

УДК 631.416.1/417.1/46

ВЛИЯНИЕ УРБАНИЗАЦИИ НА ПОКАЗАТЕЛИ БИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ МИКРОБНОГО СООБЩЕСТВА АВТОМОРФНЫХ ЛЕСНЫХ ПОЧВ КАРЕЛИИ

Мамай А.В., Мошкина Е.В.

*ФГБУН «Институт леса Карельского научного центра РАН» (ИЛ КарНЦ РАН), Петрозаводск,
e-mail: krutova_n@mail.ru, lena_moshkina@mail.ru*

Впервые в профиле автоморфных почв городских лесов и парков Петрозаводского городского округа и их природных аналогов определены микробиологические показатели: активная микробная биомасса, базальное и удельное микробное дыхание, доля микробного углерода в органическом углероде, доля микробного азота в общем азоте, характеризующие физиологическое состояние почвенного микробного сообщества. В результате исследования установлено, что качественный и количественный состав азотного фонда и показатели биологической активности почв разного генезиса в хвойных и мелколиственных лесах отражают экологические условия формирования почв. Структура азотного фонда лесных почв характеризуется высокой стабильностью и может быть диагностическим показателем, характеризующим степень антропогенного воздействия на почвы, а показатели функциональной активности почв можно использовать для характеристики экологической, природорегулирующей и производственной функций почв.

Ключевые слова: лесные почвы, плодородие, биологическая активность почв, урбанизация, базальное дыхание, микробная биомасса, метаболический коэффициент

URBANIZATION EFFECTS ON THE BIOLOGICAL ACTIVITY OF THE MICROBIAL COMMUNITY IN AUTOMORPHIC FOREST SOILS OF KARELIA

Mamai A.V., Moshkina E.V.

*Forest Research Institute, Karelian Research Centre RAS, Petrozavodsk,
e-mail: krutova_n@mail.ru, lena_moshkina@mail.ru*

The following microbiological indices were for the first time determined in the profile of automorphic soils in Petrozavodsk city forests and parks and in their natural peers: active microbial biomass, basal and specific microbial respiration, microbial carbon contribution to organic carbon, microbial nitrogen contribution to total nitrogen. These indices characterize the physiological condition of the soil's microbial community. The study has demonstrated that the qualitative and quantitative composition of the nitrogen pool and the indicators of biological activity in soils of various geneses in coniferous and small-leaved forests mirror the ecological conditions under which the soils have been forming. The structure of the nitrogen pool of forest soils features high stability, and can serve as a diagnostic indicator of the degree of human impact on the soil. Functional activity parameters of the soil, on the other hand, can be used to characterize the ecological, regulatory and productive functions of soils.

Keywords: forest soils, fertility, biological activity of soils, urbanization, basal respiration, microbial biomass, metabolic quotient

Урбанизация является одной из основных тенденций изменения современного землепользования, при которой возрастающее антропогенное воздействие на городские и пригородные леса вызывает нежелательные экологические последствия. Лесные экосистемы играют важную роль в сохранении биологического разнообразия. Их рассматривают как фактор, стабилизирующий биосферные процессы, в частности, сдерживающий развитие негативных проявлений антропогенного воздействия на окружающую среду. Им же принадлежит основная роль в регуляции глобальных биогеохимических циклов углерода (С) и азота (N) в наземных экосистемах. Учитывая исключительно важную роль почвенного покрова в функционировании природных экосистем, особое внимание уделяется изучению городских почв, их плодородию и экологическому состоянию. Особая актуальность исследования

почв и почвенного покрова городских лесов обусловлена их экологической и рекреационной ролью, а проблема их сохранения является важнейшей для обеспечения устойчивого развития городов.

Среди всех показателей, характеризующих лесорастительные свойства почв, особо выделяют N, так как его содержание и доступность в условиях Карелии определяют продуктивность лесов. Для описания обеспеченности почв N обычно учитывают его валовое содержание и количество минеральных форм. О состоянии органического вещества почв часто судят по количеству органического С, содержанию и соотношению С гуминовых и фульвокислот, и по отношению С/N, описывающему скорость минерализации. Однако не менее информативными являются характеристики функционирования микробного сообщества почв, поскольку микробная биомасса (МБ) – это

активный и наиболее чувствительный к факторам окружающей среды компонент органического вещества почв. Накопление МВ в почве, ее отмирание и минерализация тесно связаны с процессами трансформации С и N почв, поскольку МВ определяет скорость разложения, обновления и стабилизации органического вещества и минерализационно-иммобилизационные превращения азота.

Для оценки биологического состояния и степени нарушения функций почв под влиянием экологических и антропогенных факторов широко используется интегральный подход с применением методов определения биологической активности почв. Такие микробиологические показатели, как запас микробного углерода и дыхательная активность профиля разных почв, давно привлекают внимание экологических исследователей во всем мире [6, 9, 10]. Эти данные важны и часто используются для проведения экологических наблюдений и прогнозов состояния почв.

Цель данной работы – количественная оценка содержания углерода и азота микробной биомассы и определение экофизиологических показателей с использованием метода субстрат-индуцированного дыхания, позволяющих охарактеризовать интенсивность трансформации соединений С и N естественных и антропогенно нарушенных почв.

Материалы и методы исследования

Исследования проводили на автоморфных почвах в рекреационных лесах под сосновыми, еловыми и березовыми насаждениями Петрозаводского городского округа (61°45–48'N; 34°14–28'E), а также в городском парке под вязово-дубовой аллеей (земли общего пользования). Контролем служили автоморфные подзолистые почвы под хвойными и лиственными лесами, расположенные на территории заповедника «Кивач» и в районе п. Березовка Кондопожского района (62°12–17'N; 34°00–08'E). Названия почв с естественным сложением даны по региональной классификации [3]. Для городских почв использовали классификацию, предложенную учеными Московского Государственного Университета [4].

Почвы под сосновыми лесами: сосняк черничный (Ск) – контроль, чистое сосновое насаждение (10С) со вторым ярусом ели (10Е) и примесью березы, возраст 170 лет, класс бонитета II.0. Почва – подзол иллювиально-гумусово-железистый песчаный на двучленных озерно-ледниковых отложениях; сосняк черничный (С1) – пос. Сайнаволоок. Возраст 60 лет, (10С+Б), II класс бонитета. Почва – подзол иллювиально-гумусово-железистый песчаный на озерно-ледниковых песчаных отложениях; сосняк черничный (С2) – р-он ТЭЦ. Возраст 100 лет (10С), I класс бонитета. Почва поверхностно подзолистая иллювиально-железисто-гумусовая супесчаная на завалуненной морене.

Почвы под еловыми лесами: ельник черничный (Ек) – контроль, чистое еловое насаждение (10Е), возраст 120 лет, класс бонитета III.0. Почва – подзол ил-

лювиально-гумусово-железистый пылевато-песчаный на двучленных водно-ледниковых отложениях; ельник кисличный (Е1) – р-он Ключевая. Возраст 100 лет, (10Е), I класс бонитета. Почва поверхностно подзолистая иллювиально-гумусово-железистая супесчаная на завалуненной морене; ельник черничный (Е2) – р-он Кукковка. Возраст 70 лет, (7Е3Ос+Б), II класс бонитета. Почва подзолистая иллювиально-железисто-гумусовая супесчаная грунтово-глееватая на морене.

Почвы под березовыми насаждениями: березняк злаково-разнотравный (Бк) – контроль, заповедник «Кивач». Березовый древостой (10Б, ед. С). Единично встречается сосна, осина, ольха серая. Возраст 60 лет, класс бонитета Ia.8. Почва – подзолистая грунтово-глееватая супесчаная на суглинках, переходящих в ленточные глины; березняк черничный (Б1) – р-он Птицефабрика. Возраст 80 лет, (9Б10С), III класс бонитета. Почва дерново-подзолистая грунтово-глееватая супесчаная на грубопесчаной морене с большим количеством щебня и гальки; березняк травяной (Б2) – р-он Ключевая. Возраст 40 лет, (10Б), III класс бонитета. Индустрием (пылевато-песчаная супесь); вязово-дубовая аллея (П) на территории городского парка. Возраст 70 лет, (8В 2Д), II класс бонитета. Индустрием (пылевато-песчаный связный песок).

Закладка пробных площадей, отбор и анализ почвенных образцов (определение кислотности, общего С и валового N, количество минеральных соединений N, содержание фосфора и калия, объемный вес, гранулометрический состав) проведены общепринятыми методами [1]. Субстрат-индуцированное дыхание (СИД) оценивали по скорости начального максимального дыхания микроорганизмов после обогащения почвы глюкозой [7]. Углерод микробной биомассы (Смик) рассчитывали по формуле: $S_{мик} (мкг\ С\ г^{-1}\ почвы) = (мкл\ CO_2\ г^{-1}\ ч^{-1}) \cdot 40.04 + 0.37$ [7]. Базальное дыхание (БД) определяли по скорости выделения CO_2 почвой за 24 часа ее инкубации при 22°C и 60% ПВ. Скорость БД выражали в $мкг\ C-CO\ г^{-1}\ почвы\ ч^{-1}$. Микробный метаболический коэффициент qCO_2 рассчитывали, как отношение скоростей выделения CO_2 из необогащенной почвы (БД) и почвы, в которую внесен избыток глюкозы (СИД) ($qCO_2 = БД/СИД$). Было рассчитано содержание микробного (Смик) углерода в общем органическом (Сорг): $Смик / Сорг, \%$. Для расчета содержания азота в микробной биомассе (Nмик) использовали соотношение $N_{мик}:С_{мик} = 0.15$ [8]. Статистическая обработка полученных данных выполнена с использованием программ Microsoft Office Excel.

Результаты исследования и их обсуждение

Проведенные исследования показали, что пространственная изменчивость основных режимных и физико-химических показателей почв городских лесов существенно выше, чем на контрольных участках. В целом, исследуемые почвы характеризовались легким гранулометрическим составом, средним содержанием обменных оснований и обедненностью биофильными элементами. Основные отличия почв городских лесов по сравнению с контролем заключались в подщелачивании верхних горизонтов на 0.3–0.5 ед. рН, сокращении мощности лесных подстилок (в 1.4–1.9 раза), значительном

увеличении плотности верхней части профиля почв (в 1.1–1.5 раза), повышенном содержании N-NO₃ и азота легкогидролизуемых соединений (в 2–5 раз). Увеличение доли нитратного азота в азотном фонде почв городских лесов по сравнению с контролем может быть обусловлено аэротехногенным загрязнением оксидами азота от автотранспорта и теплоэлектроцентрали. Широкое соотношение C:N, свидетельствующее о слабых процессах минерализации органического вещества почвы, было несколько ниже в почвах естественных биогеоценозов.

Распределение азота и углерода микробной биомассы по профилю изучаемых почв имело общие тенденции и специфические особенности. Наибольшее содержание Смик и Nмик приурочено к органогенным горизонтам исследуемых почв. Под листовыми насаждениями в черте города величина Смик и Nмик была значительно выше, чем под хвойными. Так, Смик изменяется в пределах 2.43–8.53 и 8.30–13.30 г С/кг, Nмик – 0.36–1.28 и 1.25–2.00 г N/кг для хвойных и листовых насаждений, соответственно. Вниз по профилю содержание Смик и Nмик резко уменьшалось: Смик варьировало 0.04–0.58 и 0.06–1.01 г С/кг, а Nмик: 0.01–0.09 и 0.01–0.15 г N/кг под хвойными и листовыми насаждениями, соответственно.

В лесных почвах под хвойными и березовыми древостоями, взятых в качестве контроля содержание углерода микробной биомассы составляло 0.08–7.49, 0.04–11.16, 0.08–17.05 г С/кг, азота микробной биомассы 0.01–0.17, 0.01–1.67, 0.01–2.56 г N/кг почвы сосняка черничного, ельника черничного и березняка злаково-разнотравного, соответственно. Величина Смик и Nмик для верхних органогенных горизонтов была выше в почвах городских и пригородных лесов, по сравнению с контролем. Снижение в минеральных горизонтах содержания азота, ассоциированного с микробной биомассой, очевидно, связано с общим распределением элемента по профилю, а также с распределением его лабильных форм. В целом по содержанию Смик и Nмик почвы изучаемых биогеоценозов можно расположить в ряду по увеличению их биологической активности: сосняки-ельники-березняки.

Отмечено уменьшение запасов Сорг и Нобщ в органогенных горизонтах почв городских сосновых лесов по сравнению с контролем, и обратная тенденция для почв под еловыми древостоями и листовыми насаждениями. Снижение запасов азота и углерода в верхней части профиля почв городских сосновых лесов вероятно связано с повышенной рекреа-

ционной нагрузкой на данных пробных площадках, сопровождающейся активным вытаптыванием, которое приводит к уплотнению и сокращению мощности лесной подстилки и вырубкой деревьев, которая существенно сокращает количество опада и отпада на изучаемой территории. На объекте, расположенном на территории общего пользования (парк) также отмечено сокращение горизонта U0 в связи с проведением мероприятий по уходу за парком (скашивание травы, уборка листвы), что отразилось на запасе азота в данном горизонте. На фоне увеличения запасов Сорг отмечалось уменьшение доли Смик в 3–5 раз по сравнению с контролем. Доля микробного углерода в общем органическом углероде органогенных горизонтов почв в городских сосняках и контроле практически не различалась.

В 50-сантиметровом слое исследуемых почв на фоне увеличения запасов Сорг и Нобщ в почвах городских и пригородных лесов и парка, отмечалось увеличение общих запасов Смик и Nмик по сравнению с контролем (рис. 1, 2).

Возможно, возрастание антропогенной нагрузки приводит к увеличению микробной биомассы, как способ сопротивления ухудшающимся условиям местообитания. При этом доля микробного углерода в углероде органического вещества в 50-сантиметровом слое исследуемых почв не превышала 1% (рис. 1, Б), а доля азота микробной биомассы в общем азоте варьировала в пределах 1.5–5% (рис. 2, В). Отмечено значительное увеличение запасов валового азота и азота микробной биомассы в профиле урбаноземов по сравнению с почвами с естественным профилем.

Наибольшая величина базального дыхания, соответствующая потенциальной биологической активности, или потенциальной скорости минерализации органического вещества исследуемых почв отмечена для почв под листовыми насаждениями городских и контрольных участков по сравнению с почвами под хвойными насаждениями, с максимумом в органогенных горизонтах. Так, величина БД изменялась в органогенных горизонтах в широких пределах: от 0.29 до 1.31 г С/кг почвы в сут под хвойными лесами и 1.43–2.32 г С/кг почвы в сут – под листовыми насаждениями. Вниз по профилю БД почв заметно снижалась и варьировала в пределах 0.14–2.13 и 0.08–1.77 г С/кг в сут под хвойными древостоями, 0.33–6.61 и 0.31–1.02 г С/кг почвы в сут – под листовыми насаждениями городских и контрольных территорий, соответственно.

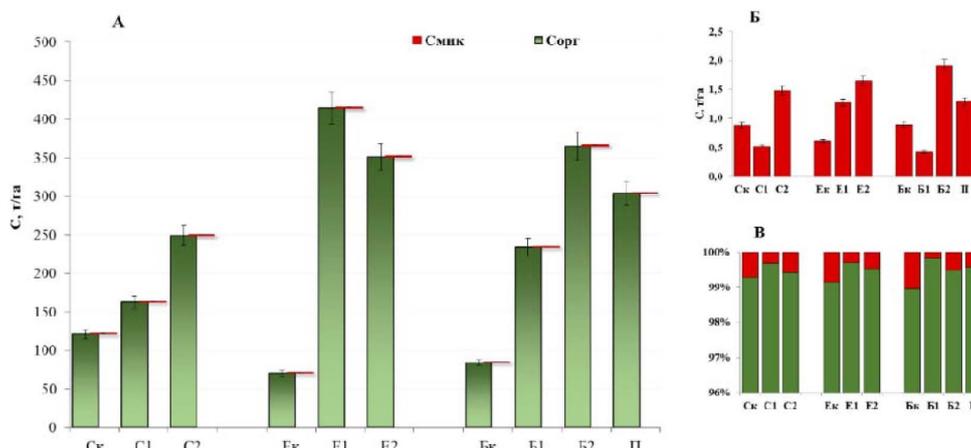


Рис. 1. Запасы Сорг и Смик (А), Смик (Б) и доля Смик в Сорг (В) в 50-сантиметровом слое почв под хвойными и лиственными насаждениями городских и пригородных территорий и контрольных участков (обозначения индексов Ск, С1, С2... расшифрованы в описании объектов исследования)

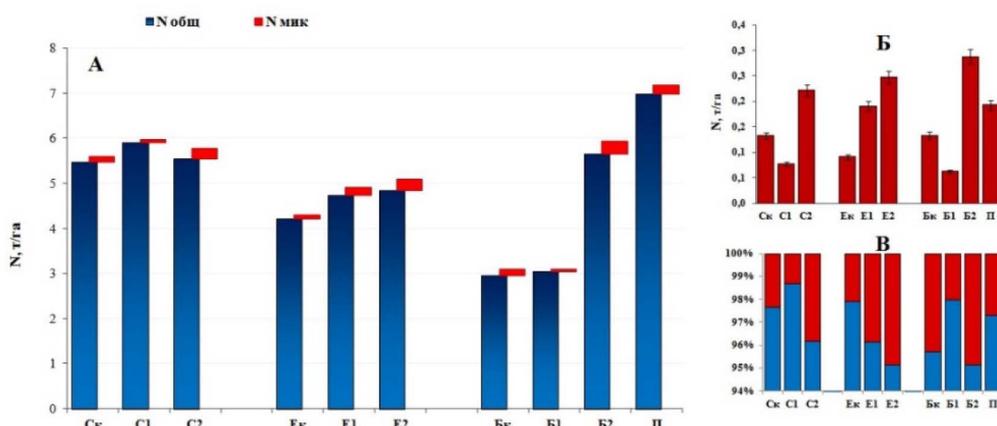


Рис. 2. Запасы Нобщ и Nмик (А), Nмик (Б) и доля Nмик в Нобщ (В) в 50-сантиметровом слое почв под хвойными и лиственными насаждениями городских и пригородных территорий и контрольных участков (обозначения индексов Ск, С1, С2... расшифрованы в описании объектов исследования)

При пересчете на запас в верхнем, наиболее активном, 25-сантиметровом слое почвенного профиля под сосновыми, еловыми и лиственными насаждениями в черте города оказалось, что микробное продуцирование CO_2 варьировало в пределах 113–222, 284–328, 251–369 мг $C/m^2 \cdot ч$, соответственно (рис. 3). Для лесных почв сосняка, ельника и березняка, выбранных в качестве контроля, величина потенциальной эмиссии CO_2 составила 308, 165, 216 мг $C/m^2 \cdot ч$, соответственно. По сравнению с контролем отмечалось снижение дыхательной активности верхнего 25-сантиметрового слоя почвенного профиля

в сосновых лесах, и увеличение в еловых и лиственных насаждениях городских территорий.

Установлена корреляционная связь между такими параметрами микробного сообщества, как $C_{мик} / C_{орг}$ и $N_{мик} / N_{общ}$ (рис. 4). Чем выше доля микробного углерода в общем органическом, тем выше, как правило, и доля микробного азота в общем.

Выявлена тесная и достоверная корреляция между Смик и БД, Сорг, Nмик, Нобщ ($r=0.97, 0.70, 0.72, 0.84$, соответственно), а также между Nмик и Сорг, Нобщ и БД ($r=0.74, 0.63, 0.72, 0.63$). Отмечена достоверная отрицательная корреляция между

показателями Сорг, Смик, БД, Nмик и плотностью почвы ($r = -0.80, -0.64, -0.60, -0.73$).

Оценка экологического состояния почв возможна также по величине микробного метаболического коэффициента qCO_2 [2], отражающего экофизиологический статус почвенного микробного сообщества. Значения метаболического коэффициента для исследованных почв не превышал 1.0. В органогенных горизонтах (лесная подстилка) хвойных лесов qCO_2 варьировал в узких

пределах – 0.2–0.4, наиболее высокие (до 0.6) значения qCO_2 , характеризующие интенсивные процессы разложения органики, отмечены для почв мелколиственных лесов. Показатели qCO_2 для лесной подстилки контрольных почв сосняка, ельника и березняка находились в интервале 0.3–0.4. Отмечается изменение величины qCO_2 в сторону увеличения в органогенных горизонтах всех исследуемых почв пригородных лесов, особенно под лиственными насаждениями.

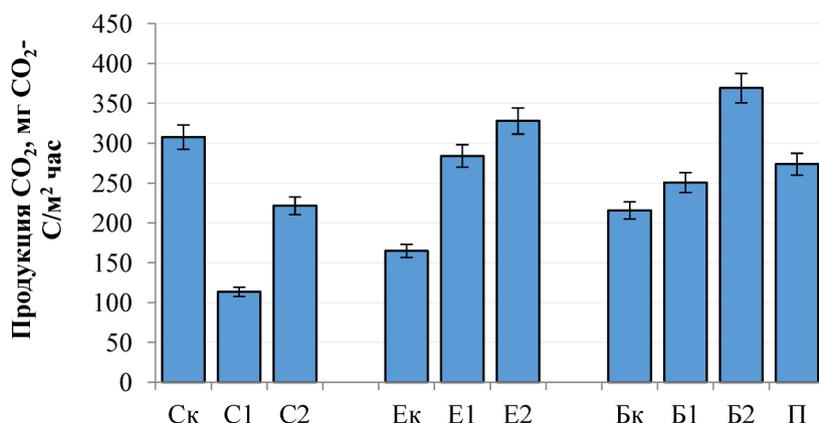


Рис. 3. Микробное продуцирование CO_2 верхнего 25-сантиметрового слоя почвенного профиля под хвойными и лиственными насаждениями городских и пригородных территорий и контрольных участков (обозначения индексов Ск, С1, С2... расшифрованы в описании объектов исследования)

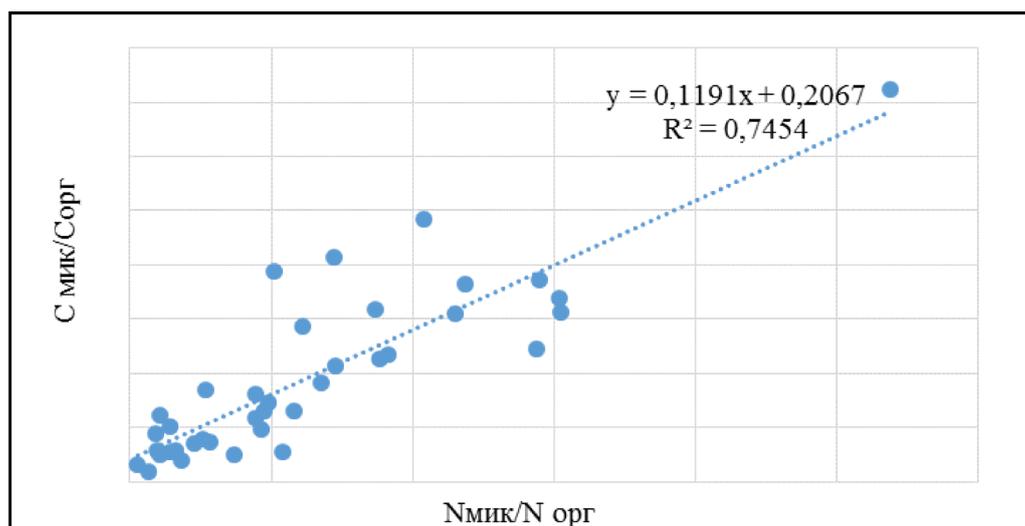


Рис. 4. Взаимосвязь между показателями $S_{мик}/S_{орг}$ и $N_{мик}/N_{орг}$ в исследуемых почвах

В нижележащих горизонтах величина qCO_2 в хвойных лесах составляла 0.2–0.3, в почвах под листовыми древостоями коэффициент микробного дыхания изменялся в более широких пределах – 0.1–0.5. В профиле подзола под сосняком черничным, взятого в качестве контроля, qCO_2 варьировал от 0.4 до 0.9, с максимумами в гор. А1А2 и В. Для почв контрольных вариантов под ельником и березняком величина qCO_2 находилась в интервале 0.2–0.3 и 0.3–0.5, соответственно. Относительно высокие показатели qCO_2 в интервале 0.2–0.9 в некоторых горизонтах указывают на более активную минерализацию органического вещества и свидетельствуют о неблагоприятных климатических или антропогенных воздействиях.

Значительные внутрипрофильные различия величины метаболического коэффициента, а также существенное варьирование этого показателя в почвах разных экосистем, может свидетельствовать о неустойчивом функционировании микробиологических процессов цикла углерода в исследуемых почвах. Выявленные различия также могут быть связаны с разной доступностью углерода для микроорганизмов. Чем доступнее микроорганизмам субстрат, тем активнее идет его разложение и минерализация, тем больше прирост биомассы, выше микробное дыхание и больше продуцируется CO_2 .

Заключение

Антропогенное влияние городских ландшафтов сказывается на запасах органического вещества и азота почв, интенсивности процессов их трансформации. Наибольшее антропогенное воздействие испытывают верхние органогенные горизонты почв городских лесов с ненарушенным строением профиля, в которых активно протекают процессы микробной трансформации N и C почв. Отмечено увеличение доли содержания нитратного азота в азотном фонде городских почв по сравнению с контролем, что может быть связано с воздействием выхлопных газов автотранспорта, а в отопительный сезон с деятельностью ТЭЦ. Процесс трансформации органического вещества во всех исследуемых почвах идет по пути накопления аммония. Установлено, что запас активной микробной биомассы имел наиболее высокие величины в почвах городских лесов по сравнению с контролем. Под воздействием урбанизации на фоне возрастающего количества микробной биомассы происходит изменение

её функциональной активности по сравнению с естественными аналогами, особенно в органогенных горизонтах. Установлена функциональная зависимость между производными величинами $N_{\text{мик}} / N_{\text{общ}}$ и $C_{\text{мик}} / C_{\text{орг}}$ в исследованных почвах. Рассчитаны корреляционные коэффициенты для взаимосвязи микробиологических и физико-химических показателей исследованных почв. Показано, что в исследованных почвах микробная биомасса наиболее тесно коррелировала с базальным дыханием, содержанием органического углерода и общего азота в почве.

Полученные данные позволяют расширить спектр показателей, характеризующих экологическое состояние естественных и антропогенно нарушенных почв данных природно-климатических условий и могут быть использованы при проведении почвенного мониторинга.

Авторы выражают признательность сотрудникам ИЛ КарНЦ РАН: Федорец Н.Г., А.Н. Пеккоеву; ИФХ и БПП РАН – Кузнецовой Т.В., Кургановой И.Н., Лопес-де-Гереню В.О.; НИИ Физико-химической биологии им. А.Н. Белозерского МГУ – Баратовой Л.А.; администрации ГПЗ «Кивач».

Работа выполнена в рамках государственного задания ИЛ КарНЦ РАН (№ 0220–2014–0006).

Список литературы

1. Агрохимические методы исследования почв. – М.: Наука, 1975. – 656 с.
2. Благодатская Е. В., Ананьева Н. Д., Мякшина Т. Н. Характеристика состояния микробного сообщества по величине метаболического коэффициента // Почвоведение. – 1995. – № 2. – С. 205–210.
3. Морозова Р.М. Лесные почвы Карелии. – Л.: Наука. – 1991. – 184 с.
4. Почва, город, экология / Ред. Г.В. Добровольский. – М.: Изд-во: За экономическую грамотность, 1997. – 310 с.
5. Сусьян Е. А. Активная микробная биомасса разных типов почв: диссертация ... кандидата биологических наук: 03.00.07. – Москва, 2005. – 146 с.: ил. РГБ ОД, 61 06–3/433.
6. Сусьян Е.А., Ананьева Н.Д., Гавриленко Е.Г., Чернова О.В., Бобровский М.В. Микробный углерод в профиле лесных почв южной тайги (заповедник «Калужские засеки») и Звенигородская биостанция МГУ // Почвоведение. – 2009. – № 10. – С. 1233–1240.
7. Anderson J.P.E., Domsch K.H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils // Soil Biol. Biochem. – 1978. V. 10. №.3. – P. 215–221.
8. Anderson J.P.E., Domsch K.H. Quantities of plant nutrients in the microbial biomass of selected soils // Soil Science. – 1980. V. 130. № 4. – P. 211–216.
9. Anderson T.H., Domsch K.H. Soil microbial biomass: The eco-physiological approach // Soil Biology and Biochemistry. – 2010. V. 42. – P. 2039–2043.
10. Lorenz K., Kandeler E. Microbial biomass and activities in urban soils in two consecutive years // J. Plant Nutr. Soil Sci. – 2006. V. 169. – P. 799–808.