

## ОЦЕНКА СКОРОСТИ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ОСНОВНЫХ ТИПОВ ПОЧВ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМАХ<sup>1</sup>

**В.В. Каганов<sup>1</sup>**  
**И.Н. Курганова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Центр по проблемам экологии  
и продуктивности лесов РАН  
Россия, 117810, Москва,  
ул. Профсоюзная, 84/32  
E-mail: saganss@rambler.ru

<sup>2</sup>Институт физико-химических  
и биологических проблем  
почвоведения РАН  
Россия, 142290, Московская обл.,  
г. Пушкино, Институтская, 2

E-mail: ikurg@mail.ru

В условиях лабораторных экспериментов изучалась скорость минерализации органического вещества (ОВ) основных типов почв Европейской части России при влажности, составляющей 65% их полной полевой влагоемкости, и различных температурных режимах, моделирующих годовой климатический цикл. Найдено, что скорость минерализации ОВ ( $R_{min}$ ) снижалась при уменьшении температуры ( $t$ ) с различной скоростью. Самым значительным (на 41–61%) уменьшение интенсивности выделения  $CO_2$  было при изменении температуры почвы от 26°C до 21°C. Кривая зависимости скорости минерализации ( $R_{min}$ ) от  $t$  носила экспоненциальный характер и хорошо аппроксимировалась уравнением регрессии первого порядка:  $\ln R_{min} = kt + b$ . Температурный коэффициент ( $Q_{10}$ ) в исследуемых почвах варьировал от 2.7 до 3.8. Почвы, находящиеся в сельскохозяйственном использовании, характеризовались меньшей температурной чувствительностью по сравнению с их естественными аналогами и имели самые низкие значения  $Q_{10}$ . Показано, что минерализация ОВ почв наблюдалась при их полном замерзании ( $t = -5^\circ C$ ) и когда  $R_{min}$  составляла 0.2–6% от интенсивности выделения  $CO_2$  при +26°C. Обнаружен значительный всплеск интенсивности выделения  $CO_2$  при оттаивании почв после их полного промерзания. Его интенсивность в 2.5–7 раза превышала  $R_{min}$  при  $t = +10^\circ C$  до замораживания, а в некоторых случаях была сравнима с интенсивностью выделения  $CO_2$  при +21–26°C.

Ключевые слова: минерализация органического вещества почв, интенсивность выделения  $CO_2$ , микробная биомасса, температурный коэффициент  $Q_{10}$ , замораживание-оттаивание почв.

### Введение

Минерализация (разложение, деструкция) органического вещества (ОВ) почв является одним из основных этапов в процессе его трансформации. Разложение ОВ в почвах имеет главным образом микробиологическую природу, а ее конечными продуктами являются углекислый газ и вода [1]. В связи с этим весьма популярным методом для изучения процессов минерализации ОВ среди исследователей является биокинетический метод, основанный на анализе интенсивности выделения углекислого газа ( $CO_2$ ) из почв в условиях инкубационных экспериментов различной продолжительности [2, 3]. Интенсивность процессов минерализации ОВ почв зависит как от качественных характеристик самого органического материала (содержание лигнина, целлюлозы, аминокислот, моносахаров; соотношение  $C/N$  и пр.), так и от условий внешней среды (главным образом, температуры и влажности почвы). Влияние всех перечисленных факторов трудно ранжировать, но считается, что основным параметром, позволяющим количественно описать скорость разложения органического вещества, является температура почв [4, 5]. Высокая положительная корреляция между скоростью выделения  $CO_2$  из почв и температурой воздуха и/или почвы обнаружена как в глобальном мас-

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Госконтракта № 14.740.11.0956 от 29.04.2011 г. Шифр лота – 2011-1.4-505-003. Наименование лота – «Проведение поисковых научно-исследовательских работ в целях развития общероссийской мобильности в области наук о Земле, экологии и рациональном природопользовании». Обобщенная тема ПНИР – Разработка методов и подходов к комплексной оценке и ингибированию техногенного воздействия на окружающую среду и гранта РФФИ №11-04-01486-а.



штабе [6–9], так и для почв отдельных регионов и экосистем [10–15]. Зависимость скорости минерализации органического вещества от температуры часто описывают, используя экспоненциальную функцию с константой  $Q_{10}$  [16–19]. Однако, модели, использующие  $Q_{10}$  для описания температурных зависимостей, как правило, являются адекватными лишь в ограниченном интервале температур [16, 19].

В полевых условиях изучение влияния температуры на скорость выделения  $CO_2$  из почвы обычно ограничивается рамками вегетационного периода. Практически неизученным для почв России представляется вопрос об оценках скорости разложения ОВ при отрицательных температурах и контрастной смене фазовых состояний почв, наблюдающихся при их замерзании и последующем оттаивании. В настоящее время подобные исследования приобретают особую значимость в свете глобальных изменений климата и природной среды.

Цель настоящего исследования состояла в сравнительной оценке скорости минерализации ОВ основных типов почв Европейской части России в интервале температур, моделирующем годовой климатический цикл, и разработке моделей, описывающих связь между скоростью выделения  $CO_2$  из почв и температурой почвы.

### Объекты и методы исследования

Скорость минерализации органического вещества изучалась в лабораторных условиях в образцах следующих типов почв (слой 0–20 см), относящихся к четырем природно-географическим зонам:

#### 1. Южно-таежная зона

*Дерново-слабоподзолистая глееватая слабогумусная супесчаная на покровном лессовидном суглинке* (Приокско-Террасный Государственный Биосферный Заповедник, Московская область, Серпуховской район) – лесной ценоз;

*Серая лесная тяжелосуглинистая на покровном лессовидном суглинке* (Опытно-полевая станция ИФХБПП РАН, Московская область, г. Пущино) – лесной ценоз и агроценоз (озимая пшеница);

#### 2. Лесостепная зона

*Чернозем выщелоченный среднегумусный мощный тяжелосуглинистый на покровном суглинке* (Тульская область, водораздел р. Упа и Плава) – агроценоз (сеяные травы);

#### 3. Степная зона

*Чернозем типичный малогумусный среднемошный тяжелосуглинистый на лессовидном карбонатном суглинке* (Курская область, Центрально-черноземный заповедник «Стрелецкая степь») – косая степь и агроценоз (пшеница);

*Чернозем обыкновенный тучный мощный тяжелосуглинистый на лессовидном карбонатном суглинке* (Воронежская область, Таловский район, НИИСХ ЦЧО «Каменная степь») – некосимая степь;

*Чернозем южный слабогумусный маломощный легкосуглинистый на лессовидном карбонатном суглинке* (Волгоградская область, Бузулукский район, терраса р. Бузулук) – агроценоз (подсолнечник);

#### 4. Сухостепная зона

*Светло-каштановая сильно солонцеватая очень маломощная на желтобуром суглинке* (Волгоградская область, с. Самофаловка) – целинная степь;

*Солонец степной мелкий тяжелосуглинистый на повышении* – микроплакоре (Волгоградская область, с. Самофаловка) – целинная степь.

Полную полевую влагоемкость (ППВ, %) определяли в лабораторных условиях в нарушенных образцах, просеянных через сито с диаметром ячеек 2 мм [20]. Определение содержания органического углерода ( $C_{org}$ ) в почвенных образцах проводили на элементном  $CN$ -анализаторе (Elementar, Германия). Величину  $pH$  определяли потенциометрически в водной вытяжке при соотношении почва : раствор = 1 : 2.5.



Потенциальную скорость минерализации ОВ ( $PR_{min}$ ) определяли в лабораторных условиях по интенсивности выделения  $CO_2$  из почвы при увлажнении, соответствующем 60-65% ППВ, и температуре 26°C. Навеску воздушно-сухой почвы (10 г), освобожденной от корней и просеянной через сито с диаметром отверстий 2 мм, помещали во флаконы объемом 100 мл, увлажняли и закрывали пленками, пропускающими воздух, но препятствующими испарению влаги. После предварительного инкубирования при  $t = 26^\circ C$  в течение 5–7 суток, флаконы герметично закрывали резиновыми пробками и выдерживали в термостате при той же температуре 10–12 часов. Затем из флакона с помощью шприца отбирали пробу газовой фазы и определяли в ней концентрацию  $CO_2$  с использованием газового хроматографа Кристалл-2000 с катарометром в качестве детектора. Расчет  $PR_{min}$  (мг С/кг почвы/сут) проводили по формуле:

$$PR_{min} = dC \times 12 \times V_{\text{флак}} \times 1000 / m \times 22.4 \times t \times 100, \quad (1)$$

где  $dC$  – показания прибора с учетом нулевого значения, объемные %;  $V_{\text{флак}}$  – объем флакона, мл;  $t$  – время инкубации, сут;  $m$  – навеска почвы, кг.

Содержание микробного углерода ( $C_{mic}$ ) определяли методом субстрат-индуцированного дыхания [21, 22]. Считается, что первоначальное увеличение дыхания после внесения питательного субстрата (глюкозы) в почву прямо пропорционально содержанию углерода в живой («активной») микробной биомассе. Для определения  $C_{mic}$  флаконы с почвой после измерения  $PR_{min}$  проветривали и вносили раствор глюкозы из расчета 10 мг глюкозы на 1 г почвы. Через 2 часа после добавления питательного субстрата флаконы снова проветривали, герметично закрывали, инкубировали при  $t = 26^\circ C$  в течение 1.5–2 час и затем снова определяли концентрацию  $CO_2$  во флаконе. Скорость субстрат-индуцированного дыхания ( $V_{SIR}$ ), отражающая отклик микробного сообщества почв на внесение дополнительного субстрата, рассчитывалась по формуле (1). Расчет содержания микробной биомассы ( $C_{mic}$ , мг/кг почвы) производили согласно уравнению [22]:

$$C_{mic} = 40.04 \times V_{SIR} + 0.37, \quad (2)$$

где  $C_{mic}$  - содержание углерода, иммобилизованного в микробной биомассе (мг С/кг почвы),  $V_{SIR}$  – скорость субстрат-индуцированного дыхания (мг С/кг почвы/час).

Метаболический коэффициент  $qCO_2$  рассчитывали как соотношение скоростей выделения  $CO_2$  из небогатой почвы и почвы, в которую вносили избыток доступного субстрата – глюкозы [23].

Температурную чувствительность скорости разложения ОВ почв оценивали с помощью температурных коэффициентов  $Q_{10}$ , показывающих во сколько раз увеличивается интенсивность выделения  $CO_2$  (скорость минерализации,  $R_{min}$ ) при повышении температуры на 10°C. Температурный коэффициент  $Q_{10}$  рассчитывали в 2 этапа [24, 25]:

(1) построение регрессионной модели типа:  $\ln R_{min} = kt + b$ , где  $R_{min}$  – скорость минерализации при различных температурах  $t$ , с целью определения коэффициента регрессии  $k$ ;

(2) расчет температурного коэффициента по формуле:

$$Q_{10} = \exp(10k). \quad (3)$$

Зависимости скорости разложения ОВ от температуры в рамках настоящего исследования строились для изучаемых почв при уровнях влажности, соответствующих 60% ППВ и температурном диапазоне от –5 до +26°C. С этой целью скорость минерализации ОВ почв ( $R_{min}$ , мг С/кг почвы/час) измеряли после инкубирования при температурах: +26, +21, +16, +11, +6, –5°C. Инкубация образцов при положительных температурах составляла 22–24 часа, а при отрицательной – 66 часов. Оттаивание почв проводили при  $t = +10^\circ C$  в течение 3-х часов. После каждого изменения температуры флаконы проветривались 30 минут и снова герметично закрывались. Исходя из полученных в наших экспериментах данных, были рассчитаны величины температурного коэффициента  $Q_{10}$  для  $R_{min}$  в температурном диапазоне от –5 до +26°C.



### Результаты и обсуждение

Общая и микробиологическая характеристика почв зонального ряда. Изучаемые почвы расположены в четырех различных природно-географических зонах, они сформировались на разных материнских породах, а в пределах одной зоны характеризовались различными типами землепользования. В связи с этим, изучаемые почвы заметно отличались по основным химическим свойствам и способности удерживать влагу (табл. 1). Содержание органического углерода, являющегося основным питательным субстратом для микробных сообществ, изменялось в изучаемых почвах в широких пределах: от 10.7 г С/кг почвы в дерново-слабоподзолистой и серой лесной (агроценоз) почвах до 56.3 г С/кг почвы – в черноземе обыкновенном (табл. 1). Значения  $pH$  водной суспензии в изучаемом ряду почв постепенно менялись от слабнокислой реакции (5.5–5.8 ед.) в почвах южно-таежной и лесостепной зон до слабощелочной (7.1–7.2 ед.) – в почвах сухостепной зоны (табл. 1). Величина полной полевой влагоемкости (ППВ), показывающая как много воды может удержать та или иная почва после оттока гравитационной влаги, зависит как от содержания в почве органических веществ, так и от ее минералогического и механического состава. Самые низкие значения ППВ были зафиксированы в супесчаной дерново-слабоподзолистой почве (39.5%), а наиболее высокими величинами ППВ характеризовались серая лесная почва под лесной растительностью и черноземы (52–62%).

Значения  $PR_{min}$  также широко варьировали в почвах зонального ряда (табл.1). Максимальные значения потенциальной скорости минерализации ОВ были зафиксированы в солонце и серой лесной почве под лесом – 35.8 и 42.5 мг С/кг почвы/сут, соответственно. Чернозем южный (агроценоз) характеризовался самой низкой величиной  $PR_{min}$  – 5.3 мг С/кг почвы/сут, что указывает на слабую микробиологическую активность этих почв, вызванную, возможно, дефицитом доступного углерода вследствие длительного возделывания пропашных культур на этих почвах. Корреляционные связи между  $PR_{min}$ , содержанием гумуса и величиной  $pH$  были недостоверны. Найдено, что потенциальная скорость минерализации ОВ серой лесной почвы под озимой пшеницей была достоверно ниже  $PR_{min}$  под лесом, что так же может быть обусловлено уменьшением количества легкодоступного углерода при вовлечении серых лесных почв в сельскохозяйственный оборот. На черноземе типичном различия, вызванные особенностями сельскохозяйственного использования, оказались не значимы.

Если потенциальную скорость минерализации выразить на единицу органического углерода, то получаемая величина (удельная скорость минерализации,  $PR_{min}/C_{орг}$ ; мг С/г  $C_{орг}$ /сут) может служить косвенной характеристикой устойчивости органического вещества почв к разложению [26]. А именно, чем ниже значения  $PR_{min}/C_{орг}$ , тем менее подвержено ОВ этих почв минерализации, и наоборот. Среди изученных почв самым устойчивым к минерализации было органическое вещество черноземов: значения  $PR_{min}/C_{орг}$  в них варьировали от 0.38 до 0.62 мг С/г  $C_{орг}$ /сут, в среднем составляя  $0.48 \pm 0.04$  мг С/г  $C_{орг}$ /сут (табл. 1). Во всех остальных почвах зонального ряда значения удельная скорость минерализации были в среднем в 3 раза выше ( $1.57 \pm 0.22$  мг С/г  $C_{орг}$ /сут), изменяясь в зависимости от типа почв от 1.06 мг С/г  $C_{орг}$ /сут в серой лесной почве под агроценозом до 2.03 мг С/г  $C_{орг}$ /сут – на солонце.

Таблица 1

#### Общая и микробиологическая характеристика почв зонального ряда

Почва	Ценоз	$pH_{водн.}$	ППВ, %	$C_{орг.}$ , г С/кг почвы	$PR_{min}$ , мг С/кг почвы/сут	$PR_{min}/C_{орг}$ , мг С/г $C_{орг}$ /сут	$C_{mic}$ , мг/кг почвы	$qCO_2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Дерново-слабоподзолистая	Лесной	5.8	39.5	10.7	18.2	1.70	90.2	0.34
Серая лесная	Лесной	6.8	60.7	23.9	42.5	1.78	317.4	0.22

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Серая лесная	Агроценоз	6.0	43.2	10.9	11.5	1.06	170.3	0.11
Чернозем выщелоченный	Агроценоз	5.5	61.1	37.6	23.3	0.62	109.2	0.36
Чернозем типичный	Косимая степь	6.6	57.4	34.3	16.8	0.49	257.7	0.11
Чернозем типичный	Агроценоз	6.3	52.1	31.9	15.4	0.48	268.4	0.10
Чернозем обыкновенный	Некосимая степь	6.6	61.9	56.3	24.7	0.44	295.0	0.14
Чернозем южный	Агроценоз	7.1	41.9	13.9	5.3	0.38	133.4	0.07
Светло-каштановая	Целина	6.5	39.0	14.6	18.5	1.27	267.2	0.12
Солонец солончаковый	Целина	7.2	45.2	17.6	35.8	2.03	387.0	0.15

Среди изученных почв, содержание микробного углерода было максимальным (>300 мг С/кг почвы) в солонце солончаковом и на серой лесной почве под лесом (табл. 1). В верхнем 20-см горизонте черноземов оно варьировало от 109 до 295 мг С/кг почвы. Минимальное содержание  $C_{mic}$  было в супесчаных дерново-подзолистых почвах южно-таежной зоны – 90 мг С/кг почвы.

Метаболический коэффициент  $qCO_2$ , показывающий, сколько  $CO_2$  продуцируется на единицу биомассы и являющийся показателем интенсивности протекающих в почве процессов минерализации органического вещества, для большинства изучаемых почв находится в интервале 0.1–0.2 (табл. 1), что типично для почв, находящихся в условиях оптимального температурно-влажностного режима [23]. Наиболее высокие значения  $qCO_2$  (0.36–0.34) были характерны для чернозема выщелоченного (агроценоз) и дерново-слабоподзолистой почвы (лесной ценоз), что свидетельствует об интенсивных процессах разложения органического вещества в этих почвах. Чернозем южный под агроценозом имел самый низкий метаболический коэффициент (0.07), что, по всей видимости, объясняется недостатком органических и минеральных веществ в почве.

Скорость минерализации ОБ почв при различных температурных режимах. Постепенное снижение температуры с +26°C до –5°C вызывало закономерное уменьшение скорости минерализации ОБ во всех изучаемых почвах (табл. 2). Одновременно наблюдалось также снижение размаха варьирования значений скорости выделения  $CO_2$ , характеризуемого величиной стандартного отклонения ( $std$ ): наибольшие значения  $std$  были получены при  $t = +26^\circ C$ , а наименьшие – при  $t = -5^\circ C$ . Исключением являлся чернозем типичный (косимая степь), где варьирование значений  $R_{min}$  во всех температурных диапазонах было незначительным и примерно одинаковым. Наиболее резкое уменьшение  $R_{min}$  во всех исследованных почвах – почти в 2 раза (41–61%) – наблюдалось при уменьшении температуры инкубации от +26 до +21°C (табл. 2). Интенсивность выделения  $CO_2$  при +16°C составила уже только 29-48% от  $PR_{min}$ , а при +11 и +6°C – 13–26% и 1–11% от  $PR_{min}$ , соответственно.

Таблица 2

**Скорость минерализации почв зонального ряда при различных температурах (числитель – мг С/кг почвы/час; знаменатель – % от  $R_{min}$  при 26°C)**

Название почвы	Ценоз	Температура, °C						Оттаивание, +10°C
		+26	+21	+16	+11	+6	–5	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Дерново-слабоподзолистая	Лесной	$\frac{0.76}{100}$	$\frac{0.45}{59}$	$\frac{0.28}{38}$	$\frac{0.15}{20}$	$\frac{0.08}{10}$	$\frac{0.02}{3}$	$\frac{0.54}{71}$



Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Серая лесная	Лесной	$\frac{1.77}{100}$ <b>52</b>	$\frac{0.92}{59}$ <b>29</b>	$\frac{0.51}{43}$ <b>17</b>	$\frac{0.30}{26}$ <b>8</b>	$\frac{0.14}{10}$ <b>2</b>	$\frac{0.04}{3}$ <b>60</b>	$\frac{1.07}{81}$ <b>60</b>
Серая лесная	Агроценоз	$\frac{0.48}{100}$	$\frac{0.28}{59}$	$\frac{0.21}{43}$	$\frac{0.13}{26}$	$\frac{0.05}{10}$	$\frac{0.02}{3}$	$\frac{0.39}{81}$
Чернозем выщелоченный	Агроценоз	$\frac{0.97}{100}$	$\frac{0.57}{59}$	$\frac{0.35}{36}$	$\frac{0.22}{23}$	$\frac{0.09}{10}$	$\frac{0.03}{23}$	$\frac{0.58}{60}$
Чернозем типичный	Косимая степь	$\frac{0.70}{100}$	$\frac{0.36}{51}$	$\frac{0.27}{39}$	$\frac{0.17}{24}$	$\frac{0.08}{11}$	$\frac{0.02}{2}$	$\frac{0.58}{83}$
Чернозем типичный	Агроценоз	$\frac{0.64}{100}$	$\frac{0.33}{52}$	$\frac{0.31}{48}$	$\frac{0.17}{26}$	$\frac{0.06}{10}$	$\frac{0.02}{3}$	$\frac{0.52}{81}$
Чернозем обыкновенный	Некосимая степь	$\frac{1.03}{100}$	$\frac{0.51}{50}$	$\frac{0.44}{43}$	$\frac{0.24}{24}$	$\frac{0.12}{11}$	$\frac{0.02}{2}$	$\frac{0.92}{90}$
Чернозем южный	Агроценоз	$\frac{0.22}{100}$	$\frac{0.09}{39}$	$\frac{0.05}{23}$	$\frac{0.03}{13}$	$\frac{0.00}{1}$	$\frac{0.00}{0}$	$\frac{0.21}{94}$
Светло-каштановая	Целина	$\frac{0.77}{100}$	$\frac{0.42}{55}$	$\frac{0.29}{38}$	$\frac{0.19}{25}$	$\frac{0.00}{0}$	$\frac{0.03}{4}$	$\frac{0.44}{57}$
Солонец солончаковый	Целина	$\frac{1.49}{100}$	$\frac{0.83}{55}$	$\frac{0.48}{32}$	$\frac{0.30}{20}$	$\frac{0.08}{6}$	$\frac{0.03}{2}$	$\frac{1.00}{67}$

Было обнаружено, что в полностью замерзшей почве ( $t = -5^{\circ}\text{C}$ ) процессы минерализации ОВ также имели место, хотя абсолютные значения интенсивности выделения  $\text{CO}_2$  при отрицательной температуре были невысокими и составляли приблизительно 2–4% от  $PR_{min}$ . Исключением в зональном ряду почв являлся только чернозем южный, интенсивность дыхания которого при  $t = -5^{\circ}\text{C}$  была практически нулевая, что вполне согласуется с нашим предположением о недостатке органических и минеральных веществ для поддержания жизнедеятельности микробного сообщества этой почвы в таких экстремальных условиях. Самую высокую скорость выделения  $\text{CO}_2$  (в % от  $PR_{min}$ ) при отрицательных температурах, по сравнению с другими типами почв имела светло-каштановая почва.

В ходе проведенного модельного эксперимента было также обнаружено, что оттаивание почв после их полного промерзания (температура оттаивания составляла  $+10^{\circ}\text{C}$ ) вызывало резкий всплеск интенсивности выделения  $\text{CO}_2$ , в некоторых почвах сравнимый по величине со скоростью выделения  $\text{CO}_2$  при температуре  $+26^{\circ}\text{C}$  (60–94% от  $PR_{min}$ ) и значимо превышающий для большинства почв  $R_{min}$  при  $+21^{\circ}\text{C}$  (табл. 2). Отмеченное усиление процессов минерализации ОВ при оттаивании почв наблюдалось очень короткий период (3–4 часа), в течение которого, по-видимому, и происходило полное оттаивание почвы. Затем следовало резкое снижение скорости выделения  $\text{CO}_2$  до значений, соответствующих температуре инкубации, равной  $+10^{\circ}\text{C}$ .

Таблица 3

**Регрессионные зависимости между  $R_{min}$  и температурой почвы, коэффициенты корреляции ( $R$ ) и величина  $Q_{10}$  в почвах зонального ряда**

Почва	Ценоз	Уравнение регрессии		
		$\ln R_{min} = kt + b$	$Q_{10} = \exp 10k$	$R$
Дерново-слабоподзолистая	лесной	$0.12 T - 3.21$	3.22	0.99
Серая лесная	лесной	$0.12 T - 2.60$	3.35	1.00
Серая лесная	агроценоз	$0.11 T - 3.53$	3.06	0.97
Чернозем выщелоченный	агроценоз	$0.11 T - 2.91$	3.10	0.99
Чернозем типичный	косимая степь	$0.12 T - 3.29$	3.22	0.97
Чернозем типичный	агроценоз	$0.11 T - 3.22$	3.03	0.96
Чернозем обыкновенный	целинная степь	$0.12 T - 2.99$	3.39	0.98
Чернозем южный	агроценоз	$0.10 T - 4.46$	2.71	0.94
Светло-каштановая	целинная степь	$0.11 T - 3.00$	2.90	0.90
Солонец солончаковый	целинная степь	$0.13 T - 2.97$	3.82	0.97

Оценка связей между скоростью минерализации ОБ почв и ее температурой.

Расчеты показали, что для исследованных почв регрессионный коэффициент  $k$  в экспоненциальных уравнениях, описывающих зависимость  $R_{min}$  от температуры, имел близкие величины: 0.11–0.12. Величина коэффициента  $b$  изменялась от –2.60 до –5.04. Коэффициенты корреляции ( $R$ ) были высоки и значимы при  $\alpha < 0.05$  для всех почв, кроме каштановой и южного чернозема (табл. 3).

С целью получения количественной оценки изменения  $R_{min}$  с ростом температуры нами был подсчитан также температурный коэффициент  $Q_{10}$ . Для всех исследованных почв значения этого коэффициента имели близкие величины и варьировали от 2.71 до 3.82 (табл. 3). Минимальные значения этого коэффициента имели почвы агроценозов (2.71–3.10), а в солонцах величина  $Q_{10}$  была максимальной (3.82), что указывает на их высокую чувствительность к изменению температуры.

### Выводы

1. Потенциальная скорость минерализации ОБ в почвах зонального ряда широко варьировала: от 5.3 мг С/кг почвы/сут в черноземе южном (агроценоз) до 35.8 и 42.5 мг С/кг почвы/сут - в целинном солонце солончаковом и серой лесной почве под лесом. Корреляционные связи между  $PR_{min}$ , содержанием органического углерода и величиной рН были недостоверны.

2. Процессы минерализации ОБ почв не прекращались при их полном промерзании ( $t = -5^{\circ}\text{C}$ ), но скорость  $R_{min}$  была невысокой и составляла 0.2–6% от потенциальной скорости минерализации ОБ почв при  $26^{\circ}\text{C}$ .

3. При оттаивании почв ( $t = +10^{\circ}\text{C}$ ) после их полного промерзания было зафиксировано увеличение скорости выделения  $\text{CO}_2$  из почв, абсолютная величина которой в 2.5–7 раз превышала  $R_{min}$  при  $t = +10^{\circ}\text{C}$  до замораживания, а в некоторых случаях были сравнимы с интенсивностью выделения  $\text{CO}_2$  при  $21\text{--}26^{\circ}\text{C}$ .

4. Зависимость скорости минерализации ОБ почв от температуры почвы носила экспоненциальный характер и хорошо аппроксимировалась уравнением регрессии 1-го порядка:  $\ln R_{min} = kt + b$  ( $k = 0.11\text{--}0.12$ ;  $b = -2.6 \div -5.0$ ). Температурный коэффициент  $Q_{10}$  исследованных почв варьировал от 2.7 в черноземе южном до 3.8 в солонце. Целинные почвы были более чувствительны к изменению температуры по сравнению с их пахотными аналогами.

5. Среди изученных почв самым устойчивым к минерализации было органическое вещество черноземов: значения удельной скорости минерализации в них варьировали от 0.38 до 0.62 мг С/г  $C_{org}$ /сут, в среднем составляя  $0.48 \pm 0.04$  мг С/г  $C_{org}$ /сут. Во всех остальных почвах зонального ряда значения удельная скорость минерализации были в среднем в 2–3 раза выше, изменяясь в зависимости от типа почв от 1.06 мг С/г  $C_{org}$ /сут в серой лесной почве под агроценозом до 2.03 мг С/г  $C_{org}$ /сут – на солонце.

### Список литературы

1. Заварзин Г.А. Лекции по природоведческой биологии. – М.: Наука, 2004. – 348 с.
2. Семенов В. М., Иванникова Л. А., Кузнецова Т.В., Семенова Н. А., Тулина А.С. Минерализуемость органического вещества и углерод-секвестрирующая емкость почв зонального ряда // Почвоведение. – 2008. – № 7. – С. 819–832.
3. Семенов В. М., Иванникова Л. А., Семенова Н. А., Ходжаева А. К., Удальцов С. Н. Минерализация органического вещества в разных по размеру агрегатных фракциях почвы // Почвоведение. – 2010. – № 2. – С. 157–165.
4. Lomander A., Kätterer T., Andren O. Carbon dioxide evolution from top- and subsoil as affected by moisture and constant and fluctuation temperature // Soil Biol. Biochem. – 1998. – Vol. 30, № 14. – P. 2017–2022.
5. Rustad L.E., Huntington T.G., Boone R.D. Controls on soil respiration: Implication for climate change // Biogeochemistry. – 2000. – Vol. 48. – P. 1–6.



6. Fung I.Y., Tucker C.J., Prentice K.C. Application of advanced very high resolution radiometer vegetation index to study atmosphere-biosphere exchange of CO<sub>2</sub> // *J. Geophys. Res.* – 1987. Vol. 93. – P. 2999–3015.
7. Kirschbaum M.U.F. Will changes in soil organic carbon act as a positive or negative feedback on global warming // *Biogeochemistry.* – 2000. – Vol. 48. – P. 21–51.
8. Raich J.W., Schlesinger W.H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate // *Tellus.* – 1992. – Vol. 44B. – P. 81–89.
9. Raich J.W., Potter C.S., Bhagavatti D. Interannual variability in global soil respiration, 1980–94 // *Global change Biol.* – 2002. – Vol. 8. – P. 800–812.
10. Tjoelker M.G., Oleksyn J., Reich P.B. Modelling respiration of vegetation: evidence for a general temperature-dependent Q<sub>10</sub> // *Global Change Biology.* – 2001. – Vol. 7. – P. 223–230.
11. Курганова И.Н., Кудеяров В.Н. Оценка потоков диоксида из почв таежной зоны России // *Почвоведение.* – 1998. – № 9. – С. 1058–1070.
12. Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Розанова Л.Н., Кудеяров В.Н. Годовые потоки диоксида углерода из некоторых почв южно-таежной зоны России // *Почвоведение.* – 2001. – № 9. С. 1456–1469.
13. Kudeyarov V. N., Kurganova, I. N. 1998. Carbon dioxide emissions and net primary production of Russian terrestrial ecosystems // *Biol. Fertil. Soils.* – Vol. 27. – P. 246–250.
14. Lloyd J., Taylor J. A. On the temperature dependence of soil respiration // *Functional ecology.* – 1994. – Vol. 8. – P. 315–323.
15. Lopes de Gerenyu V.O., Kurganova I.N., Saprnov D.V. Carbon dioxide fluxes from arable soils as affected by temperature and moisture // *I World Congress on Conservation Agriculture, Extend Abstract, Madrid, 1-5 October, 2001.* – Vol. 2. – P. 109–113.
16. Perrin D., Laitat E., Yernaux M., Mezoesy Q., Aubinet M. Temporal and spatial changes in the soil CO<sub>2</sub> efflux in a mixed temperate forest (Vielsalm, Belgium) // *Comparative biochemistry and Physiology: SEB Abstracts, 2003.* – Vol. 134, № 3. – P. 191.
17. Kätterer T., Reichstein M., Andren O., Lomander A. Temperature dependence of organic matter decomposition: a critical review using literature data analyzed with different model // *Biol. Fertil. Soils.* – 1998. – Vol. 27. – P. 258–262.
18. Kirschbaum M.U.F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage // *Soil Biol. Biochem.* – 1995. – Vol. 27. – P. 753–760.
19. Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu, Saprnov D.V. CO<sub>2</sub> Emissions from Russian South-taiga soils as affected by temperature and land use // *6-th International Carbon Dioxide Conference, Extended Abstracts, Sendai, Japan, October 1-5, 2001.* – Vol. 1. – P. 540–543.
20. Winkler J.P., Cherry R.S., Schlesinger W.H. The Q<sub>10</sub> relationship of microbial respiration in a temperate forest soil // *Soil Biol. Biochem.* – 1996. – Vol. 28. – P. 1067–1072.
21. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. – М.: Агропромиздат, 1986. – 415 с.
22. Ананьева Н.Д., Благодатская Е.В., Орлинский Д.Б., Мякшина Т.Н. Методические аспекты определения скорости субстрат-индуцированного дыхания почвенных микроорганизмов // *Почвоведение.* – 1993. – № 11. – С. 72–77.
23. Anderson J., Domsch K.H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils // *Soil Biol. Biochem.* – 1978. – Vol. 10. – P. 215–221.
24. Благодатская Е.В., Ананьева Н.Д., Мякшина Т.Н. Характеристика состояния микробного сообщества по величине метаболического коэффициента // *Почвоведение.* – 1995. – № 2. – С. 205–210.
25. Amthor J.S. Plant respiratory responses to the environmental and their effects on the carbon balance. – *Plant-Environment interactions* (eds. R.E. Wilkinson, Marcel Decker). New York, 1994. – P. 501–554.
26. Pavelka M., Acosta M., Marek M.V., Kutsch W., Janous D. Dependence of the Q<sub>10</sub> values on the depth of the soil temperature measuring point // *Plant and Soil.* – 2007. – Vol. 292, № 1-2. – P. 171–179.
27. Rovira P., Jorba M., and Romanyà J. Active and passive organic matter fractions in Mediterranean forest soils // *Biol. Fert. Soils.* – 2010. – Vol. 46. – P. 355–369.



## EVALUATION OF ORGANIC MATTER MINERALIZATION RATE IN MAIN SOIL TYPES OF RUSSIAN EUROPEAN PART UNDER DIFFERENT TEMPERATURE REGIMES

**V.V. Kaganov**<sup>1</sup>  
**I.N. Kurganova**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centre for Problems of Ecology and Productivity of Forests, RAS  
Profsoyuznaya St., 84/32, Moscow,  
117810, Russia

E-mail: [saganss@rambler.ru](mailto:saganss@rambler.ru)

<sup>2</sup>Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science RAS  
Institutskaya, 2, Pushchino, Moscow  
Reg., 142290, Russia

E-mail: [ikurg@mail.ru](mailto:ikurg@mail.ru)

The mineralization rate of soil organic matter (SOM) in the main types of soils of the European part of Russia was studied under the laboratory conditions at optimal moisture content (65% of their water hold capacity, WHC) and different temperatures modelling the year-round climatic cycle. The rate of SOM mineralization ( $R_{\min}$ ) has been shown to decline with the different rate when the temperature ( $t$ ) decreased. The deceleration of  $\text{CO}_2$  emission was the most significant (41-61%), when the soil temperature changed from  $+26^\circ\text{C}$  to  $+21^\circ\text{C}$ . Velocity-temperature curve was described by the exponential function and approximated by the first-order equation:  $\ln R_{\min} = kt + b$ . The temperature coefficient ( $Q_{10}$ ) in the soils under consideration varied from 2.7 to 3.8. The agricultural soils were characterized by the lower thermoesthesia compared with their natural counterparts and had the smallest  $Q_{10}$  values. It has been found that the SOM mineralization took place under complete freezing conditions ( $t = -5^\circ\text{C}$ ) and the  $R_{\min}$  reached 0.2-6% of emission rate of  $\text{CO}_2$  at  $+26^\circ\text{C}$ . We registered the sharp increase of  $\text{CO}_2$  emission rate during the thawing of soils after the full frost penetration. Its rate was 2.5-7 times higher than  $R_{\min}$  at  $t = +10^\circ\text{C}$  before freezing of soil, and sometimes was comparable with the  $\text{CO}_2$  emission rate at  $+21$ - $26^\circ\text{C}$ .

Key words: mineralization of soil organic matter,  $\text{CO}_2$  emission rate, microbial biomass, temperature coefficient  $Q_{10}$ , freezing-thawing of soils.