

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОМЕРЗАНИЯ-ОТТАИВАНИЯ НА ВЫДЕЛЕНИЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА ИЗ ПОЧВЫ И РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Д. В. Сапронов¹, Т. Н. Крамарева², Ж. С. Сапрыкина²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН

² Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию: 13.01.2014 г.

Аннотация. Исследовано влияние промерзания-оттаивания на выделение CO₂ из почвы и растительных субстратов. Установлено, что микроорганизмы остаются активными при отрицательных температурах, но скорость выделения CO₂ значительно снижается по сравнению с контролем (+2°C). Листовой опад и древесина не являются сколько-нибудь существенным источником CO₂ при низких температурах. Растительные остатки будут активно разлагаться при более высоких температурах в условиях активного микробного роста.

Ключевые слова: дыхание почвы, растительный опад, древесина, эмиссия углекислого газа, промерзание-оттаивание почвы.

Abstract. The study was aimed to investigate the dynamics of CO₂ emission from the soil (0-10 cm) and various plant substrates (deciduous tree litter and aspen wood) during the freezing-thawing process. It was found that microorganisms were active at low temperatures but the CO₂ release at negative temperatures (-4°C) was significantly slower compared to the control (+2°C). The tree litter and wood are not any important sources of CO₂ at low temperatures. The active decomposition of plant residues will occur at higher temperatures which are more favorable for the microbial growth.

Keywords: soil respiration, plant litter, wood, carbon dioxide emissions, CO₂, the freezing - thawing of the soil.

Промерзание и оттаивание верхнего слоя почвы является обычным природным явлением в зонах с умеренным и холодным климатом. В умеренной зоне оно наиболее часто происходит в осенний и весенний периоды, а в арктической и субарктической зоне эти процессы типичны на протяжении всего вегетационного периода [1, 2].

Промерзание-оттаивание может влиять как на интенсивность выделения углекислого газа (CO₂) из почв в отдельные сезоны, так и в целом, на годовой баланс углерода в экосистемах. Исследования ряда авторов показывают, что промерзание и последующее оттаивание почвы вызывает увеличение скорости выделения CO₂ из почвы, наблюдаемое в форме краткосрочных всплесков [1-6]. Вместе с тем, имеются данные о том, что после

промерзания-оттаивания изменение скорости выделения CO₂ из почв незначительно и не превышает значений обычного варьирования [7].

Механизм увеличения скорости выделения CO₂ в процессе промерзания-оттаивания изучен недостаточно. Данный феномен может быть обусловлен как физическими, так и биологическими факторами. Наиболее распространённым объяснением всплеска эмиссии CO₂ во время оттаивания является то, что часть активной микрофлоры гибнет во время промерзания, а при последующем оттаивании высвобождается доступное органическое вещество, которое усваивается выжившими микроорганизмами [8-12]. Однако, кроме микробной биомассы в почве имеется ряд других источников углерода, например гумифицированное почвенное органическое вещество, растительные остатки, корни растений, которые, подвергаясь

воздействию чередующихся циклов промерзания-оттаивания, могут способствовать увеличению потока CO_2 из почв.

В связи с этим цель представляемой работы состояла в оценке влияния процессов промерзания-оттаивания на скорость выделения CO_2 из почв и растительных субстратов (лиственный опад, древесина).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Краткая характеристика объектов исследования. Динамика выделения CO_2 при промерзании-оттаивании изучалась в лабораторных условиях на примере верхнего, наиболее гумусированного слоя почвы, листового опада и древесины. Смешанный образец почвы был отобран из гумусового горизонта (слой 0-10 см) серой лесной тяжелосуглинистой почвы под вторичным листовым лесом (503Л2К ед. Д и Б) в окрестностях г. Пушкино Московской области (54°20'N, 37°37'E). Основные лесообразующие породы: осина (*Populus tremula L.*), липа сердцевидная (*Tilia cordata Mill.*) и берёза повислая (*Betula pendula Roth.*). Подлесок и второй ярус представлены клёном платановидным (*Acer platanoides L.*). Лиственный опад отбирали с поверхности почвы весной. Для эксперимента использовали также древесину осины средней степени разложения. Основные характеристики серой лесной почвы приведены в таблице 1. Содержание С в опаде и древесине составляло 47 и 51%, а соотношение углерода и азота в данных пулах составило 60 и 78, соответственно.

Подготовка образцов для проведения эксперимента. Почву высушивали при комнатной температуре до воздушно-сухого состояния, пе-

ремешивали, выбирали растительные остатки и просеивали через сито с размером ячеек 2 мм. Листья и древесину измельчали ножницами до размеров 0,5-1 см и перемешивали до получения однородной массы. Весовым методом определяли начальную влажность почвы и растительных субстратов. Определение полной полевой влагоёмкости (ППВ) проводили согласно общепринятой методике [13]. Величины ППВ для почвы, листового опада и древесины составили 64, 300 и 600%, соответственно.

Для проведения эксперимента во флаконы объемом 250 мл помещали по 20 г почвы и по 1 г растительного материала (в пересчёте на абсолютно сухую массу) и увлажняли до состояния, соответствующего 80% от ППВ.

Проведение лабораторного эксперимента по замораживанию-оттаиванию почв и растительных субстратов. Чтобы приблизить условия эксперимента к естественным, была проведена двухнедельная предварительная инкубация почв и растительных субстратов, в течение которой температуру постепенно снижали от +15°C до +2°C. Затем в течение 10 дней флаконы выдерживали при +2°C. Промерзание образцов проводили при -4°C в течение 5 дней. Затем температуру снова повышали до +2°C (период оттаивания) и выдерживали при этой температуре еще 5 дней. Контрольные образцы почвы и растительного материала постоянно инкубировали при температуре +2°C. Флаконы размещали в автоматическом инкубаторе Panasonic MIR-254. Все определения были выполнены в 3-х кратной повторности.

Скорость выделения CO_2 из почв и растительных субстратов во время эксперимента определяли ежедневно, а в периоды промерзания и оттаивания до 4 раз в сутки. С этой целью, за 1-2 часа (в зависимости от текущего температурного режима) непосредственно перед определением скорости выделения CO_2 флаконы герметично закрывались резиновыми мембранами для накопления углекислого газа во флаконах. Затем шприцем (объем 1 мл) из флаконов отбирали газовые пробы для определения содержания накопленного CO_2 с помощью газового хроматографа «Кристалл люкс – 4000М». Скорость выделения CO_2 из почвы и растительных субстратов (R_{CO_2} , мг С/г/час) рассчитывали по формуле:

$$R_{\text{CO}_2} = (C_1 - C_0) \cdot V \cdot 12 \cdot 10 / (22.4 \cdot t \cdot m) \quad (1)$$

где: C_1 – концентрация CO_2 во флаконе после накопления, объемные %; C_0 – начальная концентрация CO_2 во флаконе, объемные %; V – объём

Таблица 1.

Характеристики серой лесной почвы (слой 0-10 см)

Содержание С в гумусовом горизонте, г С/кг почвы	24
Отношение С/N	12.7
ППВ, %	64
pH водн.	6.22
pH сол	5.18
Сумма обменных оснований, мг-экв/100 г	15.48
Гидролитическая кислотность, мг-экв/100 г	4.23
Н общ. мг-экв ⁺ /100 г	0.01
Песок:пыль:глина	3:5:2

флакона, мл; t – время накопления, час; m – масса абсолютно сухой навески, г.

Обработка данных. Полученные в ходе эксперимента данные по определению скорости выделения CO_2 из почв и растительных субстратов были разбиты на 3 группы в соответствии с различными стадиями цикла промерзания-оттаивания (ЦПО): до промерзания ($+2^\circ\text{C}$), промерзание (-4°C) и оттаивание ($+2^\circ\text{C}$). Внутри полученных групп данных были рассчитаны средние величины интенсивности выделения CO_2 и стандартные ошибки (SE).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Динамика выделения CO_2 из почвы во время ЦЗО. Эмиссия CO_2 из почвы при температуре $+2^\circ\text{C}$ до начала промерзания изменялась от 0.10 до 0.40 мг С/г/час в среднем составляя 0.23 ± 0.01 мг С/г/час (Табл. 2). При переходе температуры из положительной области в отрицательную наблюдалось снижение скорости выделения CO_2 до 0.14 ± 0.02 мг С/г/час, но различия между дыханием промерзшей и контрольной (не промерзающей) почвы были не всегда достоверными (Рис. 1). Во время промерзания почвы мы не наблюдали увеличения скорости выделения CO_2 , обусловленного его высвобождением из почвенного раствора, что было обнаружено в экспериментах других исследователей [6, 14]. Полученные нами результаты отчетливо показали, что выделение CO_2 продолжалось из полностью промерзших почв, что хорошо согласуется с данными натурных экспериментов, свидетельствующих о существовании зимних потоков CO_2 из почв [15]. Таким образом, можно констатировать, что почвенное микробное сообщество продолжает быть активным и при относительно небольших (-4°C) отрицательных температурах. В ряде лабораторных исследований было показано, что микроорганизмы остаются способными к деструкции почвенного органического вещества до -7°C [5, 15, 16, 17, 18].

А в работах Н.С. Паникова с соавт. [15, 16] была подтверждена деятельность почвенного микробного сообщества при значительно более низких температурах (-16 и -39°C).

В литературе имеются указания на то, что промерзание и последующее оттаивание почвы стимулирует резкое увеличение скорости выделения CO_2 в несколько раз по сравнению с потоком CO_2 до и после цикла промерзания оттаивания [2, 4, 6]. В нашей работе во время оттаивания почвы было зарегистрировано два пика увеличения скорости выделения CO_2 (Рис. 1). Такой ход динамики выделения CO_2 отмечен впервые. Первый пик начинался сразу после начала оттаивания почвы и длился примерно один день. В течение первого пика скорость выделения CO_2 достигла 0.3 мг С/г/час, незначительно превысив средние значения скорости выделения CO_2 , но оставаясь в пределах варьирования показателя. Примерно через сутки с момента начала оттаивания почвы начался второй пик выделения CO_2 , который длился двое суток. Скорость выделения CO_2 во время второго пика достигла 0.78 мг С/г/час. Средняя скорость выделения CO_2 при оттаивании почвы составляла 0.29 ± 0.09 мг С/г/час, что на 26% выше, чем дыхательная активность почв до промерзания (Табл. 1).

В целом, по результатам проведенного эксперимента, говорить о том, что промерзание-оттаивание почвы способствует значительному увеличению скорости эмиссии CO_2 будет некорректно, поскольку различия между средней скоростью выделения CO_2 из почвы подвергшейся промерзанию и контрольным вариантом (без промерзания) не достоверны.

Динамика выделения CO_2 из опада и древесины во время ЦЗО

Характер динамики выделения углекислого газа из растительных субстратов во время цикла промерзания-оттаивания имел несколько иной ха-

Таблица 2.

Средние скорости выделения CO_2 ($\pm\text{SE}$) из почвы и растительных субстратов в различные стадии цикла промерзания-оттаивания

Объект	Стадии цикла промерзания-оттаивания		
	до промерзания $+2^\circ\text{C}$	промерзание -4°C	оттаивание $+2^\circ\text{C}$
Почва (контроль; $+2^\circ\text{C}$)	0.24 ± 0.03	0.16 ± 0.01	0.20 ± 0.04
Почва с промерзанием	0.23 ± 0.01	0.14 ± 0.02	0.29 ± 0.09
Опад (контроль; $+2^\circ\text{C}$)	30.91 ± 3.03	28.26 ± 1.18	20.62 ± 2.68
Опад с промерзанием	25.77 ± 1.29	9.36 ± 1.18	10.55 ± 1.16
Древесина (контроль; $+2^\circ\text{C}$)	20.51 ± 3.27	19.32 ± 1.21	12.55 ± 0.746
Древесина с промерзанием	18.54 ± 1.36	12.57 ± 3.95	11.28 ± 0.91

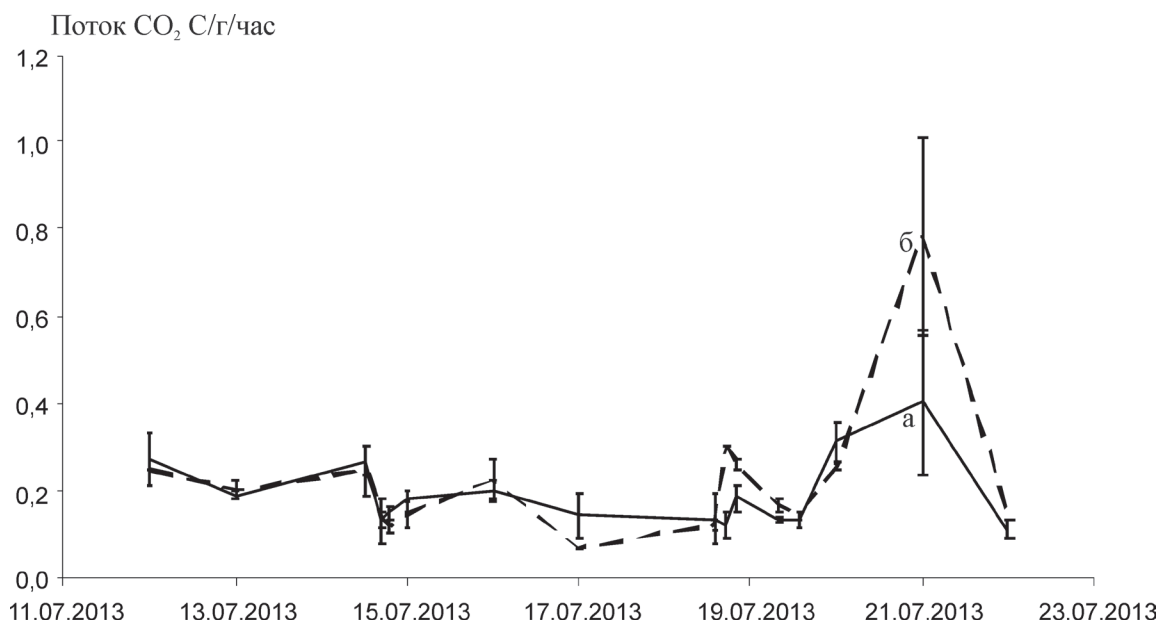


Рис. 1. Динамика скорости выделения CO₂ из почвы в течение цикла промерзания-оттаивания. Обозначения: почва без промораживания (а), почва с промораживанием (б)

рактически, чем при промерзании-оттаивании почвенных образцов, а именно: наблюдалась тенденция постепенного снижения интенсивности выделения CO₂ во время всего эксперимента (Рис.2 и 3). Причем это снижение наблюдалось как в контрольных образцах опада и древесины (на 33-40% по сравнению с начальными значениями интенсивности выделения CO₂ при +2°C), так и в образцах растительных субстратов, которые подвергались воздействию отрицательных температур (на

38-60%). Интенсивность выделения CO₂ при разложении и опада, и древесины значительно превышала таковое для почвы в течение всех стадий цикла промерзания-оттаивания (Табл. 2).

Промерзание растительных субстратов приводило к заметному уменьшению скорости их разложения и скорости выделения CO₂ из заморозшего опада и древесины были соответственно в 2.5 и 1.5 раза ниже, чем в контрольных вариантах. В начале периода промерзания в варианте с древеси-

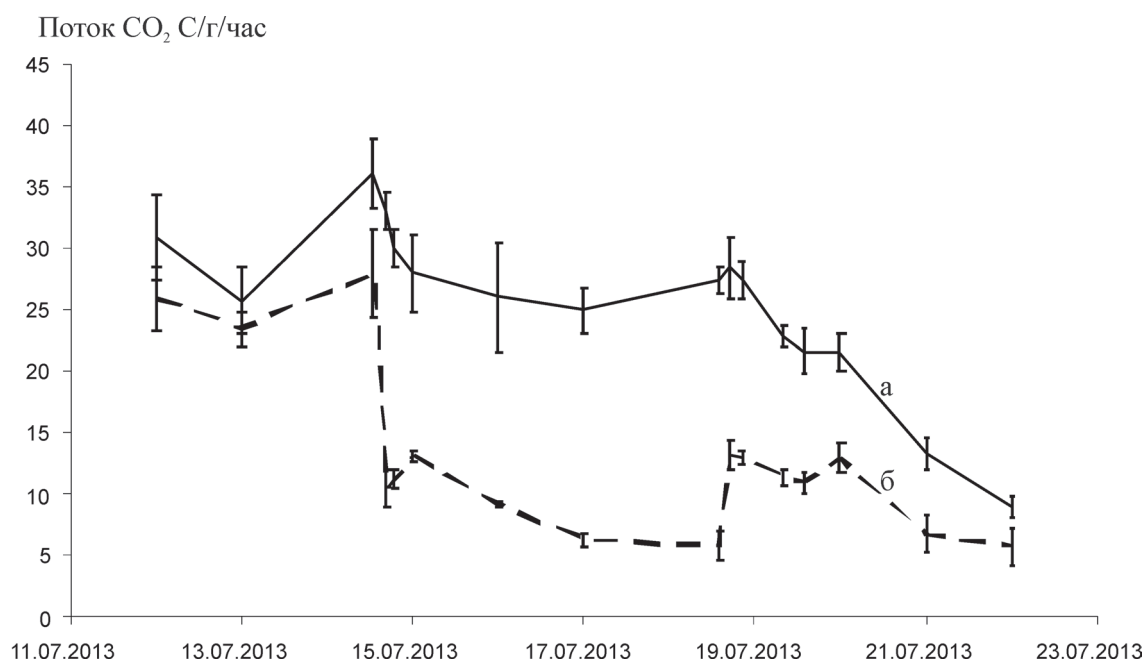


Рис. 2. Динамика скорости выделения CO₂ при разложении опада во время ЦЗО. Обозначения: опад без промораживания (а), опад с промораживанием (б)

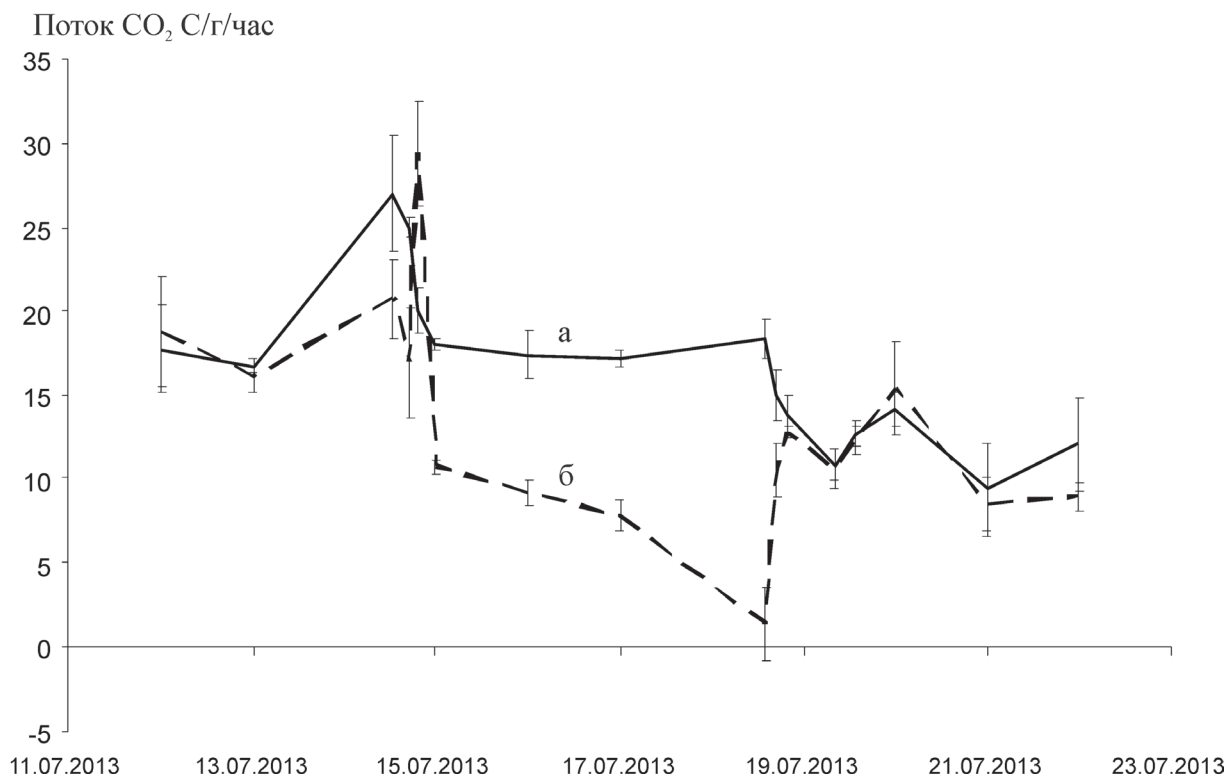


Рис. 3. Динамика скорости выделения CO₂ при разложении древесины во время ЦЗО. Обозначения: древесина без промораживания (а), древесина с промораживанием (б).

ной (Рис.3) был зарегистрирован всплеск выделения CO₂, соответствующий фазе кристаллизации воды [14]. По-видимому, это объясняется гораздо большей влагоёмкостью древесины (600%) по сравнению с опадом (300%).

Оттаивание растительных субстратов не привело к сколько-нибудь значительному увеличению скорости выделения CO₂ (Рис. 2 и 3) и всплеск дыхательной активности, отмечаемый другими исследователями для почв, в нашем эксперименте с растительными субстратами не наблюдался. Это может быть обусловлено недостатком в растительных субстратах доступного азота, который необходим для активной жизнедеятельности микроорганизмов. Так, соотношение C/N в опаде составляет 60, а в древесине - 78. Исследования, проведённые нами ранее с использованием ¹⁴C, показали, что неразложившиеся растительные остатки не являются основным источником углерода для микроорганизмов при температурах близких к нулю [19]. Тем не менее, известно также, что промерзание-оттаивание приводит к физическому разрушению почвенных агрегатов и больших органических молекул, увеличивая доступность органического вещества для микроорганизмов, и способствует его разложению [12, 20, 21, 22].

ВЫВОДЫ

Характер динамики выделения углекислого газа во время цикла промерзания-оттаивания почв и растительных субстратов существенно отличается между собой. Так, промерзание и последующее оттаивание почвы обуславливает некоторое, не всегда достоверное, увеличение скорости выделения CO₂ из почв, а при оттаивании растительных остатков скорость деструкции постепенно снижается и после оттаивания не достигает начальных значений, регистрируемых до замораживания.

Микроорганизмы, являющиеся основными деструкторами органического вещества почв и растительных субстратов, остаются активными при отрицательных температурах, но скорость выделения CO₂ в процессе разложения органических материалов значительно снижается по сравнению с контролем (+2°C).

Оттаивание растительных субстратов не вызвало сколько-нибудь значительного увеличения скорости выделения CO₂, и позволяет констатировать, что лиственный опад и древесина не являются сколько-нибудь существенным источником диоксида углерода при низких температурах. По-видимому, активное разложение растительных остатков будет иметь место при более высоких

температурах в условиях активного микробного роста.

Работа выполнялась при финансовой поддержке РФФИ (проекты 12-04-00201а и 12-05-00197а), программы Президиума РАН №4 и гранта Научная школа № 6620.2012.4.

Авторы выражают благодарность д.б.н. Кургановой И.Н. за критические замечания и предложения по тексту статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Skogland T. Respiratory burst after freezing and thawing of soil: experiments with soil bacteria / T. Skogland, S. Lomeland, J. Goksoyr // *Soil Biology and Biochemistry*. — 1988. — Vol. 20. — P. 851-856.
2. Schimel J.P. Microbial response to freeze-thaw cycles in tundra and taiga soils / J.P. Schimel, J.S. Clein // *Soil Biology and Biochemistry*. — 1996. — Vol. 28. — P. 1061-1066.
3. Курганова И.Н. Эмиссия и баланс диоксида углерода в наземных экосистемах России: Автореф. дисс. на соиск.учен.степ. док. биол.наук / И.Н. Курганова. — М., 2010. — 50 с.
4. DeLuca T.H. Effect of freeze-thaw events on mineralization of soil nitrogen / T.H. DeLuca, D.R. Keeney, G.W. Mc Carty // *Biology and Fertility of Soils*. — 1992. — Vol. 14. — P. 116-120.
5. Herrmann A. Sources of C and N contributing to the flush in mineralization upon freeze-thaw cycles in soils / A. Herrmann, E. Witter // *Soil Biology and Biochemistry*. — 2002. — Vol. 34. — P. 1495-1505.
6. Kurganova I. Influence of freeze-thaw events on carbon dioxide emission from soil at different moisture and land use / I. Kurganova, R. Teepe, N. Lofffield // *Carbon Balance and Management*. — 2007. 2:2. — P. 1-9.
7. Wang F.L. Influence of freeze-thaw and flooding on the loss of soluble organic carbon and carbon-dioxide from soil / F.L. Wang, J.R. Bettany // *Journal of Environmental Quality*. — 1993. — Vol. 22. — P. 709-714.
8. Ivarson K.C. Effect of freezing on the free amino acids in soil / K.C. Ivarson, F.J. Sowden // *Canadian Journal of Soil Science*. — 1966. — Vol. 46. — P. 115-120.
9. Ivarson K.C. Effect of frost action and storage of soil at freezing temperatures on the free amino acids, free sugars, and respiratory activity of soil / K.C. Ivarson, F.J. Sowden // *Canadian Journal of Soil Science*. — 1970. — Vol. 50. — P. 191-198.
10. Jacinthe P.A. Overwinter soil denitrification activity and mineral nitrogen pools as affected by management practices / P.A. Jacinthe, W.A. Dick, L.B. Owens // *Biology and Fertility of Soils*. — 2002. — Vol. 36. Part 1. — P. 1-9.
11. Morley C.R. Effects of freeze-thaw stress on bacterial population on soil microcosms / C.R. Morley, J.A. Trofimov, D.C. Coleman, C. Cambardella // *Microbial Ecology*. — 1983. — Vol. 9. — P. 329-340.
12. Soulides D.A. Effects of drying and freezing soils on carbon dioxide production, available mineral nutrients, aggregation, and bacterial population / D.A. Soulides, F.E. Allison // *Soil Science*. — 1961. — Vol. 91. — P. 291-298.
13. Вадюнина А.Ф. Методы исследования физических свойств почв / А.Ф. Вадюнина, З.А. Корчагина. — М.: Агропромиздат, 1986. — 416 с.
14. Лопес де Гереню В.О. Влияние процессов замораживания-оттаивания на эмиссию парниковых газов из пахотной бурозёмной почвы / В.О. Лопес де Гереню, И.Н. Курганова, Р. Типе, Н. Лофтфильд // *Агрохимия*. — 2004. — № 2. — С. 23-30.
15. Kurganova I. Annual and seasonal CO₂ fluxes from Russian southern taiga soils / I. Kurganova, V. Lopes de Gerenyu, L. Rozanova, D. Sapronov, T. Myakshina, V. Kudeyarov // *Tellus*. — 2003. — Vol. 55B. — P. 338-344.
16. Kurganova, I.N. The effects of freezing-thawing processes on soil respiration activity / I.N. Kurganova, R. Teepe // *Eurasian Soil Science*. — 2003. — Vol. 36. — P. 976-985.
17. Lopes de Gerenyu. Annual emission of carbon dioxide from soils of the Southern taiga zone of Russia / V.O. Lopes de Gerenyu, I.N. Kurganova, L.N. Rozanova, V.N. Kudeyarov // *Eurasian Soil Science*. — 2001. — Vol. 34. — P. 931-944.
18. Teepe R. Nitrous oxide emission from soil during freezing and thawing periods / R. Teepe, R. Brumme, F. Beese // *Soil Biology and Biochemistry*. — 2001. — Vol. 33. — P. 1269-1275.
19. Sapronov D. CO₂ sources by freezing-thawing of soil / D. Sapronov, Y. Kuzyakov // *DBG*. — 2003. — Band 102/Heft 2. — P. 393-394.
20. Christensen S. Organic matter available for denitrification in different soil fractions: effect of freeze/thaw cycles and straw disposal / S. Christensen, B.T. Christensen // *Journal of Soil Science*. — 1991. — Vol. 42. — P. 637-647.
21. Panikov N.S. Cold season CH₄ and CO₂ emission from boreal peat bogs (West Siberia): Winter fluxes and thaw activation dynamics / N.S. Panikov, S.N. Dedysh // *Global Biogeochemical Cycles*. — 2000. — Vol. 14. — P. 1071-1080.

22. Panikov N.S. Microbial activity in soils frozen to below -39°C / N.S. Panikov, P.W. Flanagan, W.C. Oechel, M.A. Mastepanov, T.R. Christensen // Soil Biol. Biochem. — 2006. — Vol. 38. — P.785-794.
-

Сапронов Дмитрий Васильевич — старший научный сотрудник, кандидат биологических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, лаборатория почвенных циклов азота и углерода; e-mail: sadmvas@gmail.com

Крамарева Татьяна Николаевна — кандидат биологических наук, старший преподаватель кафедры экологии и земельных ресурсов Воронежского государственного университета; e-mail: tkramarewa@mail.ru

Сапрыкина Жанна Сергеевна — студент, кафедры экологии и земельных ресурсов, Воронежский государственный университет, e-mail: saprykinaz@mail.ru

Sapronov Dmitrii V. — senior researcher, candidate of biological Sciences, Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science Russian Academy of Sciences, laboratory of soil cycles of nitrogen and carbon; e-mail: sadmvas@gmail.com

Kramareva Tatiana N. — Candidate of Biology, the senior lecturer of the department of ecology and ground resources of the Voronezh State University; e-mail: tkramarewa@mail.ru

Saprykina Zhanna S. — Student, Department of ecology and land resources, Voronezh state University; e-mail: saprykinaz@mail.ru