана попытка оценить относительные различия в величине суточного баланса в фоновых и антропогенных участках с помощью

комбинации дневных (в период наибольшей внутрисуточной освещенности) и ночных (при минимальной освещенности) измерений нетто-потока CO₂. Оценки нетто-потоков для фоновых и самовосстанавливающихся сообществ рассчитывали с помощью соответствующих линейных регрессий от освещенности, приведенных на рис. 3, а для активно используемых участков, где такой зависимости не было выявлено, использовали среднюю величину между дневными и ночными измерениями. Регрессии применяли к суточной динамике освещенности в дни измерений, восстановленной с помощью датчика ФАР и автоматического регистратора. Несмотря на то что благодаря преобладанию мохообразных фотосинтез местной тундровой растительности фиксируется даже при освещенности менее 40 мкЭ м⁻²с⁻¹, данный участок, как правило, становится стоком С(CO₂) только при освещенности более 300 мкЭ м⁻²с⁻¹ в экосистемах, самовосстанавливающихся после антропогенного воздействия, и при освещенности более 500 мкЭ м⁻²с⁻¹ в фоновых пятнистых тундрах. Анализ показал, что фоновые тундры даже в оптимальные по освещенности дни (800–1200 мкЭ м⁻²с⁻¹) находятся в состоянии околонулевого баланса (0.58 ± 1.7 гС м⁻²сут⁻¹), и только самовосстанавливающиеся сообщества демонстрируют в такие же дни сток диоксида углерода порядка -0.94 ± 0.08 гС м⁻²сут⁻¹. Участки, находящиеся под активным антропо-

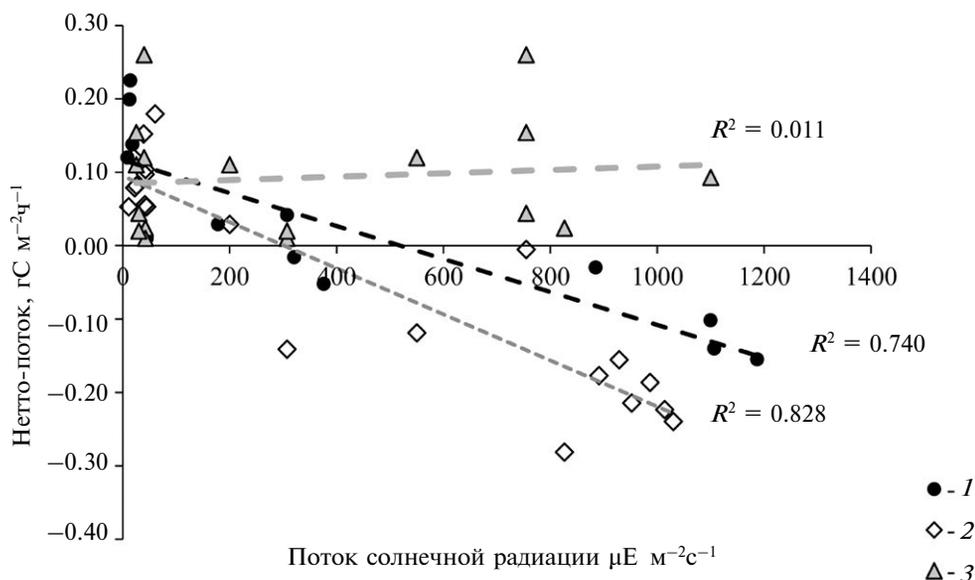


Рис. 3. Сравнение оценок нетто-потока CO₂ в различных экосистемах арктической тундры Западного Шпицбергена в зависимости от мощности потока солнечной радиации (микроэйнштейн м⁻²с⁻¹) в июле–августе 2017 и 2018 г. 1 – фоновые сообщества арктической полигональной тундры, 2 – зарастающие (самовосстанавливающиеся) антропогенно-измененные (АИ) участки, 3 – активно используемые АИ участки. Положительные значения нетто-потока обозначают его источник в атмосферу, отрицательные – сток из атмосферы. Пунктирные линии – линейные тренды с коэффициентами детерминации.

погенным воздействием, всегда оставались в дни наблюдений источниками С для атмосферы в пределах $2.23 \pm 0.47 \text{ гС м}^{-2}\text{сут}^{-1}$. В пасмурные дни, когда освещенность не превышает $300 \text{ мкЕ м}^{-2}\text{с}^{-1}$, по-видимому, вся территория является источником углерода.

Кроме того, на основе этих наблюдений был выяснен диапазон суточной динамики почвенной эмиссии CO_2 в фоновых и АИ биотопах. Если в фоновых пятнистых арктических тундрах он составлял 2.6 раза (превышение максимального дневного уровня почвенного дыхания над минимальным ночным), то в АИ экотопах это превышение было существенно меньше: 1.28–1.77 раза, что объясняется меньшей амплитудой внутрисуточных колебаний температуры, а также меньшим участием растительности. Оценка доли, которую составляет почвенное дыхание от валового дыхания, показала, что в фоновых арктических экосистемах это достаточно устойчивый показатель, меняющийся от 75 (ночной период, заросшие трещины между полигонами) до 95% (дневной период, пятна пучения). В то же время на АИ участках он может широко меняться от 36 (зарастающие участки) до 100% (участки с открытым грунтом).

В завершение был проведен статистический анализ всех независимых (предикторных) переменных почвенной эмиссии CO_2 , обладающих на данном этапе наблюдений достаточным количеством данных для сравнения. Целью ана-

лиза была относительная оценка вкладов пространственных и временных переменных в целом, а также выявление количественного вклада основных значимых переменных. В качестве метода был выбран множественный регрессионный анализ на матрицах сходства (distance-based Linear Modelling) [6] с пошаговым отбором предикторов.

Переменной отклика (зависимой переменной) служил поток почвенной эмиссии $\text{CO}_2 \text{ гС м}^{-2}\text{ч}^{-1}$ (CO_2), предикторными (независимыми) переменными – год (YEAR), температура воздуха (Ta), температура почвы на глубине 1 см (T1) и 5 см (T5), запас надземной фитомассы (PHYTO, баллы), близость верхней кровли многолетней мерзлоты (PERM, баллы), мощность органогенного слоя почвы (ORGSOIL, баллы), степень антропогенного влияния (ANTHR, баллы), pH водный (PH, единицы) и объемная влажность верхнего шестисантиметрового слоя почвы (MOIST, %). Выбор оптимальной регрессионной модели осуществляли по информационному критерию Акаике с поправкой на малый размер выборки (AIC_c), позволяющему выбрать модель, наиболее полно описывающую данные наименьшим числом параметров [6]. Для выявления побочного влияния на результаты используемых балльных оценок, анализ проводили в двух вариантах. В первом, все переменные, включая балльные, рассматривались как количественные с фиксированным эффектом. Во втором – балльные переменные (PHYTO, PERM, ORGSOIL, ANTHR)

Таблица 1. Применение множественного регрессионного анализа на матрицах сходства к данным наблюдений почвенной эмиссии CO_2 (Западный Шпицберген, 2014–2018 гг.)

Вариант 1. Все переменные включены в анализ как количественные						
Предикторная переменная	AICc	Pseudo-F	P	Prop.	Cumul.	res.df
ORGSOIL	–285.72	41.475	0.001	0.47962	0.480	45
YEAR	–288.70	5.207	0.027	5.5067E-2	0.535	44
MOIST	–291.91	5.449	0.034	5.2336E-2	0.587	43
T5	–292.19	2.571	0.125	2.3819E-2	0.611	42
Вариант 2. Все балльные переменные включены в анализ как качественные						
ORGSOIL	–282.45	9.914	0.001	0.5473	0.547	41
T5	–285.75	5.520	0.021	5.4898E-2	0.602	40
YEAR	–287.55	4.118	0.044	3.7993E-2	0.640	39
PERM	–289.33	4.132	0.055	3.5285E-2	0.676	38
MOIST	–289.87	3.103	0.086	2.5112E-2	0.701	37

Примечание: AICc – критерий Акаике, Pseudo-F – псевдо-критерий Фишера, P – уровень значимости переменной, Prop. – доля объясненных ею различий, Cumul. – накопленный % объясненных различий, res.df – остаточное число степеней свободы. Переменные обозначены в тексте.

рассматривались как качественные (применяли кодирование каждой балльной переменной набором номинальных бинарных переменных).

Результаты анализа приведены в табл. 1. В обоих вариантах наилучшая модель включает сходный набор объясняющих переменных. В первом варианте это мощность органогенного слоя, год наблюдений, влажность почвы (0–6 см) и ее температура на глубине 5 см, в сумме объясняющие 61% общих различий эмиссии CO₂ между отдельными измерениями (столбец “Rgor” в табл. 1). Во втором варианте в модель входит также близость верхней кровли многолетней мерзлоты, в сумме эти пять переменных объясняют 70% различий. В обоих вариантах основным предиктором является мощность органогенного слоя, объясняющая 48–55% общих различий между измерениями; вклад каждой из оставшихся переменных на порядок меньше. Так, на межгодовые вариации приходится лишь от 3.8 до 5.5% общих различий потоков почвенной эмиссии. Примечательно, что доли объясненной дисперсии в обоих вариантах близки, что указывает на относительно монотонное изменение потока CO₂ при изменении значений балльных переменных (отсутствие влияния используемой балльной системы на результаты).

Отдельного объяснения требует отсутствие среди значимых предикторов переменной, отражающей наличие антропогенного влияния (ANTHR), несмотря на значимо более высокую почвенную эмиссию CO₂ из АИ участков. Как показывает корреляционная матрица (табл. 2), построенная на основе исходного массива наблюдений, это связано с наличием комплекса тесно скоррелированных предикторных переменных. В нашем случае это наличие антропогенного влияния, мощность органогенного слоя почвы, рН и объемная влажность верхнего слоя почвы, с которыми, в свою очередь, тесно связана переменная отклика. Как видим из табл. 2, наиболее тесная положительная связь наблюдается между наличием антропогенного воздействия и мощностью органогенного слоя, что объясняет присутствие в результатах табл. 1 только одной из этих переменных. Таким образом АИ участки имеют более мощный органогенный слой, более низкую кислотность, высокую влажность и более глубокое расположение многолетней мерзлоты, что связывается с большими потоками почвенной эмиссии CO₂.

Дополнительно к измерениям потоков CO₂ в августе 2017 г. на участках наблюдений были проведены первые рекогносцировочные оценки поверхностных потоков более редких биогенных парниковых газов (метана и закиси азота). Эти измерения показали, что во всех случаях, как на автоморфных, так и на гидроморфных участках, и независимо от антропогенного воздействия,

потоки метана (-0.061 ± 0.084 мгС-CH₄ м⁻²ч⁻¹, $N = 8$) и закиси азота (0.087 ± 0.096 мгN₂O м⁻²ч⁻¹, $N = 8$) значимо не отличаются от нулевых.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты многолетних наблюдений за почвенной эмиссией и нетто-потоками CO₂ в естественных и антропогенно-измененных экосистемах арктической тундры архипелага Шпицберген показали, что антропогенные факторы, связанные с местным землепользованием, могут более чем вдвое увеличивать эмиссию диоксида углерода из почвы в период своего активного воздействия. Нетто-баланс CO₂ на таких участках является положительным (источник для атмосферы). Фоновые экосистемы с высокой вероятностью находятся в состоянии С-равновесия или слабого источника для атмосферы за год. Зарастающие (самовосстанавливающиеся после антропогенного воздействия) участки демонстрируют промежуточные между фоновыми и АИ участками величины почвенной эмиссии CO₂, но при этом наибольшие по сравнению с ними нетто-потоки С (сток углерода) во всем диапазоне освещенности. Наибольший вклад в различия эмиссии CO₂ между отдельными точками вносят пространственные факторы (объясняют 56–66% дисперсии), тогда как временные факторы объясняют лишь 3.8–5.5% дисперсии. Межгодовые флуктуации условий, среди которых наиболее важны температура и влажность верхнего слоя почвы, одинаково влияют на АИ и фоновые экосистемы, поэтому пространственные различия между ними поддерживаются из года в год.

Лидирующей пространственной переменной, тесно и положительно связанной с антропогенным воздействием, является мощность органогенного горизонта (дернины), которая единолично объясняет 48–55% различий. При этом наблюдается положительная зависимость между мощностью органогенного слоя и глубиной залегания мерзлоты. Это отличается от обычно наблюдаемой в арктических экосистемах зависимости, которая реализуется через термоизоляцию: чем больше выражен верхний органогенный слой почвы, тем меньше глубина сезонного протаивания. Но такая зависимость относится к экосистемам уже пришедшим в равновесие с реликтовой мерзлотой. Антропогенные факторы выводят эту сложившуюся систему из равновесия через действие прямого потока дополнительного тепла, уничтожение местной растительности, а также нарушение физико-химических характеристик почвы (уплотнение, замена на строительный грунт и пр.). Все эти воздействия в первую очередь приводят к увеличению протаивания мерзлоты. После снятия антропогенной нагрузки

Таблица 2. Корреляционная матрица переменных почвенной эмиссии CO₂, вошедших в регрессионный анализ (Западный Шпицберген, 2014–2018 гг.)

	CO ₂	YEAR	Ta	T1	T5	PHYTO	PERM	ORGSOIL	ANTHR	pH	MOIST
CO ₂	–	1	1	1	1	1	0.35394	<u>2.71E-08</u>	<u>0.000971</u>	<u>0.028526</u>	0.06483
YEAR	-0.149	–	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Ta	-0.193	0.062	–	<u>0.015237</u>	1	1	1	1	1	1	0.52533
T1	-0.161	-0.102	<u>0.457</u>	–	<u>0.000589</u>	1	1	1	1	1	0.42622
T5	0.095	-0.293	0.216	<u>0.539</u>	–	1	1	1	0.26382	0.21283	1
PHYTO	-0.018	0.106	0.044	0.013	-0.1399	–	1	1	1	1	1
PERM	-0.320	0.016	0.075	-0.098	-0.2667	0.219	–	1	<u>5.28E-05</u>	0.42237	0.95444
ORGSOIL	0.657	-0.088	-0.108	-0.098	0.2355	0.180	-0.227	–	<u>1.40E-10</u>	<u>2.07E-05</u>	<u>0.038518</u>
ANTHR	<u>0.483</u>	-0.072	-0.116	-0.039	0.3624	-0.190	<u>-0.544</u>	0.715	–	<u>2.10E-12</u>	<u>0.023519</u>
pH	<u>0.461</u>	-0.222	-0.116	0.027	0.4135	-0.268	-0.362	0.632	0.823	–	<u>0.033161</u>
MOIST	0.412	0.159	-0.335	-0.343	-0.0239	-0.282	-0.309	<u>0.429</u>	<u>0.444</u>	<u>0.482</u>	–

Примечание. Левая нижняя часть таблицы (под диагональю) – ранговые корреляции Спирмена, верхняя правая (над диагональю) – уровень значимости P (с последовательной поправкой Бонферрони на множественность сравнений). Достоверные ($P < 0.05$) корреляции и соответствующие им уровни значимости подчеркнуты, наиболее сильные связи дополнительно выделены полужирным шрифтом. Обозначения переменных приведены в тексте.

начинается самовосстановление системы, однако поскольку условия уже изменены в сторону потепления (в том числе за счет трудно обратимого снижения кровли многолетней мерзлоты), то на этом месте восстанавливается совершенно другая экосистема, в частности, с преобладанием злаков и развитой дерниной. Таким образом, возникает нехарактерное для тундры сочетание условий и признаков. Поэтому в местном спектре антропогенных воздействий (напомним, что мы статистически анализируем весь имеющийся набор данных, включающий как естественные, так и АИ биотопы) преобладает вариант, при котором запасы органического вещества в верхнем слое почвы увеличены, а мерзлота обнаруживается глубже или вовсе отсутствует.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РГО-РФФИ № 17-05-41157 РГОа (в части изучения потоков парниковых газов в естественных тундровых сообществах), РФФИ-Арктика № 18-05-60279 (в части изучения антропогенного влияния на эмиссию и баланс парниковых газов в арктических экосистемах). Полевые исследования выполнены в рамках темы Государственного задания № 0148-2017-0005 (Институт географии РАН), определение концентраций метана и закиси азота в пробах на газовом хроматографе выполнено в рамках Государственного задания № АААА-А18-118052400130-7 (Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН).

FUNDING

Field research was carried out within the framework of the state-ordered research theme of the Institute of Geography RAS, no. 0148-2017-0005, determination of methane and nitrous oxide concentrations by gas chromatograph was fulfilled within the framework of the state-ordered research theme of the Centre for Problems of Ecology and Productivity of Forests RAS, no. АААА-А18-118052400130-7. The work was also supported by the grants received from the RFBR and Russian Geographical Society (greenhouse gases emission in natural tundra communities) and from the RFBR, no. 18-05-60279 "Arctic" (human impact on emission and balance of greenhouse gases in Arctic ecosystems).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы глубоко признательны персоналу и научным сотрудникам Российского Научного Центра на Шпицбергене за обеспечение приборами и предоставление логистической поддержки.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are deeply grateful to the staff and researchers of the Russian scientific center on Spitsbergen for providing equipment and logistic support.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карелин Д.В., Замолодчиков Д.Г. Углеродный обмен в криогенных экосистемах. М.: Наука, 2008. 344 с.
2. Карелин Д.В., Горячкин С.В., Замолодчиков Д.Г., Долгих А.В., Зазовская Э.П., Шишников В.А., Почикалов А.В., Сиринов А.А., Суворов Г.Г., Краев Г.Н. Влияние местных антропогенных факторов на почвенную эмиссию биогенных парниковых газов в криогенных экосистемах // *Ж. общей биологии*. 2016. Т. 77. № 3. С. 167–181.
3. Карелин Д.В., Горячкин С.В., Замолодчиков Д.Г., Долгих А.В., Зазовская Э.П., Шишников В.А., Краев Г.Н. Влияние различных видов антропогенного воздействия на эмиссию парниковых газов в мерзлотных экосистемах // *ДАН*. 2017. Т. 477. № 5. С. 610–612.
4. Национальный атлас Арктики / ред. Бабурин В.Л., Бадина С.В., Болысов С.И., Бочарников М.В., Бредихин А.В., Вашенкова Е.Н., Вергун А.П., Гаранкина Е.В., Гиппиус Ф.Н., Гладкевич Г.И., Голубева Е.Н., Горячко М.Д., Данышин А.И., Деев М.Г., Демидов А.Н., Добролюбов С.А., Дубинин Е.П., Емельянова Л.Г., Иванов А.Н., Казьмин М.А., Касимов Н.С., Кириллов П.Л., Кислов А.В., Кокин О.В., Колдобская Н.А., Левик Л.Ю., Леонова Н.Б., Лукьянова С.А., Микляева И.М., Огородов С.А., Платов Г.А., Романенко Ф.А., Румянцев В.Ю., Сафронов С.Г., Соколова Д.В., Солдатов М.С., Соловьёва Г.Д., Сорокина В.Н., Торопов П.А., Тузов Ф.К., Тульская Н.И., Фузеина Ю.Н., Чуженькова В.А., Шабалина Н.В., Яковлев Н.Г. М.: Роскартография, 2017. 496 с.
5. Трест "Арктикуголь". *Официальный сайт ФГУП «ГТ "Арктикуголь"»*. <http://www.arcticugol.ru/index.php/about/trest-arktikutgol>
6. Anderson M.J., Gorley R.N., Clarke K.R. PERMANOVA+ for PRIMER: guide to software and statistical methods. Plymouth: PRIMER-E Ltd., 2008. 214 p.
7. Climate change 2014: Synthesis Report: Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2014. 151 p.
8. Tishkov A.A. The ecosystems of the west coast of Spitsbergen (Svalbard archipelago) // *Polar Geogr. and Geol.* 1985. № 9 (1). P. 70–83.
9. Tarnokai C., Canadell J.G., Schuur E.A.G., Kuhry P., Mazhitova G., Zimov S. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region // *Global Biogeochem. Cycles*. 2009. V. 23. P. 1–11.
10. Yakushev V.S., Chuvilin E.M. Natural gas and gas hydrate accumulations within permafrost in Russia // *Cold regions science and technology*. 2000. V. 31. P. 189–197.

REFERENCES

1. Karelin D.V., Zamolodchikov D.G. *Uglerodnyi obmen v kriogennykh ekosistemakh* [Carbon Exchange in Cryogenic Ecosystems]. Moscow: Nauka Publ., 2008. 344 p.
2. Karelin D.V., Goryachkin S.V., Zamolodchikov D.G., Dolgikh A.V., Zazovskaya E.P., Shishkov V.A., Pochikalov A.V., Sirin A.A., Suvorov G.G., Kraev G.N. The influence of local anthropogenic factors on soil emission of biogenic greenhouse gases in cryogenic ecosystems. *Zh. Obshchei Biol.*, 2016, vol. 77, no. 3, pp. 167–181. (In Russ.).
3. Karelin D.V., Goryachkin S.V., Zamolodchikov D.G., Dolgikh A.V., Zazovskaya E.P., Shishkov V.A., Kraev G.N. Impact of various types of anthropogenic impact on greenhouse gas emissions in permafrost ecosystems. *Dokl. Akad. Nauk.*, 2017, vol. 477, no. 5, pp. 610–612. (In Russ.). doi 10.7868/S0869565217350225
4. Baburin V.L., Badina S.V., Bolysov S.I., Bocharnikov M.V., et al. *Natsional'nyi atlas Arktiki* [National Atlas of the Arctic]. Moscow: Roskartografiya, 2017. 496 p.
5. The trust “Arktikugol”. The official site of FSUE “GT” Arktikugol, 2019. Available at: <http://www.arcticugol.ru/index.php/about/trest-arktugol> (accessed: 07.08.2019). (In Russ.).
6. Anderson M.J., Gorley R.N., Clarke R.K. *PERMANOVA+ for PRIMER: Guide to Software and Statistical Methods*. Plymouth: PRIMER-E Ltd, 2008. 214 p.
7. IPCC. *Climate Change 2014: Synthesis Report: Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team, Pachauri R.K., Meyer L.A., Eds. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014. 151 p.
8. Tishkov A.A. The ecosystems of the west coast of Spitsbergen (Svalbard archipelago). *Polar Geogr.*, 1985, vol. 9, no. 1, 1985, pp. 70–83.
9. Tarnokai C., Canadell J.G., Schuur E.A.G., Kuhry P., Mazhitova G., Zimov S. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochem. Cy.*, 2009, vol. 23, no. 2, pp. 1–11.
10. Yakushev V.S., Chuvilin E.M. Natural gas and gas hydrate accumulations within permafrost in Russia. *Cold Regi. Sci. Technol.*, 2000, vol. 31, no. 3, pp. 189–197.

Monitoring of CO₂ Fluxes on Svalbard: Land Use Alters the Gas Exchange in the Arctic Tundra

D. V. Karelin^{1, 2, *}, E. P. Zazovskaya¹, V. A. Shishkov¹, A. V. Dolgikh¹, A. A. Sirin³,
G. G. Suvorov³, A. I. Azovsky⁴, and N. I. Osokin¹

¹*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Centre for Problems of Ecology and Productivity of Forests, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

³*Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences, Uspenskoe (Moscow region), Russia*

⁴*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Biology, Moscow, Russia*

*e-mail: dkarelin7@gmail.com

Received December 5, 2018; revised April 11, 2019; accepted May 30, 2019

The article summarized the results of long-term observations (2014–2018) of soil emissions and net CO₂ fluxes (2017–2018) in natural and anthropogenically modified (AI) ecosystems of Arctic tundra on the territory of the archipelago of Svalbard (Barentsburg, 78°04'N, 14°13'E). Anthropogenic controls associated with local land use, during the period of their active impact may redouble the emissions of carbon dioxide from soil ($0.111 \pm 0.021 > 0.064 \pm 0.011 \text{ gC m}^{-2}\text{h}^{-1}$). During the same period, the net C-balance at the sites with active land use is estimated as a source to the atmosphere. Self-recovering after human influence plots (II) demonstrate intermediate values of soil emissions of CO₂ between unaffected tundra (I) and plots with active land use (III). With that they demonstrate the greatest net C-sink within the observed range of Photosynthetically Active Radiation as compared to (I) and (III). At the height of the vegetation period unaffected tundra ecosystems demonstrate a neutral net C-balance. The greatest contribution to soil emissions variance make spatial controls (they explain 56–66% of variance), whereas temporal factors are responsible for 3.8–5.5% only. Amongst spatial controls, the thickness of organogenic layer makes the greatest contribution. Inter-annual fluctuations of key factors, among which the most important are the soil moisture and temperature of the upper soil layer, both affect AI and natural ecosystems hence the spatial differences between them remain constant from year to year. According to preliminary estimates, unlike the carbon dioxide, the contribution of methane and nitrous oxide net fluxes in local ecosystems is insignificant and does not depend on human land use.

Keywords: CO₂ soil emission, net carbon exchange, Arctic tundra, Svalbard, human land use.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019556-66>