ПОЧВОВЕДЕНИЕ, 2015, № 5, с. 562–570

БИОЛОГИЯ ПОЧВ

УДК 631.466.1(470.311.2)

ИЗМЕНЕНИЕ ЦЕЛЛЮЛОЗОЛИТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ГОРОДСКИХ ПОЧВ В СВЯЗИ С ИЗЪЯТИЕМ РАСТИТЕЛЬНОГО ОПАДА (НА ПРИМЕРЕ МОСКВЫ)

© 2015 г. А. Е. Иванова, В. В. Николаева, О. Е. Марфенина

Факультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

e-mail: ivanovaane@gmail.com

Поступила в редакцию 14.02.2014 г.

Выявлены различия показателей биологической активности верхних горизонтов городского урбанозема (г. Москва, СЗАО, р-н Тушино), где опад регулярно изымается и подстилка отсутствует, и фоновой ненарушенной дерново-подзолистой почвы с подстилкой. В исследованных почвах уровни и динамика ферментативной целлюлазной активности были сопоставимы, значения возрастали от весны к осени, что было более резко выражено в урбаноземе осенью во время листопада. Сезонная динамика эмиссии CO_2 при увлажнении в урбаноземе была сходна с фоновой почвой, но абсолютные значения существенно меньше в летний и осенний периоды. Методом субстрат-индуцированного дыхания выявлен отклик на внесение целлюлозы в обеих почвах, однако в урбаноземе возрастание эмиссии CO_2 было в 1.5–2 раза меньше. При внесении опада липы (*Tilia cordata* Mill.) в контактном с опадом слое почвы (0.5 см) целлюлазная активность возрастала, но в урбаноземе эта реакция была менее выражена, чем в дерново-подзолистой почве. Увеличение эмиссии CO_2 при добавлении целлюлозы в контактном с опадом слое, наоборот, было более выражено в урбаноземе и дольше сохранялось.

Ключевые слова: городские почвы, биологическая активность, разложение опада, ферментативная целлюлазная активность, эмиссия CO_2, субстрат-индуцированное дыхание.

DOI: 10.7868/S0032180X15030053

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире площади урбанизированных территорий постоянно увеличиваются. По данным на 2013 г. в мире в городах проживает более 3.69 млрд человек, что составляет 53% мирового населения [32]. Городские территории занимают примерно 3% поверхности суши, хотя фактически площадь может варьировать в зависимости от определения городских территорий [27].

Рост городов является глобальным фактором изменения землепользования и обезлесения [27]. В городских экосистемах почвенный покров трансформируется, изменяются факторы почвообразования, функционирование почвенной биоты [6, 20]. Естественные растительные сообщества на городских территориях деградируют и уничтожаются, их часто искусственно заменяют монодоминантными посадками древесных пород и газонных травяных смесей. Это может повлечь за собой кардинальное изменение условий и скоростей трансформации наиболее широко распространенного природного полимера – целлюлозы – в почвах урбанизированных территорий.

Современные технологии содержания городских территорий часто направлены на изъятие растительных остатков и подстилки. Это отчасти обусловлено правилами содержания газонов и санитарными требованиями, однако постепенно может приводить к истощению органического вещества почв и исчезновению значительной части обитателей подстилочного яруса, например, беспозвоночных и грибов [13, 20]. В Москве согласно действующим нормативным документам предписано регулярно скашивать газонную траву и дважды в год (осенью и весной, после снеготаяния) вывозить осенний листовой опад с территорий бордюрных и партерных газонов вдоль автодорог и жилых домов за пределы города [18, 19, 21, 22]. Внедряемые в последнее десятилетие технологии подсыпок торфокомпостных смесей для обогащения городских почв недостаточно пополняют почвы органическими веществами, которые к тому же быстро, в течение 3–4 лет, минерализуются [10]. Как в этих условиях функционирует почвенная биота, осуществляющая трансформацию растительных остатков в почвах урбанизированных территорий, до сих пор не исследовано.

Целью работы была характеристика биологической активности сообществ целлюлозолитических микроорганизмов в городских почвах при изъятии растительного опада (на примере Москвы).

Таблица 1. Химические свойства почв района Тушино (по [24])

Показатель	Урбанозем маломощный среднесуглинистый на покровных суглинках	Дерново-подзолистая среднемощная неглубокоосветленная глубокооглеенная пылевато-легкосуглинистая на покровных суглинках
Растительность	Разные посадки 30–40-летние липы, березы, рябины, клен. Травяной покров развит слабо	Сосново-широколиственный лес, кустарниковый ярус – орешник и ольха
Особенности участка	Типичный современный регулярно убираемый дворовый участок. Подстилка практически отсутствует	Присутствует горизонт лесной подстилки (≈2 см), представлены подгор. L и F
Рекреационная нагрузка	Сильная	Слабая
Загрязнения тяжелыми металлами	Нет	Нет
Содержание гумуса, %	2.75	2.1
$Ca^{2+} + Mg^{2+}$, смоль(экв)/кг	5.9	6.8
P_2O_5, мг/100 г	18.38	4.54
$CaCO_3$, %	0.12	Нет

Таблица 2. Показатели температуры, влажности и pH исследуемых почв в разные сроки отбора

Год	Срок отбора	Дерново-подзолистая			Урбанозем		
		температура, °C	влажность, %	pH	температура, °C	влажность, %	pH
2009	Начало зимы	3.0	57.2 ± 5.6	4.8	1.5	34.4 ± 3.8	6.0
2010	Начало весны	2.0	36.5 ± 3.0	4.7	6.0	42.1 ± 3.6	6.1
	Начало лета	7.0	42.9 ± 1.7	4.9	8.0	38.6 ± 3.3	6.0
	Начало осени	13.0	16.5 ± 1.8	4.9	14.3	28.0 ± 3.1	6.1
	Начало зимы	2.9	25.6 ± 0.01	4.6	2.0	51.6 ± 0.2	6.1
2011	Начало весны	3.0	42.5 ± 2.0	4.7	5.0	34.4 ± 2.7	6.1
	Начало лета	5.0	39.9 ± 1.3	4.9	8.0	32.0 ± 1.9	6.0
	Начало осени	14.0	20.4 ± 1.5	4.9	12.0	45.1 ± 1.1	6.1
2012	Начало весны	3.7	38.8 ± 3.2	4.7	5.4	49.1 ± 2.1	6.1
	Начало лета	7.3	39.9 ± 2.6	4.9	9.0	34.6 ± 3.3	6.0
	Начало осени	13	19.8 ± 1.9	4.9	15.1	29.0 ± 4.1	6.1
	Начало зимы	3.5	29.7 ± 1.3	4.6	2.0	43.5 ± 2.5	6.1

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводили на площадках в микрорайоне 40-летнего возраста застройки (г. Москва, СЗАО, р-н Тушино), на которых сотрудниками факультета почвоведения МГУ ведутся многолетние исследования по оценке состояния городских почв (табл. 1) [10, 11, 24]. Работы осуществляли в течение трех лет с 2009 по 2012 гг. Почвенные образцы отбирали в разные сезоны: в конце осени после листопада (ноябрь); в начале весны после снеготаяния (март–апрель); в начале лета (июнь); в начале осени до начала листопада (сентябрь). При отборе измеряли влажность, температуру и pH водной вытяжки почв [5] (табл. 2).

Для оценки изменений биологической активности при разложении опада применяли метод изоляции [23, 33], для чего в верхние (0–10 см) слои почв (гор. U урбанозема и гор. A дерново-подзолистой почвы под подстилкой) помещали нестерильный опад липы (*Tilia cordata* Mill.) в капроновых мешочках по 1 г воздушно-сухой массы неизмельченной листвы. Было два варианта – в одном предполагалось участие фауны в разложении растительного опада, для чего использовали мешочки с диаметром пор 2 мм, другой – без участия фауны, где использовали мешочки с диаметром пор 0.1 мм. Размер мешочков 10 × 10 см. Изначально было заложено по 70 шт. в каждом варианте (70 с участием и 70 без участия животных)

для каждой почвы. Отбор образцов почвы проводили из прилегающего к листовому опаду “контактного слоя почвы” (0.5 см от мешочка) и контрольной почвы на удалении более 1–3 м от мешочков. Повторность контрольных образцов трехкратная в каждом сроке в течение трех лет исследований, образцов из контактного слоя почвы – шестикратная. Анализ образцов из контактного слоя почвы проводили в течение двух лет до окончания разложения опада.

Ферментативную целлюлазную активность почв определяли наиболее распространенным фотоколориметрическим методом Баганюк, Щетинской [15], основанном на определении количества глюкозы, образующейся при гидролизе целлюлозы в почве. Согласно “Методическим рекомендациям по гигиеническому обоснованию ПДК химических веществ в почве” для характеристики состояния городских почв при определении ряда важнейших почвенных ферментов по методикам отечественных авторов, выбор методики оставлен на усмотрение исследователя [16]. В наших исследованиях к 10 г почвы в колбе объемом 50 мл, добавляли 1.5 мл толуола, затем 5 мл ацетатного буфера (pH 5.5) и 5 мл 1%-ого водного раствора КМЦ; перемешивали, закрывали и инкубировали при 36°С 72 ч; после добавляли 0.3 г алюмокалиевых квасцов; фильтровали через бумажный фильтр “белая лента” в колбы по 50 мл и объем фильтрата доводили до 50 мл водой. Повторность колб – двухкратная. В качестве контролей использовали почву без внесения субстрата и реактивы без внесения почвы. Для оценки количества глюкозы, образовавшейся при расщеплении целлюлозы, применяли реактив Фелинга: к 6 мл фильтрата в термостойких пробирках объемом 50 мл добавляли 3 мл $CuSO_4$ и 3 мл реактива Фелинга, перемешивали, нагревали на водяной бане при 100°С 10 мин, затем отстаивали 10–15 мин, после чего надосадочный раствор колометрировали при красном светофильтре при длине волны 630 нм. Измерение оптической плотности калибровочных и испытуемых растворов проводили на приборе ФЭК-56М-У42.

Интенсивность выделения CO_2 из образцов почв (контрольных, без внесения листвы, и из контактной зоны) при увлажнении измеряли методом Макарова в модификации Ананьевой [1, 14, 25], для чего в пенициллиновые флаконы помещали 2 г воздушно-сухой почвы, просеянной через сито с отверстиями 2 мм, и добавляли по 0.5 мл воды. Интенсивность выделения CO_2 из образцов почв (контроля и контактной зоны) при внесении субстрата целлюлозы оценивали методом СИД при дополнительном внесении по 0.5 мл раствора микрокристаллической целлюлозы (Merck) в воде в концентрации 20 мг/л [26], предварительно обработанного на УЗДН-1 в течение 10 мин. Для оценки вклада в суммарную эмиссию CO_2 отдельно грибной и бактериальной частей пула почвенных микроорганизмов измерения проводили с внесением антибиотиков [3]: в часть подготовленных с почвенными образцами флаконов дополнительно вносили, соответственно, стрептомицин (15 мг/1 г почвы) и циклогексимид (20 мг/1 г почвы). Для выявления неингибируемого остатка пула микроорганизмов использовали также вариант с одновременным добавлением стрептомицина и циклогексимида. Для равномерного распределения в почвенном образце плохо растворимого циклогексимида проводили обработку раствора циклогексимида на УЗДН-1 в течение 2 мин по аналогии с использованной в работе Хансен с соавт. [26]. Повторность в каждом варианте с разными антибиотиками была 10-кратной. Измерение CO_2 проводили через 48 ч инкубации при 25°С на хроматографе 3700 исп. 4 № 271. Расчет эмиссии CO_2 из образцов исследованных почв без и при внесении целлюлозы осуществляли по формуле [15]

$$CO_2(\text{мкмоль}/(\text{г час})) = \frac{SKV_{\text{фл}}}{V_{\text{пр}}mt}, \quad (1)$$

где S – площадь пика на хроматографе; K – коэффициент пересчета, равный 0.0013; $V_{\text{фл}}$ – объем флакона, равный 13 мл; $V_{\text{пр}}$ – объем пробы, равный 0.5 мл; m – масса почвы, взятой для анализа (2 г); t – время, в течение которого происходило инкубирование (48 ч).

В качестве показателя целлюлозолитической способности почв по эмиссии CO_2 рассматривали величину отклика микробного сообщества на внесение субстрата целлюлозы. Под откликом понимали, во сколько раз увеличивается эмиссия CO_2 из почвы при добавлении субстрата по отношению к эмиссии CO_2 без субстрата. Величину отклика рассчитывали по формуле:

$$\text{Отклик} = \frac{CO_2(\text{мкмоль}/(\text{г час}))_{\text{СИД-целлюлоза}}}{CO_2(\text{мкмоль}/(\text{г час}))_{\text{Базальное дыхание}}}. \quad (2)$$

Полученные данные статистически обрабатывали с помощью программы Microsoft Excel и Statistica 7.0. Значимость влияния факторов присутствия опада и участия животных на почвенную целлюлазную активность и эмиссию CO_2 в контактной зоне проверяли расчетом критерия Фишера: $F = (\sigma 12/\sigma 22)$, где $\sigma 12$ и $\sigma 22$ дисперсии первой и второй выборки соответственно. Фактор принимали значимым при $P < 0.05$. Фактор присутствия опада был значим на всех сроках исследования. Фактор участия животных (сравнение показателей в контактных слоях у мешочков с разным диаметром пор) в большинстве сроков не влиял, поэтому были рассчитаны средние значе-

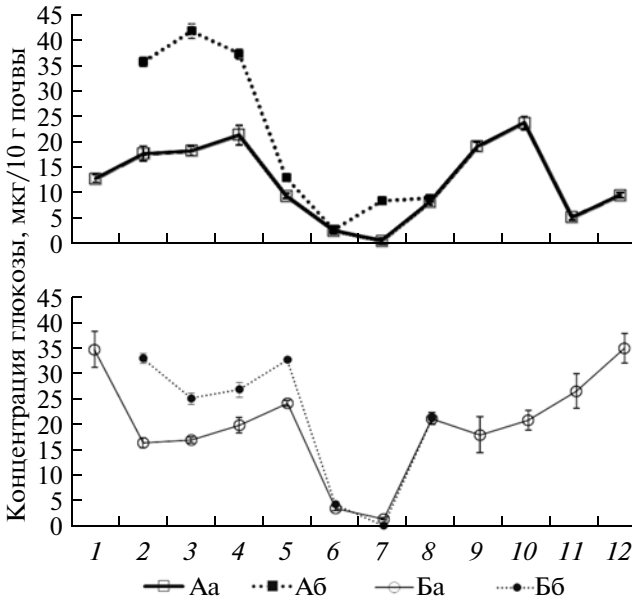

Рис. 1. Динамика почвенной ферментативной целлюлазной активности в дерново-подзолистой почве (А) и в урбаноземе (Б), в самих почвах (а) и в контактном с разлагающимся опадом слое (среднее для вариантов с участием и без участия животных) (б). Обозначения здесь и на рис. 2 по оси *x*: *1* – конец осени 2009 г.; *2* – начало весны 2010 г.; *3* – начало лета 2010 г.; *4* – начало осени 2010 г.; *5* – конец осени 2010 г.; *6* – начало весны 2011 г.; *7* – начало лета 2011 г.; *8* – начало осени 2011 г.; *9* – начало весны 2012 г.; *10* – начало лета 2012 г.; *11* – начало осени 2012 г.; *12* – конец осени 2012 г.

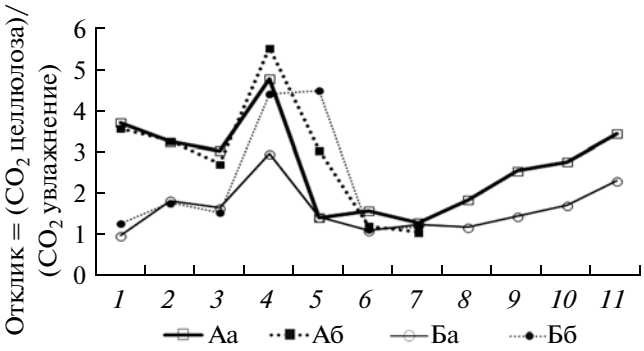

Рис. 2. Величина отклика на внесение целлюлозы в дерново-подзолистой почве (А) и урбаноземе (Б), в самих почвах (а) и в контактном с разлагающимся опадом слое (б) – среднее для вариантов с участием и без участия животных.

ния ферментативной целлюлазной активности и отклика микробного сообщества.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе трехлетних исследований были выявлены отличия режимов температуры и влажности убираемого городского урбанозема от фоновой дерново-подзолистой почвы, покрытой подстилкой (табл. 2), что может оказывать влияние на интенсивность биологической активности почв. Урбанозем весной прогревался быстрее, летом был теплее и осенью остывал раньше. Урбанозем, как правило, характеризовался более высокими уровнями влажности в осенний период и в начале зимы. Реакция среды в урбаноземе была стабильной (pH 6.0–6.1), а в фоновой почве лесопарка значения pH в разные сезоны варьировали сильнее (pH 4.6–4.9).

Динамика изменения почвенной ферментативной целлюлазной активности в период исследования в урбаноземе и фоновой почве была в основном сходной (рис. 1). В обеих почвах в каждый год исследования наблюдали возрастание активности фермента в течение вегетационного периода – от начала весны к началу осени, что явно определяется увеличением поступления свежих органических остатков. Максимумы целлюлазной активности в обеих почвах отмечали осенью. Следует отметить, что в урбаноземе возрастание ферментативной активности в конце осени всегда было более выражено (в 1.3–2.0 раза), чем в почве лесопарка, что подтверждено статистически в 2009, 2011 и 2012 гг.

Уровни и динамика базального дыхания в контрольных образцах урбанозема сопоставимы с фоновой почвой. В обеих почвах в каждый год исследования регистрировали минимальные значения эмиссии CO_2 ранней весной, после зимнего снеготаяния, далее в течение вегетационного периода – от начала весны к началу осени – отмечали постепенное усиление базального дыхания. Однако в урбаноземе оно было выражено достоверно слабее, чем в фоновой почве в летний период 2010 и 2011 г. и осенью 2010 г. (табл. 3).

Анализ динамики эмиссии CO_2, индуцированной субстратом целлюлозой, подчеркнул отмеченные особенности микробных целлюлозолитических пулов почв. Несмотря на схожую сезонную динамику отклика почвенных микроорганизмов при внесении целлюлозы, увеличение эмиссии CO_2 в урбаноземе на протяжении всего эксперимента оказалось в 1.5–2 раза меньшим, чем в дерново-подзолистой почве (табл. 3, рис. 2). К тому же после зимнего периода в урбаноземе не происходило возрастания эмиссии CO_2 (рис. 2).

Отметим, что в 2011 г. уровни изменения почвенной ферментативной целлюлазной активности в обеих почвах были в 3–4 раза ниже, чем в 2010 и 2012 г. (рис. 1). И отклики почв на внесение в лабораторных условиях целлюлозы отсутствовали (рис. 2). Возможно, это связано с последствиями аномально жаркого лета 2010 г.

И в той, и в другой почвах основной вклад в эмиссию CO_2 определялся грибами (табл. 4).

Таблица 3. Общее базальное и субстрат индуцированное целлюлозой дыхание (абсолютные значения скорости потока CO_2 (мкмоль/(г час)) в образцах контрольных участков и контактного слоя почв при разлагающемся опаде (в вариантах без участия (над чертой) и с участием (под чертой) животных)

Почва	Год	Сезон	Базальное дыхание		СИД с целлюлозой	
			контроль	контактный слой почвы	контроль	контактный слой почвы
Дерново-подзолистая	2009	Начало зимы	0.385 ± 0.016	–/–	0.956 ± 0.060	–/–
	2010	Начало весны	0.157 ± 0.017	0.242 ± 0.002/0.224 ± 0.014	0.352 ± 0.044	0.407 ± 0.027/0.382 ± 0.046
		Начало лета	0.296 ± 0.022	0.277 ± 0.012/0.286 ± 0.014	1.023 ± 0.044	1.023 ± 0.073/1.000 ± 0.066
		Начало осени	0.316 ± 0.003	0.338 ± 0.014/0.327 ± 0.013	1.070 ± 0.027	1.144 ± 0.028/1.060 ± 0.016
		Начало зимы	0.185 ± 0.004	0.197 ± 0.011/0.207 ± 0.007	0.894 ± 0.022	0.891 ± 0.043/1.029 ± 0.045
	2011	Начало весны	0.261 ± 0.014	0.367 ± 0.020/0.369 ± 0.009	0.314 ± 0.034	0.341 ± 0.018/0.425 ± 0.014
		Начало лета	0.325 ± 0.003	0.419 ± 0.010/0.385 ± 0.013	0.340 ± 0.024	0.378 ± 0.031/0.383 ± 0.015
		Начало осени	0.516 ± 0.014	–/0.512 ± 0.030	0.562 ± 0.022	–/0.547 ± 0.021
	2012	Начало весны	0.273 ± 0.026	–/–	0.312 ± 0.026	–/–
		Начало лета	0.324 ± 0.002	–/–	0.725 ± 0.039	–/–
		Начало осени	0.270 ± 0.052	–/–	0.479 ± 0.052	–/–
		Начало зимы	0.279 ± 0.025	–/–	0.841 ± 0.028	–/–
Урбанозем	2009	Начало зимы	0.343 ± 0.038	–/–	0.739 ± 0.058	–/–
	2010	Начало весны	0.154 ± 0.008	0.261 ± 0.010/0.221 ± 0.005	0.209 ± 0.006	0.199 ± 0.016/0.220 ± 0.014
		Начало лета	0.205 ± 0.007	0.231 ± 0.004/0.228 ± 0.003	0.392 ± 0.052	0.433 ± 0.034/0.410 ± 0.023
		Начало осени	0.276 ± 0.008	0.288 ± 0.006/0.294 ± 0.013	0.474 ± 0.034	0.459 ± 0.034/0.491 ± 0.021
		Начало зимы	0.176 ± 0.006	0.197 ± 0.014/0.173 ± 0.008	0.522 ± 0.029	0.701 ± 0.036/0.760 ± 0.088
	2011	Начало весны	0.250 ± 0.003	0.276 ± 0.005/0.274 ± 0.012	0.184 ± 0.018	0.248 ± 0.022/0.248 ± 0.014
		Начало лета	0.230 ± 0.003	0.288 ± 0.018/0.299 ± 0.022	0.227 ± 0.026	0.280 ± 0.012/0.233 ± 0.017
		Начало осени	0.373 ± 0.019	0.414 ± 0.019/0.424 ± 0.032	0.355 ± 0.015	0.389 ± 0.020/0.383 ± 0.025
	2012	Начало весны	0.267 ± 0.015	–/–	0.278 ± 0.029	–/–
		Начало лета	0.306 ± 0.019	–/–	0.338 ± 0.015	–/–
		Начало осени	0.196 ± 0.041	–/–	0.253 ± 0.019	–/–
		Начало зимы	0.243 ± 0.033	–/–	0.606 ± 0.018	–/–

Примечание. Прочерк – нет данных.

Таблица 4. Вклад грибной и бактериальной составляющих (%) в общее базальное и субстрат индуцированное целлюлозой дыхание (средние значения по сезонам за 2009–2012 гг.)

Почва	Сезон	Базальное дыхание		СИД с целлюлозой	
		грибы	бактерии	грибы	бактерии
Дерново-подзолистая	Начало весны	68–81	19–32	66–81	19–34
	Начало лета	70–74	26–30	71–80	20–28
	Начало осени	71–78	19–24	67–82	18–33
	Начало зимы	65–80	20–35	67–70	30–33
Урбанозем	Начало весны	58–85	15–42	55–84	16–45
	Начало лета	60–75	25–40	54–75	25–46
	Начало осени	64–77	25–34	60–83	27–40
	Начало зимы	68–77	23–32	52–81	19–48

В урбаноземе вклад в базальное дыхание составил 58–85% для грибов и 15–42% для бактерий, а в дерново-подзолистой почве 65–81% и 19–35%, соответственно. То есть для урбанозема была характерна повышенная вариабельность участия отдельных групп почвенных микроорганизмов, по сравнению с фоновой почвой. При внесении субстрата целлюлозы вариабельность в урбаноземе еще более возрастала в сторону увеличения доли бактерий (табл. 4): вклад грибов составлял уже 52–84%, бактерий – 16–48%. В то же время при внесении целлюлозы в дерново-подзолистую почву вклад отдельных групп не изменялся.

В контактном слое почвы, прилегающем к поверхности мешочков с опадом, динамика изменения целлюлазной активности была сходной с контрольными участками каждой почвы. Значения целлюлазной активности контактного слоя были в обеих почвах значительно больше, чем в контроле. В первый год разложения субстрата превышение составило: в урбаноземе – в 1.7–2 раза, в дерново-подзолистой почве в 1.5–2.4 раза (рис. 1). При этом целлюлазная активность в контактном с опадом слое почве оказалась существенно слабее в урбаноземе, чем в фоновой почве. Спустя 1–1.5 года от начала эксперимента регистрировали уменьшение целлюлазной активности в контактном слое до уровня контрольных участков в обеих почвах (рис. 1), что может быть связано с разложением опада.

Анализ изменения эмиссии CO_2 при добавлении субстрата целлюлозы к образцам из контактного слоя обеих почв не выявил отличий от контрольных участков в первый год после размещения опада в почвах. Но в начале второго года разложения опада, с конца осени до начала весны, регистрировали отклик на внесение субстрата целлюлозы в контактный с опадом слой, при этом величина отклика существенно возрастала в обеих почвах – в 2–4 раза по сравнению с контролем (рис. 2). После разложения опада отклик нивелировался.

Для урбанозема при использовании факторного анализа показано влияние присутствия разлагающегося опада на активность целлюлозолитических микроорганизмов, оцененную по базальному дыханию. В прилегающем к опаду контактном слое почвы выявлено значимое ($P < 0.05$) отличие от контрольных участков в весеннее-летний период, которое, однако, не регистрировалось осенью, когда на контрольную почву поступал свежий лиственный опад. Методом СИД с целлюлозой было обнаружено, что различия контактного слоя и контрольной почвы были значимы спустя год после начала разложения опада (табл. 3). Это указывает на постепенный характер изменения состояния микробного пула и важность поступления субстрата для его функционирования.

ОБСУЖДЕНИЕ

В связи с особенностями формирования и хозяйственной эксплуатации городские почвы существенно отличаются от фоновых почв по функционированию и активности комплекса целлюлозолитических микроорганизмов.

Имеющиеся к настоящему времени исследования, посвященные оценке целлюлозолитической активности антропогенно-преобразованных почв, в основном, проводятся на промышленно или транспортно загрязненных участках, причем в отдельные сроки, но не в процессе сезонной динамики [7, 8, 12, 17, 29, 30, 31]. Остается неизученным вопрос о целлюлозолитической активности городских почв селитебных участков жилых кварталов, менее подверженных химическому загрязнению, но часто с бытовым органическим загрязнением, составляющих значительную часть городских территорий. Ранее на некоторых селитебных участках Москвы, в том числе и рассмотренных в нашей работе, как аппликационным методом [10], так и методом целлюлозных приманок [11] были показаны низкие уров-

ни целлюлозолитической активности урбиковых горизонтов.

Показатели биологической активности, основанные на эмиссии CO_2 [2, 28], выступают одним из наиболее часто применяемых современных методов оценки процессов трансформации органических веществ. При использовании таких подходов нами было отмечено, что городские почвы характеризуются более низким уровнем базального дыхания в вегетационный период, отсутствием в большинстве случаев реакции на внесение целлюлозы. Так, возрастание эмиссии CO_2 при внесении целлюлозы в урбаноземе оказалось в 1.5–2 раза меньшим, чем в почве лесопарка (рис. 2). Это не противоречит полученным другими исследователями данным о снижении биологической активности (базального дыхания, СИД с глюкозой) незагрязненных урбанизированных почв в районах многоэтажной застройки на примере г. Пермь [7]. Сниженное по сравнению с залесенной территорией городского парка базальное дыхание было установлено и в почвах придорожной городской территории г. Касета (Италия) [30].

Другим более чувствительным показателем по сравнению с актуальной скоростью разложения субстрата считают почвенную целлюлазную ферментативную активность [4]. Рядом исследователей было показано, что активность целлюлаз в городских почвах может уменьшаться по сравнению с фоновыми и парковыми лесными, если эти почвы загрязнены тяжелыми металлами [17, 30] или воздушными выбросами [29]. В наших исследованиях уровни и динамика ферментативной целлюлазной активности в урбаноземе жилого района Тушино в течение вегетационного периода были сопоставимы с фоновой почвой, что можно рассматривать как индикатор незначительного загрязнения исследованного нами селитебного участка.

В качестве общей закономерности отмечено усиление целлюлазной активности обеих почв от весны к осени. Возрастание активности целлюлаз в 2 раза осенью по сравнению с весной отмечалось и ранее, как для удаленных от дороги парковых участков, так и для придорожных почв городских территорий [30]. Вероятно, изменение целлюлазной активности почв, в первую очередь, обусловлено сезонными изменениями, а отличия почв селитебной и парковой зон по этому показателю проявляются только в осенний период. Так, именно осенью регистрировали максимальные значения ферментативной целлюлазной активности в урбаноземе, даже более высокие, чем в фоновой почве (рис. 1). Это может быть связано с поступлением свежего опада непосредственно на поверхность исследуемого почвенного урбикового горизонта, на котором отсутствует подстилка. Вместе с опадом в верхний слой урбанозема поступает пул микроорганизмов и их ферментов. В то время как в фоновой дерново-подзолистой почве основная масса целлюлозолитических ферментов сосредоточена в имеющейся и постоянно обновляющейся подстилке [9].

В результате последующего регулярного ежегодного изъятия с поверхности урбанозема растительного опада и целлюлозолитических микроорганизмов в урбаноземе в весенний период регистрируется слабая активность этой важной функциональной группы, что видно по отсутствию отклика эмиссии CO_2 на внесение целлюлозы (рис. 2). В то время как в дерново-подзолистой почве после снеготаяния субстрат-индуцированное целлюлозой дыхание возрастало, что, вероятнее всего, обусловлено сохранением подстилки.

Таким образом, выявленные ранее низкие показатели актуальной скорости разложения целлюлозосодержащего субстрата (льняного полотна [10], целлюлозных приманок [11]) в урбаноземах Москвы могут быть обусловлены сниженным содержанием и слабой активностью почвенного микробного пула, в первую очередь, пула целлюлозолитических микроорганизмов, что подтверждается в настоящей работе по эмиссии CO_2. При этом ферментативная активность верхнего лишенного подстилки слоя урбанозема оказывается сопоставимой с активностью гумусового перекрытого подстилкой горизонта дерново-подзолистой почвы. Отсутствие корреляции между актуальной интенсивностью разложения целлюлозосодержащего субстрата (картонных полосок) и потенциальной целлюлазной активности почвенных образцов, оцененной лабораторно, в городских почвах было отмечено также при изучении почв города Оулу в Норвегии [29].

Одной из причин меньшей выраженности процессов деструкции в урбаноземе может быть подавление, ухудшение развития комплекса целлюлозолитических грибов. Это прослеживается по уменьшению вклада грибов в разложение целлюлозы методом селективного ингибирования (табл. 4). В предыдущих исследованиях на этих же экспериментальных городских площадках уже отмечали, что по сравнению с ненарушенными фоновыми почвами в урбаноземе происходит уменьшение разнообразия и упрощение структуры комплексов целлюлозолитических грибов, выявленных методом целлюлозных приманок [11].

Первопричиной угнетения целлюлозолитических организмов в урбаноземах может служить повсеместный сбор и вывоз опавших листьев в осенний период. Однако нормативные документы [18, 19] предусматривают лишь вывоз листьев с тротуаров, дорог и с поросших травой газонов, на расстоянии 10 м от проезжей части и 5 м домов.

На большем удалении листовой опад предписано *не вывозить*, а *распределять по поверхности* с последующей осенней или весенней неглубокой (5–10 см) прикопкой и полностью сохранять на территориях лесопарков, парков и скверов. Но в большинстве случаев это правило не соблюдается.

Между тем, прикопка опада как в лесопарке, так и в городе приводит к существенной активации целлюлозолитических микроорганизмов в контактном с разлагающимся опадом слое почвы. Это известный феномен аккумуляции и активации пула микроорганизмов вблизи субстрата [9]. Усиление ферментативной целлюлазной активности в прилегающем к опаду слое было менее выражено в урбиковом горизонте, чем в гор. А фоновой дерново-подзолистой почвы и сглаживалось в обеих почвах после разложения опада. Методом СИД с целлюлозой было показано увеличение эмиссии CO_2 в контактном слое в обеих почвах, но лишь через год от начала разложения опада (рис. 2, табл. 3), что можно рассматривать как свидетельство обогащения контактного с разлагающимся опадом почвенного слоя пулом целлюлозолитических микроорганизмов. В урбаноземе эффект усиления отклика на внесение субстрата был длительнее. После разложения опада активации дыхания целлюлозолитических микроорганизмов в контактом слое обеих почв не наблюдали. То есть все достигаемые эффекты насыщения городских почв пулом целлюлозолитических микроорганизмов и их ферментами нивелировались по окончании разложения однократно прикопанного растительного опада.

Таким образом, для городского урбанозема показано существенное угнетение важной функциональной группы целлюлозолитических микроорганизмов по сравнению с фоновой дерново-подзолистой почвой, что, скорее всего, связано с неконтролируемым повсеместным вывозом опада и невосполнением естественного микробного пула.

Сохранение и прикопка листьев в урбаноземе может приводить к увеличению целлюлазной активности, но лишь на период деструкции субстрата. Для полномерного восстановления целлюлазной способности городских почв недостаточно однократного прикапывания листьев, необходимо регулярное их сохранение на поверхности урбаноземов, лишенных травянистой растительности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При исследовании ряда показателей целлюлолитической активности микробных комплексов (базальное дыхание, СИД целлюлозой) установлено, что их сезонная динамика в городских и фоновых дерново-подзолистых почвах сходна, однако абсолютные значения существенно меньше в урбаноземе, где подстилка ежегодно отторгается. Уровни и динамика ферментативной целлюлазной активности в весенне-летний период в почвах были сопоставимы, но резко возрастали в урбаноземе осенью во время листопада. В результате поступления растительного опада в контактном с опадом слое городской и фоновой почв происходит увеличение целлюлазной активности и усиление субстрат-индуцированного целлюлозой дыхания, но этот процесс нивелируются после разложения опада.

Авторы выражают искреннюю *благодарность* за ценные комментарии и рекомендации при работе на объектах, при планировании и проведении эксперимента сотрудникам кафедры географии почв факультета почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова Т.В. Прокофьевой и А.А. Рахлеевой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ананьева Н.Д., Благодатская Е.В., Орлинский Д.Г.* Микробиологические аспекты определения скорости субстрат-индуцированного дыхания почвенных микроорганизмов // Почвоведение. 1993. № 11. С. 72–77.
2. *Ананьева Н.Д.* Микробиологические аспекты самоочищения и устойчивости почв. М.: Наука, 2003. 223 с.
3. *Ананьева Н.Д., Сусьян Е.А., Чернова О.В., Чернов И.Ю., Макарова О.Л.* Соотношение грибов и бактерий в биомассе разных почв, определяемое селективным ингибированием // Микробиология. 2006. Т. 75. № 6. С. 807–913.
4. *Воробейчик Е.Л.* Экологическое нормирование токсических нагрузок на техногенные экосистемы. Автореф. дис. ... докт. биол. н. Екатеринбург, 2004. 50 с.
5. *Воробьева Л.А* Химический анализ почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 272 с.
6. *Герасимова М.И., Строганова М.Н., Можарова Н.В., Прокофьева Т.В.* Антропогенные почвы: генезис, география, рекультивация. Уч. пособие / Под ред. Г. В. Добровольского. М.: Ойкумена, 2003. 270 с.
7. *Еремченко О.З., Шестаков И.Е., Каменщикова В.И.* Эколого-биологические свойства урбаноземов г. Перми // Вестн. Удмуртского ун-та. 2010. Вып. 4. С. 56–63.
8. *Жуков А.В., Лядская И.В.* Целлюлозолитическая активность техноземов на экспериментальном участке рекультивации земель, нарушенных горнодобывающей промышленностью // Вестн. Донецкого нац. ун-та. Сер. А: Естественные науки. 2009. Вып. 2. С. 286–290.
9. *Звягинцев Д.Г., Добровольская Т.Г., Бабьева И.П., Зенова Г.М., Лысак Л.В., Марфенина О.Е.* Роль микроорганизмов в биогеоценотических функциях почв // Почвоведение. 1992. № 6. С. 3–77.
10. *Иванников Ф.А.* Трансформация почвоподобных техногенных образований в условиях урбоэкоси-

стемы (на примере г. Москвы). Автореф. дис. ... канд. биол. н. М., 2011. 25 с.

11. *Иванова А.Е., Марфенина О.Е., Суханова И.И.* Функциональное разнообразие микроскопических грибов в городских почвах разного возраста формирования // Микология и фитопатология. 2008. Т. 42. № 5. С. 450–460.
12. *Курачев В.М., Батурина В.Б.* Темпы разложения растительных остатков в почвах техногенных ландшафтов // Сиб. экол. журн. 2005. Вып. 5. С. 789–793.
13. *Колесникова А., Мольков О.* Почвенные беспозвоночные в городской среде // Вестн. ИБ. 2008. № 12. С. 16–19.
14. *Макаров Б.И.* Упрощенный метод определения дыхания почвы и биологической активности // Почвоведение. 1957. № 9. С. 119–122.
15. Методы почвенной микробиологии и биохимии / Под ред. Д.Г. Звягинцева. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. 303 с.
16. Методические рекомендации по гигиеническому обоснованию ПДК химических веществ в почве от 5 августа 1982 г. № 2609–82.
17. *Мынбаева Б.Н., Медведева А.В.* Подавление биохимической активности загрязненных городских почв // Изв. Алтайского гос. ун-та. 2011. Вып. 3–2(71). С. 23–25.
18. Постановление Правительства Москвы от 10 сентября 2002 г. № 743-ПП “Об утверждении правил создания, содержания и охраны зеленых насаждений города Москвы”.
19. Постановление Правительства Москвы от 11 мая 2010 г. № 386-ПП “О внесении изменений в постановление Правительства Москвы от 10 сентября 2002 г. № 743-ПП”.
20. Почва, город, экология / Под ред. Г.В. Добровольского М.: Фонд “За экономическую грамотность”, 1997. 320 с.
21. Рекомендации по технологии уборки проезжей части городских дорог с применением средств комплексной механизации. Отдел научно-технической информации. АКХ. М., 1989.
22. Санитарные правила содержания территории населенных мест. СанПИН 42-128-4690-88. (Утв. МИНЗДРАВОМ СССР 05.08.1988 № 4690–88).
23. *Стриганова Б.Р.* Методы оценки деятельности беспозвоночных сапрофагов в почве // Методы почвенно-зоологических исследований. М.: Наука, 1975. С. 108–128.
24. *Строганова М.Н., Мартыненко И.А., Прокофьева Т.В., Рахлеева А.А.* Физико-химические и физико-механические свойства урбанизированных лесных почв // Лесные экосистемы и урбанизация / Под ред. С.Л. Рысина. М.: Тов-во науч. изданий КМК, 2008. 227 с.
25. *Сусьян Е.А., Ананьева Е.А., Гавриленко Е.Г., Чернова О.В., Бобровский М.В.* Углерод микробной биомассы в профиле лесных почв Южной Тайги // Почвоведение. 2009. № 10. С. 1233–1240.
26. *Hanson C.A., Allison S.D., Bradford M.A., Wallenstein M.D., Treseder K.K.* Fungal Taxa Target Different Carbon Sources in Forest Soil. Springer. New York. 2008. № 11.
27. *McDonald R.I., Marcotullio P.J., Güneralp B.* Urbanization and Global Trends in Biodiversity and Ecosystem Services // Urbanization, Biodiversity and Ecosystem Services: Challenges and Opportunities: A Global Assessment / Eds.: T. Elmqvist et al. 2013. P. 31–52.
28. *Neiendam N.M., Winding A.* Microorganisms as Indicators of Soil Health. Ministry of the Environment, National Environmental Research Institute. NERI Technical Report . 2002. № 388. P. 84.
29. *Ontonen R., Lähdesmäki P., Markkola M.* Cellulase activity in forest humus along an industrial pollution gradient in Oulu, Northen Finland // Soil Biology and Biochemistry. 1994. V. 26. № 1. P. 97–101.
30. *Papa S., Bartoli G., Pellegrino A., Fioretto A.* Microbial activities and trace element contents in an urban soil // Environ Monit Assess. 2010. V. 165. P. 193–203.
31. *Shi Z.J., Lu Y., Xu Z.G., Fu S.L.* Enzyme activities of urban soils under different land use in the Shenzhen city, China // Plant soil environ. 2008. № 54(8). P. 341–346.
32. The World bank, 2013 http://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL/countries?display=graph
33. *Verhoef H.A.* Litter bag method. Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry / Eds.: K. Alef, P. Nannipieri. Academic Press, 1995. P. 485–487.