И.И. Васенев, И.А. Аднан, М.В. Тихонова

ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ СЕЗОННОЙ ДИНАМИКИ ПОЧВЕННЫХ ПОТОКОВ CO_2 И CH_4 ИЗ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ МОСКВЫ

Урбанизация – одна из основных экологических проблем современного землепользования [6, 9]. Она оказывает значительное воздействие на почвенные потоки и запасы углерода в почве земель поселений и прилегающих территорий. Углекислый газ – основной парниковый газ по его влиянию на изменение климата (более 60%) и с точки зрения интенсивности естественных и антропогенных потоков в атмосфере [1, 5, 8]. Около 90% атмосферного CO_2 имеет почвенное происхождение [4]. Он активно образуется в почве вследствие дыхания организмов и процессов минерализации органического вещества. Метан – второй по значению парниковый газ. Его вклад в создание парникового эффекта оценивается в 18-19 %. Парниковая активность одной молекулы метана в 23 раза больше углекислого газа [7].

Крупнейший мегаполис Европы Москва характеризуется высоким уровнем антропогенной нагрузки на почвы и требует многоуровневого экологического регулирования, в основе которого должны лежать результаты мониторинговых наблюдений на представительных объектах различных функциональных зон города и его природоохранного каркаса. Природоохранный каркас Москвы составляют лесные насаждения особо охраняемых природных территорий, общая площадь которых достигает 19%. В северной части Москвы к ним относится Лесная Опытная Дача (ЛОД) РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (рис. 1). Она имеет многолетнюю историю мониторинга экологического состояния лесных экосистем и почвенный покров, который является природным фоном для этой части Москвы [2, 10].

Целью исследования стала оценка основных факторов сезонной динамики почвенных потоков CO_2 и CH_4 из дерново-подзолистых почв фоновых лесных экосистем северной части Москвы на примере Лесной опытной дачи РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.

Исследования проводились в 2015 и 2016 гг. вдоль заложенной в центральной части Лесной Опытной Дачи трансекты длиной около 800

метров, ранее проложенной [3] по двум противоположным склонам доминирующего в мезорельефе выположенного моренного холма с превышением около 15 метров.

Рис. 1. Положение ЛОД РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева на территории г. Москвы

Лесная опытная дача РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева относится к особо охраняемой природной территории (ранее в составе комплексного заказника «Петровско-Разумовское») и является перспективным фоновым объектом экологического мониторинга в северной части Московского мегаполиса [10]. 5 ключевых участков мониторинговых наблюдений (табл. 1) расположены на территории Лесной Опытной Дачи с минимальной антропогенной нагрузкой вдоль линии с северо-востока на юго-запад.

Ключевые участки № 1 и № 2 находятся на прямом слабо-покатом коротком склоне моренного холма северо-восточной экспозиции (в средней части склона – № 2 (ССВ) и в нижней части склона – № 1 (ПСВ)). Они относятся к 7-му кварталу Лесной Опытной Дачи; Ключевой участок № 3 располагается на пологой водораздельной части моренного холма (ВМХ) в 7-м квартале Лесной Опытной Дачи и является автоморфным, с относительно глубоким залеганием грунтовых вод; Исследуемые участки № 4 и № 5 находятся на противоположном первом участком пологом склоне повышенной длины юго-западной экспозиции (в средней и нижней части склона слабovoгнутой формы (СЮЗ и ПЮЗ) в 10 квартале Лесной Опытной Дачи.

**Краткая характеристика ключевых участков исследования
(КУИ – с использованием материалов из [3])**

КУИ	Тип леса (состав древостоя)	$\frac{КСУ}{СК}$ *	Почва: название (подтип / тип)	Профиль почвы	ВСП* *
1 (НСВ)	Сосняк осоково- щитовниковый 4С3К2Лп+Б+едЕ	$\frac{2,3}{45}$	Среднедерновая глубокоподзоли- стая поверхностно- слабоглееватая легкосуглинистая почва (дерново- подзолистая / под- золистая)	$O_{+2} - A1_6 -$ $A1A2_{15}^{**} -$ $A2'_{(g)25} -$ $A2''_{(g)34} - A2'''_{42}$ $- II^{***} A2B_{55} -$ $ПВ_{80} - ПВС_{120\downarrow}$	39,7
2 (ССВ)	Сосняк с кленом сложный осоко- во- щитовниковый С5К + Д + Лп + Б	$\frac{2,9}{50}$	Среднедерновая глубокоподзоли- стая легкосуглини- стая почва (дерно- во-подзолистая / подзолистая)	$O_{+2} - A1_4 -$ $A1A2_{15} - A2'_{31} -$ $A2''_{41} - ПА2B_{50} -$ $ПВ1_{(t)(g)86} -$ $ПВ2_{120\downarrow}$	32,1
3 (ВМХ)	Дубняк с липой сложный будро- копытеневый 2Д3К2Лп+С+К+ Вз	$\frac{2,2}{60}$	Среднедерновая глубокоподзоли- стая легкосуглини- стая почва (дерно- во-подзолистая / подзолистая)	$O_{+2} - A1_4 -$ $A1A2_{10} - A2'_{(f)30}$ $- A2''_{(f)c44} -$ $ПА2'''_{(f)g 51} -$ $ПА2B_{62} - ПВ1_{90} -$ $ПВ2_{(t)120\downarrow}$	28,6
4 (СЮЗ)	Сосняк разно- травно- осоко- вый 6С3Кл+Лп+едЕ+ едД	$\frac{2,0}{75}$	Слабодерновая глубокоподзоли- стая поверхностно- оглеенная легкосу- глинистая почва (дерново- подзолистая глее- ватая / болотно- подзолистая)	$O^T_{+4-5} - A1_6 -$ $A1A2_{h(g)28} -$ $A2''_{g41} -$ $ПА2'''_{(g)50} -$ $ПА2B_{(g) 58} -$ $ПВ1_{(t)g 92} - ПВ2_{(t)}$ $120\downarrow$	31,7
5 (НЮЗ)	Сосняк щитов- никово- осоковый 4С5Кл1Лп+Е+Б +Л	$\frac{1,7}{80}$	Слабодерновая глубокоподзоли- стая поверхностно- оглеенная легкосу- глинистая почва (дерново- подзолистая глее- ватая / болотно- подзолистая)	$O^T_{+3-4} - A1_4 -$ $A1A2_{h10} - A2_{g27}$ $- A2''_{g36} -$ $ПА2'''_{(g) 47} -$ $ПВ1_{(t)g 80} - II B2_{(t)}$ $g 120\downarrow$	35,3

* КСУ – Коэффициент состояния древостоя /СК – % сомкнутости крон.

** ВСП – среднее значение высоты снежного покрова с 2009 по 2015 гг., см.

Из двух лет обсуждаемых наблюдений, 2015-й год характеризуется среднегодовой температурой воздуха и средней температурой июня примерно на 1°C выше средне-многолетней (табл. 2), при среднемноголетних значениях температуры августа, пониженной температуре июля и значительно выше средней температуре мая и сентября. Годовая сумма осадков соответствует среднемноголетним значениям. При этом, в мае выпало в 2 раза больше обычного количества осадков, в июле – в 1,5, а август и октябрь были аномально сухими. 2016-й год на фоне близких к многолетним средних значений температуры воздуха в большинстве месяцев, за исключением аномально холодного января и теплого мая, отличается высоким количеством осадков: на 25 % выше среднемноголетних при полуторной норме осадков в июле и двойной – в августе, что не могло не сказаться на сезонной динамике почвенных потоков парниковых газов.

Таблица 2

**Климатические характеристики территории РГАУ-МСХА
имени К.А. Тимирязева (по данным метеообсерватории
им. В.А. Михельсона)**

Период, гг.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
<i>Средняя температура воздуха, °C</i>													
1949-1981	-9,7	-8,5	-3,1	5,6	12,6	16,9	18,2	16,6	11,0	4,8	-1,4	-6,1	4,7
1981-1991	-7,9	-7,8	-2,1	5,9	13,3	17,2	18,4	16,4	10,9	5,3	-2,0	-5,5	5,2
1991-2001	-5,8	-5,6	-0,8	6,7	12,4	17,4	18,5	16,5	10,8	5,3	-2,4	-5,5	5,6
2001-2010	-6,4	-6,8	-0,7	7,3	13,3	16,5	20,4	17,8	12,0	5,9	0,4	-4,7	6,3
2010-2015	-7,2	-6,9	-0,5	7,6	12,7	17,2	20,7	19,4	11,5	5,5	0,3	-3,6	6,4
2015	-4,4	-2,2	2	6,1	14,3	18	18,3	17,6	13,8	4,4	0,8	0,2	7,4
2016	-10,1	-0,6	0,3	8,1	15	18,2	20,9	19,5	11,4	4,4	-2,7	-4,6	6,7
<i>Среднее количество осадков, мм</i>													
1949-1981	41	36	38	37	58	67	85	73	55	57	51	47	647
1981-	50	29	25	43	46	97	93	85	70	58	55	62	713

1991													
1991-2001	55	42	40	32	49	82	73	85	73	77	55	41	703
2001-2010	50	50	38	34	61	68	90	82	61	74	55	53	716
2010-2015	48	45	41	38	54	72	78	81	65	68	53	50	693
2015	63	38	15	44	119	94	120	14	88	21	42	62	720
2016	77	65	50	34	63	61	122	167	59	50	92	47	887

Измерения почвенных потоков углекислого газа проводились *in situ* один раз в 10 дней с помощью мобильного газоанализатора Li-820 с камерой 10 см в диаметре и 15 см высотой, в пятикратной повторности, с заглублением до 5 см. Параллельно с измерением *in situ* потоков CO₂ и отбором в виалы образцов воздуха для определения CH₄ на газовом хроматографе «Хроматек Кристалл 5000» проводилось измерение температуры воздуха и почвы электронным термометром, и влажности почвы мобильным почвенным влагомером.

В 2015 году с близким к среднегодовому количеством осадков и несколько повышенной температурой воздуха доминирующим фактором сезонной динамики почвенных потоков углекислого газа в условиях исследованных представительных лесных экосистем как в летний, так и в осенний период стала температура почвы (табл. 3).

В летний период 2015 года коэффициент корреляции почвенных потоков CO₂ с температурой почвы K_{TS} варьирует в пределах 0,64 – 0,91. В осенний период он, как правило, еще выше и принимает значения от 0,71 до 0,91. Анализ зависимости эмиссии углекислого газа от влажности почвы показал ее высокую пространственно-временную дифференциацию (рис. 2), отражающую периодический дефицит влаги на слабо покатом склоне северо-восточной экспозиции и лучшую дренированность почв на подошве этого склона.

Максимальное среднее значение интенсивности почвенных потоков углекислого газа отмечается на подошве северо-восточного склона (ПСВ): 19,30 г CO₂/ м² в сутки, что, возможно, связано с отмечаемой ранее (Vasenev e. a., 2017) способностью его почв, подстилаемых флювиогляциальными отложениями, быстрее прогреваться весной и в начале лета, сбрасы-

вая избыток латерально поступающей влаги в близлежащую гидрографическую сеть р. Жабенки.

Таблица 3

Зависимость почвенных потоков CO_2 от температуры и влажности почвы в условиях исследуемых лесных экосистем в 2015 году

Период	Летний период		Осенний период	
Участки*	K_{TS}^{**}	K_W^{**}	K_{TS}	K_W
ПСВ	0,91	+0,11	0,81	+0,22
ССВ	0,90	-0,34	0,91	+0,62
ВМХ	0,80	0,50	0,71	-0,42
СЮЗ	0,64	-0,41	0,73	-0,53
ПЮЗ	0,73	-0,10	0,81	-0,30

* ПСВ – подошва и ССВ – средняя часть прямого слабо-покатого короткого склона моренного холма северо-восточной экспозиции, ВМХ – вершина (пологая водораздельная часть) моренного холма, ПЮЗ – подошва и СЮЗ – средняя часть прямого слабо-покатого короткого склона моренного холма юго-западной экспозиции.

** K_{TS} и K_W – коэффициенты корреляции потоков CO_2 с температурой и влажностью почвы.

Рис. 2. Средние значения почвенной эмиссии CO_2 на ключевых участках в 2015 году

Минимальные средние значения эмиссии углекислого газа наблюдались на склоне сглаженного моренного холма северо-восточной экспозиции (ССВ) и на подошве пологого слабоогнутого склона повышенной длинны юго-западной экспозиции (ПЮЗ): 13,44 и 12,78 г $\text{CO}_2/\text{м}^2$ в сутки. В первом случае сказывается повышенная дренированность, во втором –

длительное переувлажнение верхних почвенных горизонтов, с формированием грубой оторфованной подстилки типа «мор» и обогащённых почечным гумусом перегнойных гумусов-аккумулятивных горизонтов повышенной мощности.

Наибольшее пространственное варьирование в пределах одного исследуемого участка наблюдений характерно для вершины моренного холма (ВМХ) с повышенным разнообразием растительного покрова (см. табл. 1) и выраженной рекреационной нагрузкой с небольшой тропиной сетью.

Сделанные по данным 2015 года заключения получили подтверждение на материалах 2016 года (табл. 4) – со значительным сужением варьирования значений K_{TS} в летний период года с существенно повышенным относительно среднеголетних данных количеством осадков. Сравнение результатов летних и осенних сезонных измерений почвенных потоков CO_2 за 2015 и 2016 гг. (рис. 3) показало значительное снижение его эмиссии осенью на всех исследуемых участках: от 15 до 50 % и внесло серьезные уточнения в выявленные ранее закономерности пространственной дифференциации почвенных потоков CO_2 по элементам мезорельефа, с учетом погодных условий двух лет мониторинговых наблюдений.

В летний период 2015 года со среднеголетними значениями температуры августа, значительно повышенной температурой июня и пониженной температуре июля, на фоне избыточно влажного июля и сухого августа максимальная средняя интенсивность почвенных потоков CO_2 характерна для почв на вершине сглаженного моренного холма, которые, как мы отмечали, отличаются максимальным среди исследованных объектов био-, педо- и эко-разнообразием – основой устойчивого функционирования.

Таблица 4

Зависимость почвенных потоков CO_2 от температуры и влажности почвы в условиях исследуемых лесных экосистем в 2016 году

Период	Летний период		Осенний период	
Участки	K_{TS}	K_W	K_{TS}	K_W
ПСВ	0,83	0,11	0,73	+0,42
ССВ	0,90	-0,12	0,92	+0,61
ВМХ	0,81	-0,52	0,72	-0,41
СЮЗ	0,74	-0,14	0,62	-0,44
ПЮЗ	0,73	-0,02	0,82	-0,30

Рис. 3. Анализ сезонной динамики почвенных потоков углекислого газа по ключевым участкам летом и осенью 2015 – 2016 гг.

Сравнительный анализ почвенных потоков на уровне отдельных исследуемых участков показал значительное влияние рассмотренных элементов мезорельефа и на почвенные потоки метана, среди которых везде доминировал сток (рис. 4). Максимальное среднее значение интенсивно-

сти почвенного стока метана отмечается на подошве северо-восточного склона: $-0,74 \text{ мг CH}_4/\text{м}^2$ в сутки, что, вероятно, связано со способностью его почв, подстилаемых флювиогляциальными отложениями, быстрее прогреваться весной, сбрасывая избыток латерально поступающей влаги в близлежащую гидрографическую сеть.

Рис. 4. Средние значения почвенных потоков CH_4 на ключевых участках в 2015 году

Актуальные наборы выявленных в ходе исследования лимитирующих экологических факторов почвенных потоков метана менее стабильны, чем в случае с CO_2 и характеризуются существенно более высокой пространственной изменчивостью и временной динамикой. Для выявления более значимых количественных оценок корреляций мы дополнительно разбили летний период наблюдений на 2 подпериода, выделив в нем начало лета (табл. 5). По наблюдениям 2015 года, влажность и температура почвы, как правило, являются наиболее значимыми экологическими факторами регулирования почвенных потоков CH_4 в начале лета (K_W до 0,99 и K_{TS} до 0,87), локально значимыми экологическими факторами в летний период (локально K_W до 0,51 и K_{TS} до 0,86) и малозначимыми экологическими факторами (K_W не выше 0,16 и K_{TS} не сильнее -0,46) в осенний период. При этом, наиболее тесная локальная зависимость, как правило, отмечается в почвах на склонах.

В условиях более влажного 2016 года экологические зависимости почвенных потоков CH_4 выражены локально более значимо, но на фоне еще более высокой пространственной изменчивости и временной динами-

ки (табл. 6). В начале лета и осенью преобладают высокие коэффициенты корреляции с влажностью почвы: преимущественно 0,86-0,98 – в начале лета и -0,98 – 0,69 осенью. В начале лета наблюдается и преимущественно высокий уровень корреляции почвенных потоков CH_4 с температурой почвы: от – 0,93 до 0,76, при логичной локализации положительной корреляции на наиболее влажном склоне, отрицательных – на лучше дренируемых участках. Необходима дальнейшая детализация исследований почвенных потоков метана, с включением в программу мониторинговых наблюдений собственно периодов выпадения осадков и активного снеготаяния на прогреваемых склонах.

Таблица 5

**Зависимость почвенных потоков CH_4 от температуры
и влажности почвы в 2015 году**

Сезон	Начало лета		Лето		Осень	
	K_W	K_{TS}	K_W	K_{TS}	K_W	K_{TS}
ПСВ	0,11	-0,61	-0,13	0,18	0,14	0,11
ССВ	0,78	0,87	0,29	0,86	0,16	-0,18
ВМХ	0,85	0,25	-0,34	0,11	0,08	-0,46
СЮЗ	0,99	0,53	0,51	0,09	0,14	-0,43
ПЮЗ	-0,91	0,21	0,21	0,01	-0,01	0,31

Таблица 6

**Зависимость почвенных потоков CH_4 от температуры
и влажности почвы в 2016 году**

Сезон	Начало лета		Лето		Осень	
	K_W	K_{TS}	K_W	K_{TS}	K_W	K_{TS}
ПСВ	0,29	-0,68	0,51	-0,87	0,69	0,83
ССВ	0,98	-0,78	0,31	-0,01	-0,98	0,13
ВМХ	0,98	-0,93	-0,03	0,17	-0,74	0,57
СЮЗ	0,86	0,76	-0,41	0,31	0,86	-0,94
ПЮЗ	0,96	-0,25	-0,05	0,01	0,5	0,17

Исследования почвенных потоков CO_2 и CH_4 на пяти относительно малококонтрастных элементах полого-холмистого склонового мезорельефа с дерново- подзолистыми почвами в условиях представительных фоновых экосистем Лесной Опытной Дачи РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

показали значительную пространственную дифференциацию потоков парниковых газов. Основным фактором сезонной динамики почвенной эмиссии CO_2 является температура верхних горизонтов почв: с преобладанием локализованных для основных вариантов форм мезорельефа значений положительной корреляции в летний период от 0,64 до 0,91, в осенний период – от 0,62 до 0,91. Основным фактором сезонной динамики почвенного стока CH_4 является влажность верхних горизонтов почв: с преобладанием локализованных для основных вариантов форм мезорельефа значений положительной корреляции в ранний летний период от 0,86 до 0,98, при высокой пространственной дифференциации положительных и отрицательных корреляций в осенний период – от 0,86 до -0,98. Выявленные закономерности и основные экологические факторы пространственной изменчивости и временной динамики фоновых почвенных потоков CO_2 и CH_4 необходимо принимать во внимание при прогнозировании их динамики и экологической оценке воздействия на окружающую среду антропогенно измененных почвенных потоков парниковых газов в условиях Московского мегаполиса.

Литература

1. Авксентьев, А.А. Эмиссия парниковых газов (CO_2 , N_2O , CH_4) чернозёмом обыкновенным Каменной степи: дис. ... канд. биол. наук / А.А. Авксентьев. Воронеж, 2011. 129 с.
2. Васенев, И.И. Пространственно-временная изменчивость основных параметров фонового экологического мониторинга дерново-подзолистых почв Лесной опытной дачи РГАУ-МСХА / И.И. Васенев, Т.В. Раскатова // Вестник МарГТУ. Серия Лес. Экология. Природопользование. 2009. № 2. С. 83-92.
3. Васенев, И.И. Структурно-функциональная организация почвенно-экологического мониторинга Лесной опытной дачи РГАУ-МСХА / И.И. Васенев, В.Д. Наумов, Т.В. Раскатова, Известия ТСХА. 2007. № 4. С. 29-41.
4. Кудеяров и др. Потоки и пулы углерода в наземных экосистемах России / отв. ред. Г. А. Заварзин. М. : Наука, 2007. 315 с.
5. Смагин, А.В. Газовая фаза почв / А.В.Смагин. М: Изд-во МГУ, 2005. 301 с.
6. Ilaire S.E., Lange S.F., Lafond J.A., Pelletier B., Cambouris A.N., Dutilleul P. Multiscale spatial variability of CO_2 emissions and correlations with soil properties // Geoderma. 2012, № 170. P.251-260.

7. IPCC, 2007. Climate change 2007: Mitigation. In: Metz, B., et al. (Eds.), Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York.

8. IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013. P. 867-869.

9. Pickett T.A., Cadenasso M.L., Grove J.M. et al. Urban ecological systems: Scientific foundations and a decade of progress? // J. of Environmental Management. 2011. 92. P. 331– 362.

10. Vasenev I., Tikhonova M., Avilova A. Forest soil quality analysis at the potential reference site for Moscow megalopolis environmental monitoring // 17-th International multidisciplinary scientific geo-conference SGEM 2017. Conference Proceedings. V. 17. Hydrology and water resources. Forest ecosystems. – Vienna: Hofburg Congress Center. 2017. P. 545-552.