

УДК 631.433.3

## ВЫДЕЛЕНИЕ CO<sub>2</sub> ИЗ ОБРАЗЦОВ ПОЧВ РАЗЛИЧНЫХ ПРИРОДНЫХ ЗОН РОССИИ ПРИ ПРОМЕРЗАНИИ–ОТТАИВАНИИ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

© 2021 г. Д. В. Сапронов\*

Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Федеральный исследовательский центр “Пушкинский научный центр биологических исследований РАН”, ул. Институтская, 2, Пушкино, Московская область, 142290 Россия

\*e-mail: [sadmvas@gmail.com](mailto:sadmvas@gmail.com)

Поступила в редакцию 17.12.2020 г.

После доработки 01.03.2021 г.

Принята к публикации 02.03.2021 г.

Кратковременное промерзание поверхности почвы может происходить практически на всей территории России. Это явление стимулирует всплеск эмиссии почвенного CO<sub>2</sub>. В связи с этим в лабораторных условиях изучали динамику выделения CO<sub>2</sub> из почв различных природных зон при периодически повторяющихся краткосрочных циклах промерзания–оттаивания. Исследовали образцы из верхних горизонтов следующих почв: криозема надмерзлотно–глеяватого, глеезема криотурбированного, подбура оподзоленного, криозема грубогумусированного, подзола типичного, серой лесной, чернозема типичного, дерново–карбонатной, чернозема южного, каштановой, солонча, луговой слитизированной, бурой полупустынной. Установлено, что динамика выделения CO<sub>2</sub> в течение циклов промерзания–оттаивания имела сходные черты для всех представленных почв. Достоверно зафиксировано выделение CO<sub>2</sub> из мерзлых образцов. Оттаивание почвы приводило к импульсному увеличению скорости эмиссии CO<sub>2</sub> независимо от типа почвы по сравнению с потоком углекислого газа до и после цикла промерзания–оттаивания. На широком ряде почв впервые показано, что значительный отклик эмиссии CO<sub>2</sub> на промерзание–оттаивание поверхности почвы может происходить в любой природной зоне. Величина отклика зависит от свойств почв в первую очередь от содержания в ней органического вещества. Влияние единичных циклов промерзания–оттаивания почвы на годовой поток CO<sub>2</sub> незначительно. Частые циклы промерзания–оттаивания могут оказывать существенное влияние на поток CO<sub>2</sub> как в рамках отдельных сезонов, так и за год.

*Ключевые слова:* дыхание почвы, эмиссия CO<sub>2</sub>, заморозки (кратковременные заморозки), парниковые газы, баланс углерода

DOI: 10.31857/S0032180X21080141

### ВВЕДЕНИЕ

Заморозки, продолжительностью от нескольких часов до нескольких суток, ведущие к кратковременному промерзанию верхних 1–5 см почвы, могут происходить практически на всей территории России. В регионах с умеренным климатом циклы промерзания–оттаивания поверхности почвы обычно происходят в течение осеннего и весеннего периодов, а в арктической и субарктической зонах эти процессы вероятны на протяжении всего вегетационного сезона [35, 37]. Климатические изменения, ведущие к повышению температур в течение холодного сезона, увеличению продолжительности бесснежного периода, а также уменьшению мощности снежного покрова в зимний период, способствуют увеличению количества циклов промерзания–оттаивания [2, 9, 41].

Территорий, на которых эти процессы возможны, становится больше.

В ряде лабораторных исследований, а также *in situ*, показано, что краткосрочное промерзание–оттаивание почвы стимулирует импульсное увеличение почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> [12, 13, 16, 21, 26, 29, 35, 37]. Кроме того, циклы промерзания–оттаивания ускоряют выделение других парниковых газов, особенно закиси азота [22, 23, 28, 30, 31, 39]. В то же время имеются данные, что промерзание–оттаивание почвы не изменяет скорость выделения CO<sub>2</sub> [42].

При оттаивании почвы происходит повышение ее температуры и, как следствие, увеличиваются физиологическая активность почвенных организмов, ферментативная и дыхательная активность, ускоряется деструкция субстратов. [15, 24, 27]. Однако считается, что промерзание–отта-

ивание не является фактором, значительно влияющим на выделение углерода из почвы. Это утверждение базируется на том, что подавляющее количество  $\text{CO}_2$  выделяется в теплый период за счет дыхания корней и почвенных микроорганизмов [14]. В то же время Коксон и Паркинсон [11] показали, что величина зимнего потока увеличивалась на 11% при учете эмиссии во время циклов промерзания–оттаивания. Следовательно, циклы промерзания–оттаивания влияют на годовой поток  $\text{CO}_2$  и могут менять соотношение между теплым и холодным периодами, а также между сезонами года. Степень влияния всплесков эмиссии, вызванных промерзанием–оттаиванием почвы на годовой поток  $\text{CO}_2$  зависит от периодичности полевых измерений скорости эмиссии  $\text{CO}_2$ , методики определения годового потока, а также климатических особенностей конкретного региона и почвенных свойств.

Вышесказанное важно для России, поскольку связано с огромным разнообразием почв и климатических условий на ее территории. Многие российские почвы обладают большими запасами активного (потенциально-минерализуемого) органического вещества [6], что предопределяет их высокий эмиссионный потенциал [3]. Кроме того, значительная часть территории России характеризуется холодным климатом. В связи с этим циклы промерзания–оттаивания необходимо учитывать при расчетах почвенной эмиссии углекислого газа и составлении углеродного баланса, как отдельных экосистем, так территории в целом. Предположительно, этот вклад будет иметь особое значение в зонах тундры и тайги, для которых характерно неоднократное промерзание–оттаивание поверхности почвы в теплый период.

Цель работы – в лабораторных условиях изучить закономерности эмиссии  $\text{CO}_2$  из почв различных природных зон России в ходе краткосрочных, периодически повторяющихся циклов промерзания–оттаивания и получить удельные величины эмиссии для исследуемого ряда почв. Основная гипотеза исследования состояла в том, что почвы различных природных зон будут по-разному реагировать на промерзание–оттаивание.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в лабораторных условиях. Объектами послужили образцы верхних горизонтов почв различных природных зон (табл. 1). Тундровая зона представлена криоземом надмерзлотно-глееватым (Reductaquic Turbic Cryosol (Loamic)), глееземом криотурбированным (Reductaquic Turbic Cryosol (Loamic)) и подбуром оподзоленным (Spodic Turbic Cryosol (Arenic)). В подзоне северной тайги отобрали криозем грубогумусированный (Histic Cryosol (Glacic)), в подзоне южной

тайги – подзол иллювиально-гумусовый (Albic Rustic Podzol (Arenic)), в зоне широколиственных лесов – серую лесную почву (Haplic Luvisol (Loamic, Aric)). Лесостепная подзона представлена черноземом типичным (Haplic Chernozem (Loamic, Pachic)) и дерново-карбонатной почвой (рендзиной) (Rendzic Leptosol (Humic)), степная – черноземом южным (Haplic Chernozem (Siltic)), светлокаштановой почвой (Haplic Kastanozem (Siltic)), а также солонцом луговым (Gypsic Solonetz (Loamic, Columnic)) и луговой гипсовой слитизированной почвой (Pellic Gypsic Protosalic Vertisol (Hypereutric)). В полупустыне изучали бурую полупустынную почву (Haplic Calcisol (Loamic)).

Смешанные образцы отбирали из верхних горизонтов почв методом конверта. Из подзола брали два образца: из слоя 0–10 см – подстилочно-торфяной горизонт (O) и 10–15 см – органо-минеральный, перегнойный (AO). Для остальных почв глубина отбора составила 0–10 см. Почву, высушенную до воздушно-сухого состояния при  $+20^\circ\text{C}$ , просеивали через сито (3 мм) и отбирали крупные растительные остатки. Характеристика объектов исследования представлена в табл. 2. Определение физико-химических характеристик выполняли в Центре коллективного пользования ИФХ и БПП РАН с применением стандартных методик [1]. Содержание общего углерода и азота в образцах определяли сжиганием навески в кислороде при температуре  $>1000^\circ\text{C}$  на анализаторе LECO CHNS-932. pH определяли потенциометрически, для оценки обменной кислотности использовали титрование солевой вытяжки щелочью по Соколову (соотношение почва : 1 М КСl 1 : 2.5).  $\text{SO}_4$  гипса извлекали 0.2 М HCl и определяли гравиметрическим методом. Для определения  $\text{CO}_2$  карбонатов применяли ацидометрический метод, суммы обменных оснований рассчитывали по Каппену–Гильковицу. Гранулометрический состав определяли методом пипетки с обработкой пирофосфатом натрия.

Динамику выделения  $\text{CO}_2$  при промерзании–оттаивании почвы оценивали в эксперименте общей продолжительностью 59 сут. Для инкубации почвенных образцов использовали стеклянные флаконы объемом 100 см<sup>3</sup>. Масса навески сухой почвы составляла 10 г. Образцы инкубировали при постоянной влажности (80% от предельной полевой влагоемкости) в автоматическом термостате с охлаждением Panasonic MIR-254. В ходе эксперимента последовательно проводили два цикла промерзания–оттаивания. Все почвенные варианты инкубировали в четырехкратной повторности.

В начале эксперимента проводили предварительную инкубацию почв, в течение которой температуру ступенчато понижали. Сначала флаконы выдерживали 14 дней при температуре  $+21^\circ\text{C}$ , затем 10 дней при  $+10^\circ\text{C}$  и 7 дней при  $+5^\circ\text{C}$ . Цикл

**Таблица 1.** Объекты исследования

Тип почвы	Природная зона, растительные ассоциации	Место отбора, географические координаты
Глеезем криотурбированный Reductaquic Turbic Cryosol (Loamic)	Тундра, мохово-осоково-кустарничковая ассоциация	Нижнеколымский район Республика Саха (Якутия) 69°25'25.8" N, 161°46'57.6" E
Криозем надмерзлотно-глееватый Reductaquic Turbic Cryosol (Loamic)	Тундра, кустарничково-моховая и кочкарно-пушицевая ассоциации	Там же; 69°22'01.7" N, 161°48'58.3" E
Подбур оподзоленный Spodic Turbic Cryosol (Arenic)	Тундра, кустарничково-лишайниковая ассоциация	Там же; 68°49'55.8" N, 161°01'30" E
Криозем грубогумусированный Histic Cryosol (Glacic)	Северная тайга, лиственничное редколесье	Билибинский район, Чукотский автономный округ, обнажение Молотковский Камень 68°12'33.2" N, 161°58'04.5" E
Подзол иллювиально-гумусовый Albic Rustic Podzol (Arenic)	Южная тайга, чернично-зеленомшный елово-сосновый лес с примесью осины и березы	Дмитровский район, Московская обл. 56°30'20.0" N, 37°39'20.9" E
Серая лесная почва Naplic Luvisol (Loamic, Agric)	Широколиственные леса, липово-кленово-осиновый лес	Московская область, Пушкино, 54°50'06.5" N, 37°34'21.8" E
Чернозем типичный Naplic Chernozem (Loamic, Pachic)	Лесостепь, разнотравно-злаковая степь	Воронежская область, Каменная степь 51°01'44.2" N, 40°43'38.5" E
Дерново-карбонатная почва (Рендзина) Rendzic Leptosol (Humic)	Лесостепь, "Докучаевская" лесополоса	Воронежская область, Дивногорье, 50°58'21.4" N, 39°18'13.2" E
Чернозем южный Naplic Chernozem (Siltic)	Степь, разнотравно-типчакково-ковыльная	Волгоградская область, Родниковский, 50°29'01.3" N, 42°36'33.2" E
Солонец луговой Gypsic Solonetz (Loamic, Columnic)	Степь, полынно-злаковая	Волгоградская область, 50°28'54.6" N, 42°36'14.0" E
Луговая гипсовая слитизированная почва Pellic Gypsic Protosalic Vertisol (Hypereutric)	Степь, разнотравно-злаково-осоковая	Волгоградская область, Новоаннинский район, Волгоградская область, Веселый, 50°30'20.8" N, 42°34'43.6" E
Светло-каштановая почва Naplic Kastanozem (Siltic)	Степь, ковыльно-типчакочная	Волгоградская область, Качалино, 49°06'12.9" N, 44°03'05.8" E
Бурая полупустынная почва Naplic Calcisol (Loamic)	Полупустыня, эфемерово-полынная	Астраханская область, Ахтубинск 48°16'01.2" N, 46°27'29.4" E

промерзания—оттаивания длился две недели. Замораживание образцов проводили при –5°С в течение 7 дней. Затем температуру повышали до +5°С (период оттаивания) и выдерживали при этой температуре еще 7 дней. Повторный цикл промерзания—оттаивания проводили по той же схеме.

Интенсивность выделения углекислого газа измеряли с различными интервалами в зависимости от температурного режима. Между измерениями флаконы были закрыты полиэтиленовой пленкой, что позволяло избежать быстрого пересыхания образцов и формирования во флаконе анаэробных условий за счет свободного газооб-

мена. Перед каждым измерением концентрации CO<sub>2</sub> с флаконов снимали пленку, проветривали и герметично закрывали резиновыми мембранами для накопления CO<sub>2</sub>. Время накопления углекислого газа длилось от нескольких часов до нескольких суток в зависимости от скорости его выделения. Концентрацию CO<sub>2</sub> в газовых пробах определяли на газовом хроматографе "Кристалл люкс-4000М". Скорость выделения CO<sub>2</sub> из почвы рассчитывали по формуле:

$$C = ((C_1 - C_0)V \times 12) / (100 \times 22.4tm),$$

где C – количество C–CO<sub>2</sub>, г/(г ч); C<sub>1</sub> – концентрация CO<sub>2</sub> во флаконе после накопления, об. %;

**Таблица 2.** Характеристика почвенных образцов (глубина отбора 0–10 см)

Тип почвы	N, %	pH <sub>KCl</sub> / pH <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	Σ обменных оснований	Обменная кислотность	CaCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub> гипса	Сухой остаток	<0.01 мм
			смоль(экв)/кг		%			
Глеезем криотурбированный	0.11	4.5/5.7	14.38	0.32	0	0	0.04	31.0
Криозем надмерзлотно-глееватый	0.18	3.8/5.0	12.13	1.70	0	0	0.07	24.2
Подбур оподзоленный	0.20	3.5/4.9	2.63	6.34	0	0	0.05	13.2
Криозем грубогумусированный	0.10	4.8/5.9	20.38	0.10	0	0	0.06	38.0
Подзол иллювиально-гумусовый, гор. О	2.81	2.7/3.9	3.75	8.60	0	0	0.19	8.2
Подзол иллювиально-гумусовый, гор. АО	0.16	2.7/3.8	2.85	3.24	0	0	0.03	7.3
Серая лесная почва	0.22	5.1/5.7	18.63	0.10	0	0	0.12	23.9
Чернозем типичный	0.43	6.9/7.6	53.13	0.10	5.7	0.01	0.15	37.2
Дерново-карбонатная почва	1.02	7.5/8.0	53.88	0.10	54.1	0.05	0.13	14.0
Чернозем южный	0.13	6.2/7.2	25.88	0.06	2.0	0.01	0.05	31.8
Солонец луговой	0.18	7.1/8.7	39.13	0.00	3.6	0.03	0.28	46.6
Луговая гипсовая слитизированная почва	0.46	7.4/7.9	54.13	0.00	7.0	4.02	2.04	50.8
Светло-каштановая почва	0.17	6.2/7.4	25.63	0.06	2.0	0.01	0.06	32.6
Буряя полупустынная почва	0.37	7.3/8.2	53.88	0.00	10.0	0.01	0.13	36.6

$C_0$  – начальная концентрация CO<sub>2</sub> во флаконе, объемные %;  $V$  – объем флакона, мл; 12 – молярная масса углерода, г/моль; 22.4 – молярный объем газа, л/моль;  $t$  – время экспозиции, ч;  $m$  – масса сухой навески, г.

Расчеты проводили в программе Microsoft Excel. Для статистического анализа применяли программу Statistica. Рассчитывали средние величины, стандартные отклонения (STD) и стандартные ошибки (SE) измерений эмиссии. При анализе использовали группировку данных в соответствии с разными периодами эксперимента.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В начале инкубации регистрировали интенсивное выделение углекислого газа, которое варьировало от 0.83 до 15.9 мкг С–СО<sub>2</sub>/(г ч). Наименьшее и наибольшее значения отмечены в вариантах с горизонтами АО и О подзола соответственно. Остальные варианты стартовали в диапазоне от 1 до 5 мкг С–СО<sub>2</sub>/(г ч). Начальный уровень эмиссии CO<sub>2</sub> был обусловлен откликом микроорганизмов на увлажнение образцов. По мере формирования

равновесного состояния во флаконах интенсивность выделения CO<sub>2</sub> уменьшалась. Коэффициент зависимости уровня эмиссии CO<sub>2</sub> от температуры во время циклов промерзания–оттаивания изменялся в широких пределах, но оставался значимым для всех почв, кроме дерново-карбонатной почвы и слитозема ( $R^2$  от 0.19 до 0.68;  $P < 0.05$ ).

Снижение температуры уменьшало диапазон варьирования и нивелировало различия дыхания исследуемых почв. Эмиссия CO<sub>2</sub> в период предварительной инкубации при температуре +5°C менялась от 0.01 до 0.16 мкг С/(г ч), в среднем составляя 0.06 мкг С/(г ч). В варианте с торфяным горизонтом подзола эмиссия CO<sub>2</sub> была на 1–2 порядка больше, чем в вариантах с органо-минеральными горизонтами других почв и достигала 1.26 мкг С/(г ч) (рис. 1). Вероятно, это связано с различным содержанием органического вещества в образцах [4]. Торфяной горизонт подзола характеризовался наибольшими значениями скорости выделения CO<sub>2</sub> при всех температурных режимах.

Промерзание почвенных образцов из всех представленных природных зон приводило к уменьше-

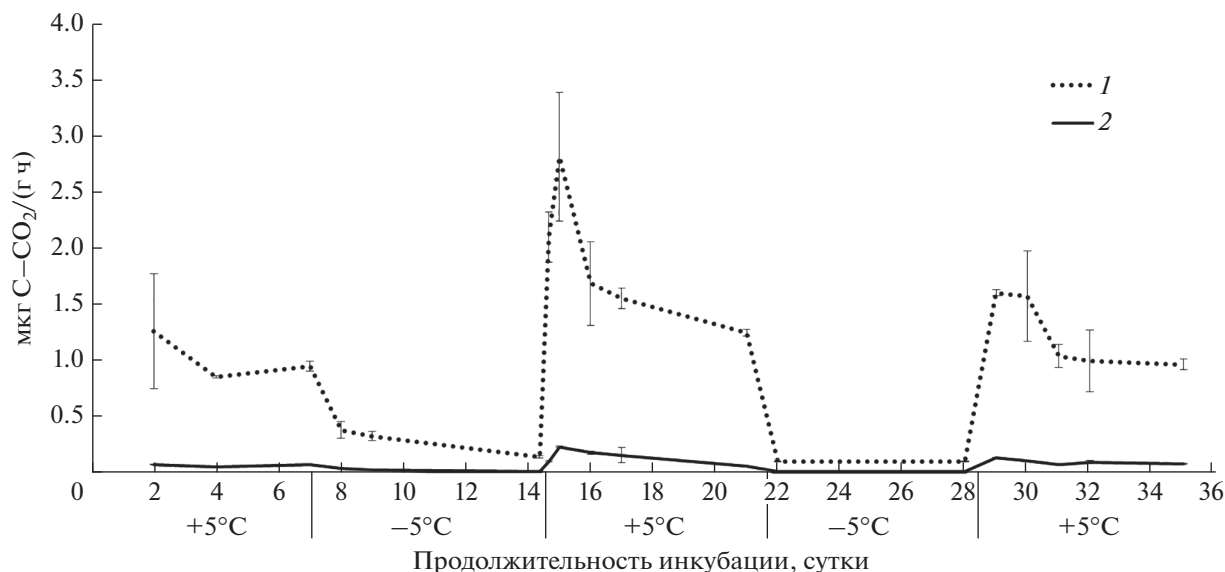


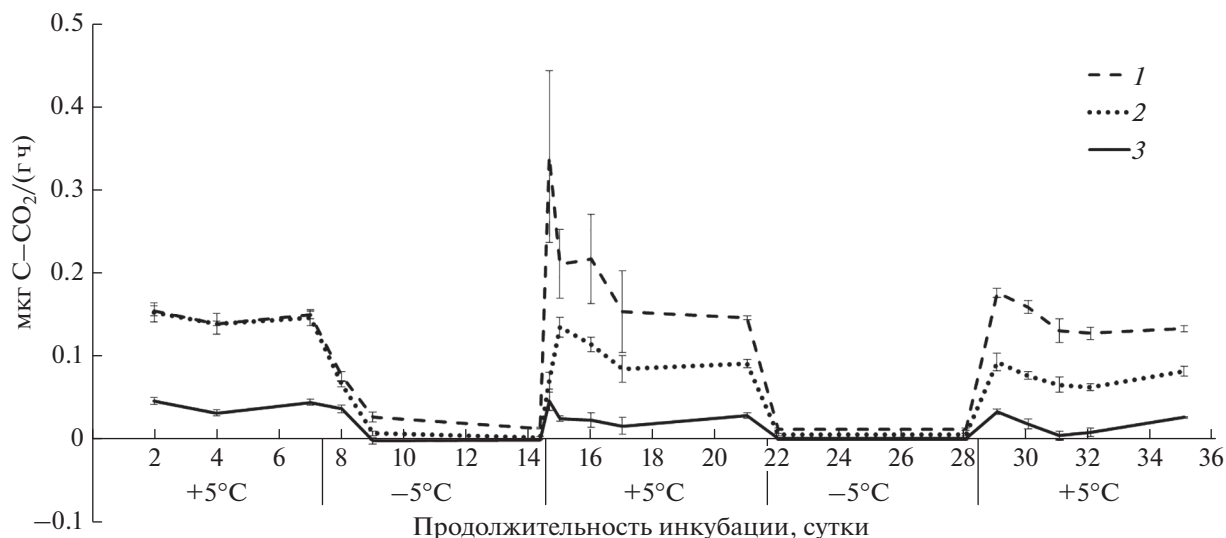
Рис. 1. Динамика выделения CO<sub>2</sub> из таежного подзола во время циклов промерзания–оттаивания: 1 – горизонт O, 2 – горизонт AO, ±STD.

нию интенсивности выделения CO<sub>2</sub> до значений, близких к 0 (рис. 1–6). Как правило, такое снижение эмиссии происходило за 1–2 дня. В ряде случаев в период промерзания образцов фиксировали отрицательные величины потока CO<sub>2</sub>. Это может свидетельствовать о низкой продукции CO<sub>2</sub>, затруднении газообмена между почвой и атмосферой и, вероятно, о поглощении CO<sub>2</sub> почвенными компонентами. Такая динамика эмиссии CO<sub>2</sub> была характерна для почвенных образцов, отобранных в лесостепной и степной зонах (рис. 4, 5). Эти почвы характеризуются присутствием карбоната кальция и, как следствие, нейтральным или щелочным pH. В таких условиях, возможно, происходит образование гидрокарбоната кальция (Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) и поглощение CO<sub>2</sub> в результате хемосорбции. Тем не менее, бурая полупустынная почва, также содержащая карбонаты, не продемонстрировала при промерзании снижения уровня эмиссии углекислого газа (рис. 6). Проведенный дисперсионный анализ выявил недостоверное различие между суммарными величинами потоков CO<sub>2</sub> за оба цикла промерзания–оттаивания в связи с наличием или отсутствием карбонатов в почвах.

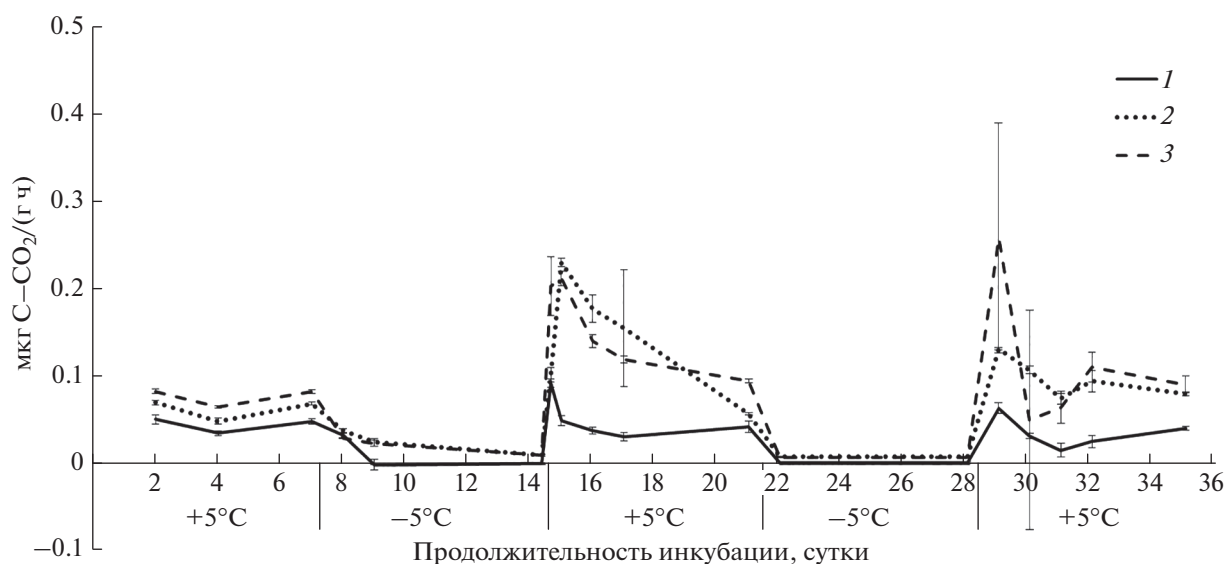
Некоторые исследователи при изучении циклов промерзания–оттаивания почвы с началом промерзания почвенных образцов наблюдали увеличение скорости выделения CO<sub>2</sub>, что по их мнению связано с дегазацией почвенного раствора [5, 21]. Показано, что при промерзании–оттаивании почвы поглощение и выделение CO<sub>2</sub> зависит от pH почвенного раствора [4]. В нашей работе только в варианте с солонцом (рис. 5) при промерзании

почвенного образца и переходе температуры от +5 до –5°C отмечено значимое увеличение выделения углекислого газа. При повторном промерзании солонца такой эффект не наблюдался.

В ходе эксперимента, при отрицательных температурах фиксировалось выделение CO<sub>2</sub>. Полученные результаты подтверждают то, что выделение CO<sub>2</sub> из промерзших почв возможно, но находится на низком уровне. Это хорошо согласуется с результатами исследований в естественных условиях, свидетельствующих о существовании зимних потоков CO<sub>2</sub> из почв [18, 20]. Низкая интенсивность выделения углекислого газа при отрицательных температурах обусловлена затрудненной диффузией вследствие высокой влажности и монокристаллического замерзания образцов [21]. Известно, что микроорганизмы в почве остаются активными при температуре грунта до –7°C [16, 20, 25, 27, 39]. Следовательно, при температуре –5°C, которая обеспечивает промерзание поверхностного горизонта, микроорганизмы способны потреблять почвенное органическое вещество и продуцировать CO<sub>2</sub>. Замечено, что при температурах, близких к 0°C, микроорганизмы смешивают потребление с детрита на растворенные соединения, в основном микробного происхождения [36]. Во время оттаивания микробный субстрат, богатый азотом, постепенно замещается бедным азотом детритом [36]. Также выявлено, что в результате промерзания происходит физическая деградация почвенных агрегатов и органических молекул, увеличивая доступность органического вещества для потребления микроорганизмами [10, 38].



**Рис. 2.** Динамика выделения  $\text{CO}_2$  из различных тундровых почв во время циклов промерзания–оттаивания: 1 – подбур оподзоленный, 2 – криозем надмерзлотно-глеватый, 3 – глеезем криотурбированный,  $\pm\text{STD}$ .



**Рис. 3.** Динамика выделения  $\text{CO}_2$  из почв лесной зоны во время циклов промерзания–оттаивания: 1 – криозем грубогумусированный, 2 – подзол (горизонт А0), 3 – серая лесная почва,  $\pm\text{STD}$ .

Предыдущими исследованиями установлено, что промерзание и последующее оттаивание почвы стимулирует резкое увеличение скорости выделения  $\text{CO}_2$  по сравнению с потоком  $\text{CO}_2$  до и после цикла промерзания–оттаивания [12, 21, 35]. В нашем исследовании проведено два цикла промерзания–оттаивания один за другим. При каждом оттаивании всех исследуемых почв зарегистрировано импульсное увеличение скорости выделения  $\text{CO}_2$ . Увеличение скорости эмиссии  $\text{CO}_2$  происходило одновременно с началом оттаивания почвы, достигая пика в тот же, а иногда на

следующий день, что хорошо согласуется с результатами Кургановой и Лопес де Гереню [4]. Усиленное выделение углекислого газа длилось 1–2 дня. В течение первого цикла промерзания–оттаивания максимальная скорость выделения  $\text{CO}_2$  варьировала в зависимости от типа почвы от 0.05 до 0.34  $\text{мкг С}/(\text{г ч})$ , превысив средние значения скорости выделения  $\text{CO}_2$  при температуре  $+5^\circ\text{C}$  в 1.4–3.3 раза.

Скорость выделения  $\text{CO}_2$  во время первого цикла промерзания–оттаивания была примерно в 1.5–2 раза больше, чем во время второго. Ис-

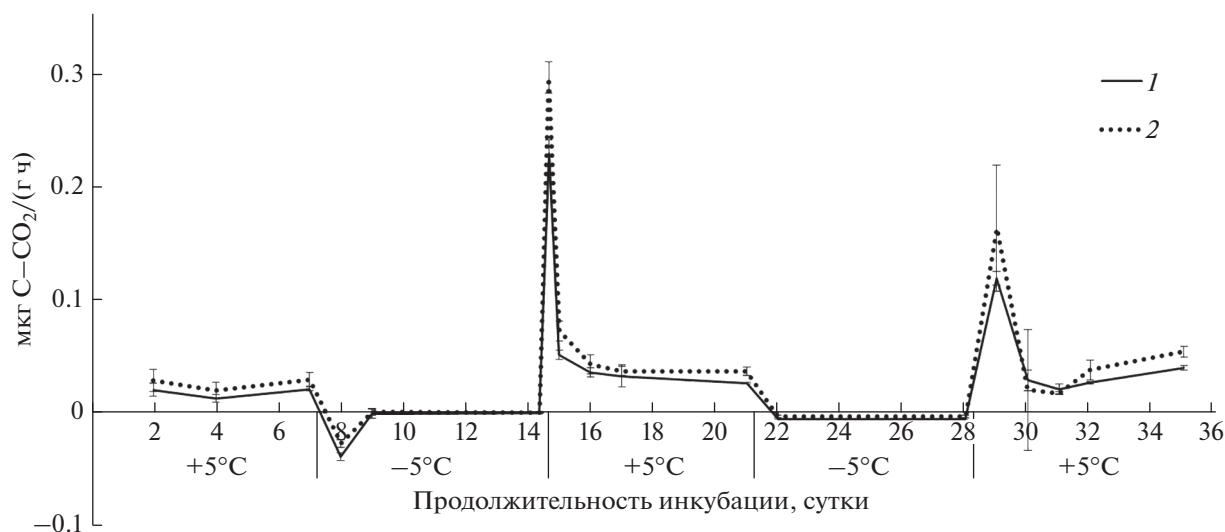


Рис. 4. Динамика выделения CO<sub>2</sub> из почв лесостепной зоны во время циклов промерзания–оттаивания: 1 – чернозем типичный, 2 – дерново-карбонатная почва, ±STD.

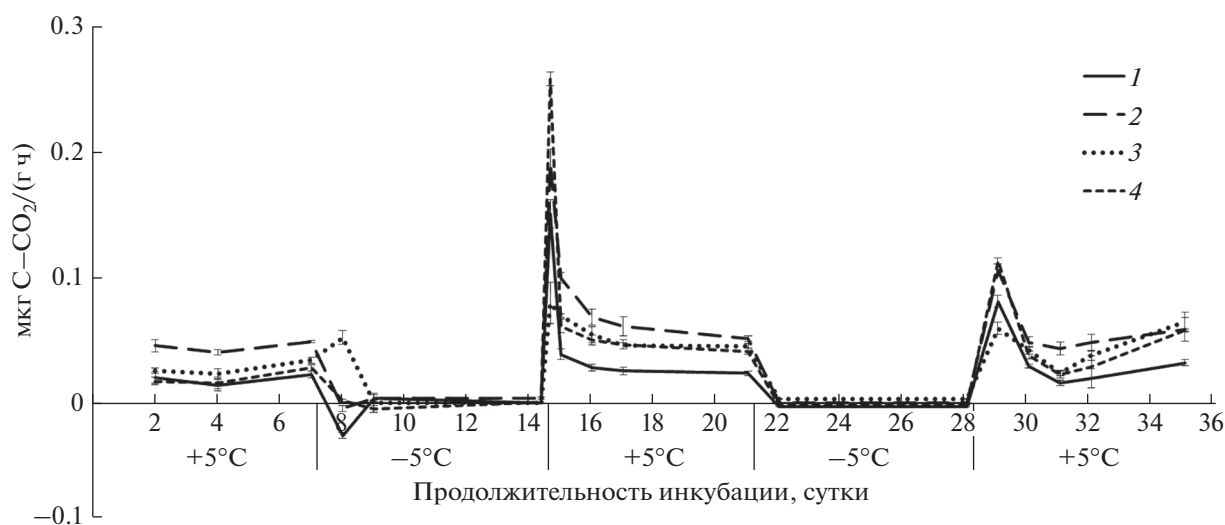


Рис. 5. Динамика выделения CO<sub>2</sub> из почв степной зоны в ходе циклов промерзания–оттаивания: 1 – чернозем южный, 2 – светло-каштановая почва, 3 – солонец, 4 – луговая слитизированная, ±STD.

ключение составила серая лесная почва, в которой оба всплеска эмиссии были сопоставимы (рис. 3). Суммарная эмиссия CO<sub>2</sub> во время второго периода оттаивания почв была в среднем на 14% меньше, чем в первый период (парный *t*-тест,  $n = 13, p = 0.003$ ). Считается, что при промерзании часть микроорганизмов гибнет, а при оттаивании происходит лизис погибших клеток, и их биомасса обеспечивает усиление выделения CO<sub>2</sub> [30, 35, 37]. При повторных циклах промерзания–оттаивания количество активных микроорганизмов уменьшается, как и их воздействие на органическое вещество почвы [21, 35]. В результате расходования доступного микроорганизмам субстрата эффект им-

пульсного увеличения выделения CO<sub>2</sub> от промерзания–оттаивания снижается [7]. Наши результаты укладываются в вышеизложенную теорию, которая в первую очередь охватывает лабораторные исследования с образцами небольшой массы. В то же время есть работы, показывающие, что промерзание и последующее оттаивание почв может не влиять на функционирование и структуру микробиоценоза почвы [19].

При сравнении реакции исследуемых почвенных образцов на промерзание–оттаивание установлено, что динамика выделения CO<sub>2</sub> имеет общие черты для всех исследованных типов почв,



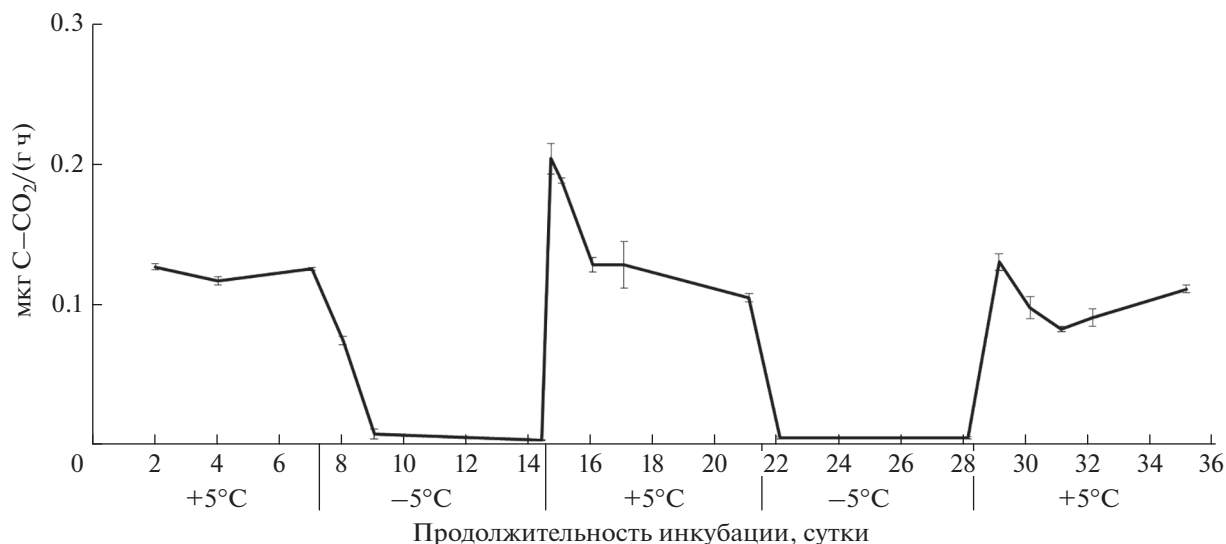


Рис. 6. Динамика выделения  $\text{CO}_2$  из бурой полупустынной почвы в течение циклов промерзания—оттаивания,  $\pm\text{STD}$ .

хотя различается количественно. Проведенный дисперсионный анализ не выявил достоверных различий величин всплесков, обусловленных зональностью или типовой принадлежностью почв. Полученные результаты свидетельствуют о том, что, по-видимому, в любой природной зоне может происходить усиление выделения  $\text{CO}_2$  из почвы в результате процессов промерзания—оттаивания.

Интенсивность выделения  $\text{CO}_2$  и других парниковых газов при оттаивании почвы зависит от ряда факторов, например, от влажности почвы [8, 32], ее температуры [17], глубины активного слоя [33] и др. По результатам корреляционного анализа установлена значимая отрицательная связь величины отклика с рН ( $R^2 = -0.50$ ,  $P < 0.05$ ), с суммой обменных оснований ( $R^2 = -0.44$ ,  $P < 0.05$ ) и положительная связь с обменной кислотностью ( $R^2 = 0.75$ ,  $P < 0.05$ ). Отмечена достоверная отрицательная связь с содержанием глинистой фракции ( $R^2 = -0.51$ ,  $P < 0.05$ ), следовательно легкий гранулометрический состав также положительно сказывается на увеличении отклика эмиссии.

Наибольший прирост эмиссии при оттаивании исследуемых образцов, как правило, отмечался у почв с большим содержанием органического вещества. Тем не менее корреляционный анализ не выявил достоверной связи между величиной отклика и содержанием углерода в образцах. Существует мнение, что различная величина эмиссионного отклика при промерзании—оттаивании почв обусловлена неодинаковой доступностью, количеством и характером органического субстрата [34]. Примером может служить различная реакция двух горизонтов подзола с разным содержанием, и возможно, с разной доступностью органического вещества в них (рис. 1).

Доступность для почвенных микроорганизмов содержащегося в почве органического вещества может быть оценена отношением эмиссии  $\text{C}-\text{CO}_2$  к запасам углерода органического вещества в почве ( $\text{C}-\text{CO}_2/\text{C}_{\text{орг}}$ ) (табл. 3). Видно, что некоторые почвы, имея большие запасы углерода, характеризуются относительно небольшой продукцией  $\text{CO}_2$ . Это свидетельствует о стабильности и малодоступности их органического вещества. Все эти свойства почвы прямо или косвенно влияют на почвенные микроорганизмы. Вероятно, интенсивность всплеска эмиссии зависит не только от количества углерода в почве, но также определяется величиной и структурой микробного сообщества [35, 40].

Таким образом, величина усиления эмиссии  $\text{CO}_2$  в результате промерзания определяется не природной зоной, а свойствами самих почв. При этом решающую роль играет содержание и доступность органического вещества в почве. Обобщая результаты нашего и других лабораторных исследований, можно заключить, что циклы промерзания—оттаивания почв безусловно влияют на скорость выделения из них  $\text{CO}_2$ . При этом отдельные циклы промерзания—оттаивания незначительно влияют на величину годовой эмиссии  $\text{CO}_2$  из почвы. Тем не менее значительное количество повторяющихся циклов промерзания—оттаивания может существенно отразиться на эмиссионном потоке  $\text{CO}_2$  за год, особенно в ходе отдельных сезонов и в пределах определенных природных зон.

Для более полного понимания влияния циклов промерзания—оттаивания почвы на баланс углерода в экосистемах необходимы детальные исследования в естественных условиях, которые



**Таблица 3.** Содержание углерода в почвах и его суммарная эмиссия

Тип почвы	C <sub>общ</sub> , %	C–CO <sub>2</sub> ,	мкг C–CO <sub>2</sub> /г C <sub>общ</sub>	
		мкг/г почвы	за 2 цикла	за весь эксперимент
Глеезем криотурбированный	1.2	9	679	14.3
Криозем надмерзлотно-глееватый	3	31	995	15.4
Подбур оподзоленный	2.8	57	1983	18.6
Криозем грубогумусированный	1.3	14	1032	15.9
Подзол, гор. О	40.5	480	1163	9.8
Подзол, гор. АО	4	36	872	6.0
Серая лесная	2.6	41	1532	12.8
Чернозем типичный	5.1	12	248	4.0
Дерново-карбонатная	15	16	114	1.8
Чернозем южный	1.5	10	679	8.2
Солонец луговой	1.9	18	884	13.9
Луговая слитизированная	5.1	17	335	6.9
Светло-каштановая	1.9	21	1087	12.7
Буряя полупустынная	4.1	40	923	12.9

позволят установить количество таких циклов и реальные величины эмиссии CO<sub>2</sub> в природе. Лабораторные исследования проводят с небольшими образцами почвенного материала, не содержащими живых корней растений, что ограничивает оценку влияния этих циклов только на микроорганизмы. В лабораторных экспериментах не учитывается, что краткосрочное промерзание—оттаивание затрагивает лишь верхние 1–2 см почвы, а CO<sub>2</sub> продуцирует вся почвенная толща. Образцы малого объема в отличие от почвенной толщи промерзают полностью. В связи с этим остается неясным вклад термодиффузии и других важных физических процессов. Очевидно, что механизмы, стоящие за резким приростом эмиссии CO<sub>2</sub> при оттаивании мерзлой поверхности почвы, намного сложнее, и не могут быть сведены лишь к гибели микробных клеток и их лизису.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Характер эмиссии углекислого газа во время циклов промерзания—оттаивания демонстрирует общие черты для всех представленных зональных типов почв. В проведенном эксперименте зарегистрирован поток CO<sub>2</sub> из почв, находящихся в мерзлом состоянии. Оттаивание почв способствовало резкому непродолжительному увеличению выделения CO<sub>2</sub>. Следовательно, промерзание—оттаивание одинаково влияет на различные типы почв, и значимый эмиссионный отклик может наблюдаться в любой природной зоне. Различия между величинами почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> даже

в пределах одной зоны обусловлены физико-химическими свойствами почв, в первую очередь разным содержанием и доступностью органического вещества. Так как в эксперименте использовали почвенные образцы без корневых систем растений, можно утверждать, что отклик микробного сообщества почвы на краткосрочное промерзание—оттаивание будет одинаков, несмотря на типовую принадлежность почвы. Установлено, что влияние единичных циклов промерзания—оттаивания почвы на годовой поток CO<sub>2</sub> незначительно. Напротив, частые циклы промерзания—оттаивания могут оказывать существенное влияние на годовую эмиссию CO<sub>2</sub>.

### БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор выражает благодарность Д.Г. Фёдорову-Давыдову и В.В. Каганову за помощь в отборе почвенных образцов, а также В.М. Семёнову за помощь при обработке статьи и Д.А. Хорошаеву за помощь при обработке данных в программе R.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках темы государственного задания “Исследование почвенных предшественников, источников и стоков парниковых газов в связи с климатическими изменениями”, № АААА-А18-118013190177-9. Работа с криоземами выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-05-00559А.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Воробьева Л.А.* Теория и практика химического анализа почв. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
2. *Гулев С.К., Катцов В.М., Соломина О.Н.* Глобальное потепление климата продолжается // Вестн. РАН. 2008. Т. 78. № 1. С. 20–27.
3. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России / Под ред. Г.А. Заварзина. М.: Наука, 2007. 315 с.
4. *Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О.* Вклад биотических факторов в усиление эмиссии CO<sub>2</sub> из почв при процессах замораживания–оттаивания // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1145–1152. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15090099>
5. *Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Туне Р., Лофтфильд Н.* Влияние процессов замораживания–оттаивания на эмиссию парниковых газов из пахотной буроземной почвы // Агрохимия. 2004. № 2. С. 23–30.
6. *Семенов В.М., Козут Б.М., Зинякова Н.Б., Масютенко Н.П., Малоюкова Л.С., Лебедева Т.Н., Тулина А.С.* Биологически активное органическое вещество в почвах европейской части России // Почвоведение. 2018. № 4. С. 457–472.
7. *Семенов В.М., Козут Б.М., Лукин С.М.* Влияние повторяющихся циклов высушивания–увлажнения–замораживания–оттаивания на активный пул органического вещества почвы // Почвоведение. 2014. № 4. С. 443–454.
8. *Blanc-Betes E., Welker J.M., Sturchio N.C., Chanton J.P., Gonzalez-Meler M.A.* Increases in winter precipitation and snow accumulation transform Arctic tundra from a sink to a source of methane // Global Change Biol. 2016. V. 22. P. 2818–2833. <https://doi.org/10.1111/gcb.13242>
9. *Campbell J.L., Ollinger S.V., Flerchinger G.N., Wicklein H., Hayhoe K., Bailey A.S.* Past and projected future changes in snowpack and soil frost at the Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire, USA // Hydrological Processes. 2010. V. 24. P. 2465–2480.
10. *Christensen S., Christensen B.T.* Organic matter available for denitrification in different soil fractions: effect of freeze/thaw cycles and straw disposal // J. Soil Sci. 1991. V. 42. P. 637–647.
11. *Coxson D.S., Parkinson D.* Winter respiratory activity in aspen woodland forest floor litter and soils // Soil Biol. Biochem. 1987. V. 19. P. 49–59.
12. *DeLuca T.H., Keeney D.R., Mc Carty G.W.* Effect of freeze-thaw events on mineralization of soil nitrogen // Biol. Ferti. Soils. 1992. V. 14. P. 116–120.
13. *Feng X., Nielsen L.L., Simpson M.* Responses of soil organic matter and microorganisms to freeze – thaw cycles // Soil Biol. Biochem. 2007. V. 39. P. 2027–2037.
14. *Groffman P.M., Hardy J.P., Driscoll C.T., Fahey T.J.* Snow depth, soil freezing, and fluxes of carbon dioxide, nitrous oxide and methane in a northern hardwood forest // Global Change Biol. 2006. V. 12. P. 1748–1760.
15. *Grogan P., Michelsen A., Ambus P., Jonasson S.* Freeze-thaw regime effects on carbon and nitrogen dynamics in sub-Arctic heath tundra mesocosms // Soil Biol. Biochem. 2004. V. 36. P. 641–654.
16. *Herrmann A., Witter E.* Sources of C and N contributing to the flush in mineralization upon freeze-thaw cycles in soils // Soil Biol. Biochem. 2002. V. 34. P. 1495–1505.
17. *Hicks Pries C.E., Schuur E.A.G., Crummer K.G.* Thawing permafrost increases old soil and autotrophic respiration in tundra: Partitioning ecosystem respiration using  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\Delta^{14}\text{C}$  // Global Change Biol. 2013. V. 19. P. 649–661.
18. *Holst J., Liu C., Yao Z., Brüggemann N., Zheng X., Giese M., Butterbach-Bahl K.* Fluxes of nitrous oxide, methane and carbon dioxide during freezing–thawing cycles in an Inner Mongolian steppe // Plant Soil. 2008. V. 308. P. 105–117. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9610-8>
19. *Koponen H.T., Jaakkola T., Keinanen-Toivola M.M., Kaipainen S., Tuomainen J., Servomaa K. et al.* Microbial communities, biomass, and activities in soils as affected by freeze thaw cycles // Soil Biol. Biochem. 2006. V. 38. P. 1861–1871.
20. *Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Rozanova L., Sapronov D., Myakshina T., Kudayarov V.* Annual and seasonal CO<sub>2</sub> fluxes from Russian southern taiga soils // Tellus. 2003. V. 55B. P. 338–344.
21. *Kurganova I., Teepe R., Lofffield N.* Influence of freeze thaw events on carbon dioxide emission from soil at different moisture and land use // Carbon Balance and Management. 2007. V. 2. P. 1–9.
22. *Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Khoroshaev D.A., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Zhmurin V.A., Kudayarov V.N.* Analysis of the Long-Term Soil Respiration Dynamics in the Forest and Meadow Cenoses of the Prioksko-Terrasny Biosphere Reserve in the Perspective of Current Climate Trends // Euras. Soil Sci. 2020. V. 53. № 10. P. 1421–1437. <https://doi.org/10.1134/S1064229320100117>
23. *Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O.* Effect of the Temperature and Moisture on the N<sub>2</sub>O Emission from Some Arable Soils // Euras. Soil Sci. 2010. V. 43. № 8. P. 919–928. <https://doi.org/10.1134/S1064229310080090>
24. *Kurganova I.N., Rozanova L.N., Myakshina T.N., Kudayarov V.N.* Monitoring of CO<sub>2</sub> emission from soils of different ecosystems in Southern part of Moscow region: data base analyses of long-term field observations // Euras. Soil Sci. 2004. V. 37. Sup. 1. P. 74–78.
25. *Kurganova I.N., Teepe R.* The effects of freezing-thawing processes on soil respiration activity // Euras. Soil Sci. 2003. V. 36. P. 976–985.
26. *Larsen K.S., Jonasson S., Michelsen A.* Repeated freeze-thaw cycles and their effect on biological processes in two arctic ecosystem types // Appl. Soil Ecol. 2002. V. 21. P. 187–195.
27. *Lopes de Gerenyu V.O., Kurganova I.N., Rozanova L.N., Kudayarov V.N.* Annual emission of carbon dioxide from soils of the Southern Taiga soils of Russia // Euras. Soil Sci. 2001. V. 34. P. 931–944.
28. *Lopes de Gerenyu V.O., Kurganova I.N., Teepe R., Lofffield N., Flessa H.* Effect of Contrasting Changes in Hydrothermic Conditions on the N<sub>2</sub>O Emission from Forest and Tundra Soils // Euras. Soil Sci. 2007. V. 40.

- № 7. P. 795–799.  
<https://doi.org/10.1134/S1064229307070137>
29. Ludwig B., Teepe R., Lopes de Gerenyu V., Flessa H. N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> emissions from gleyic soils in the Russian tundra and a German forest during freeze thaw periods – a microcosm study // *Soil Biol. Biochem.* 2006. V. 38. P. 3815–3819.
  30. Matzner E., Borken W. Do freeze-thaw events enhance C and N losses from soils of different ecosystems? A review // *Eur. J. Soil Sci.* 2008. V. 59. P. 274–284.
  31. Morkved P.T., Dörsch P., Henriksen T.M., Bakken L.R. N<sub>2</sub>O emissions and product ratios of nitrification and denitrification as affected by freezing and thawing // *Soil Biol. Biochem.* 2006. V. 38. P. 3411–3420.
  32. Natali S.M., Schuur E.A.G., Mauritz M., Schade J.D., Celis G., Crummer K.G., Johnston C., Kraepk J., Pegoraro E., Salmon V.G., Webb E. Permafrost thaw and soil moisture driving CO<sub>2</sub> and methane release from upland tundra // *J. Geophys. Res.: Biogeosci.* 2015. V. 120. P. 525–537.  
<https://doi.org/10.1002/2014JG002872>
  33. O'Donnell J.A., Harden J.W., McGuire A.D., Kanevskiy M.Z., Jørgenson M.T., Xu X. The effect of fire and permafrost interactions on soil carbon accumulation in an upland black spruce ecosystem of interior Alaska: Implications for post-thaw carbon loss // *Global Change Biol.* 2011. V. 17. P. 1461–1474.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02358.x>
  34. Priemé A., Christensen S. Natural perturbations, drying–wetting and freezing–thawing cycles, and the emission of nitrous oxide, carbon dioxide and methane from farmed organic soils // *Soil Biol. Biochem.* 2001. V. 33. P. 2083–2091.
  35. Schimel J.P., Clein J.S. Microbial response to freeze-thaw cycles in tundra and taiga soils // *Soil Biol. Biochem.* 1996. V. 28. P. 1061–1066.
  36. Schimel J.P., Mikan C. Changing microbial substrate use in Arctic tundra soils through a freeze–thaw cycle // *Soil Biol. Biochem.* 2005. V. 37. P. 1411–1418.
  37. Skogland T., Lomeland S., Goksoyr J. Respiratory burst after freezing and thawing of soil: Experiments with soil bacteria // *Soil Biol. Biochem.* 1988. V. 20. P. 851–856.
  38. Soulides D.A., Allison F.E. Effects of drying and freezing soils on carbon dioxide production, available mineral nutrients, aggregation, and bacterial population // *Soil Sci.* 1961. V. 91. P. 291–298.
  39. Teepe R., Brumme R., Beese F. Nitrous oxide emission from soil during freezing and thawing periods // *Soil Biol. Biochem.* 2001. V. 33. P. 1269–1275.
  40. Treat C.C., Wollheim W.M., Varner R.K., Grandy A.S., Talbot J., Froking S. Temperature and peat type control CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> production in Alaskan permafrost peats // *Global Change Biol.* 2014. V. 20. P. 2674–2686.  
<https://doi.org/10.1111/gcb.12572>
  41. Venäläinen A., Tuomenvirta H., Heikinheimo M., Kellomäki S., Peltola H., Strandman H., Vaisanen H. Impact of climate change on soil frost under snow cover in a forested landscape // *Climate Res.* 2001. V. 17. P. 63–72.
  42. Wang F.L., Bettany J.R. Influence of freeze-thaw and flooding on the loss of soluble organic carbon and carbon-dioxide from soil // *J. Environ. Quality.* 1993. № 22. P. 709–714.

## The CO<sub>2</sub> Emission during Laboratory Freezing-Thawing of Soils from Various Natural Zones of Russia

D. V. Saprnov\*

*Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow oblast, 142290 Russia*

\*e-mail: [sadmvas@gmail.com](mailto:sadmvas@gmail.com)

Short-term freezing of the soil surface can occur practically throughout the entire territory of Russia. This phenomenon stimulates flushes of soil CO<sub>2</sub> emissions. In this regard, in laboratory conditions, we studied the dynamics of CO<sub>2</sub> release from soils of various natural zones with periodically repeating short-term freezing–thawing cycles. For the study, samples were taken from the upper horizons of the following soils: Reductaquic Turbic Cryosol (Loamic), Reductaquic Turbic Cryosol (Loamic), Spodic Turbic Cryosol (Arenic), Histic Cryosol (Glacic), Albic Rustic Podzols (Arenic), Haplic Luvisols (Loamic, Aric), Haplic Chernozems (Loamic, Pachic), Rendzic Leptosols (Humic), Haplic Chernozems (Siltic), Gypsic Solonetz (Loamic, Columnic), Gypsic Vertisol (Hypereutric), Haplic Kastanoszem (Siltic), Haplic Calcisols (Loamic). It was found that the dynamics of CO<sub>2</sub> release during the freezing–thawing cycle were similar for all the presented soils. The release of CO<sub>2</sub> from frozen samples was reliably recorded. Subsequent soil thawing promoted a pulse increase in the CO<sub>2</sub> release in comparison with that before and after the freezing–thawing cycle regardless of the type of soil. Thus, on a wide range of soils, it has been shown for the first time that a significant response of CO<sub>2</sub> emission to freezing–thawing of the soil surface can occur in any natural zone. The magnitude of the response depends on the properties of the soil, primarily on the content of organic matter in it. The influence of single cycles of soil freezing and thawing on the annual CO<sub>2</sub> flux is insignificant. However, frequent freeze–thaw cycles can have an impact on the CO<sub>2</sub> flux, both within individual seasons and throughout the year.

*Keywords:* cycles of soil freezing–thawing, soil respiration, CO<sub>2</sub> emission, frosts, carbon budget