

Влияние атмосферного загрязнения города Новосибирска на почвенные микроорганизмы круговорота азота

Пищимко О. И.^{1,2}, Коробова Л. Н.¹

¹ Новосибирский государственный аграрный университет
Новосибирск, Россия

² Сибирский научно-исследовательский гидрометеорологический институт
Новосибирск, Россия
pishchimko@sibnigmi.ru, lnkorobova@mail.ru

Исследования провели на территории Новосибирска – крупного мегаполиса с населением более 1,6 миллиона человек. В городе развита транспортно-логистическая сеть и промышленный комплекс, что обуславливает повышенную нагрузку на окружающую среду загрязнителей с синергетическим действием. В работе оценили микробиологические характеристики почвы как индикатора состояния среды в зонах с ослабленным транспортным потоком, автотранспортным и транспортно-промышленным загрязнением. Их сопоставили с данными инструментального анализа атмосферного воздуха ФГБУ «Западно-Сибирского УГМС» со стационарных постов наблюдений, прилегающих к точкам отбора почвенных проб. Выявили, что в урбо-серой лесной почве Новосибирска нарушены микробиологические процессы круговорота азота, особенно в зоне с транспортно-промышленным загрязнением. Подавлена численность азотфиксаторов и минерализаторов белковых веществ. Тренд развития микроорганизмов, усваивающих органический и минеральный азот, совпадает с загрязнением воздуха в обследованных районах пылью, диоксидом азота, формальдегидом и угарным газом. Обилие автотрофных нитрификаторов в почвах разных зон города идентично, что возможно связано с интенсивностью сжигания топлива. При относительно высоком содержании азота потенциал развития денитрификаторов в густонаселенном Центральном районе города с транспортной нагрузкой в почве не реализуется из-за содержания солей. Изменения в круговороте азота свидетельствуют о деградации экологических функций почвы в загрязненных городских районах.

Ключевые слова: биоиндикация, микробиологическая активность почвы, загрязнители атмосферного воздуха, городская среда.

ВВЕДЕНИЕ

Новосибирск – третий по численности населения мегаполис России. Город постоянно растет, развивается его транспортно-логистическая сеть, промышленный комплекс, торговля, и вместе с ними возрастает антропогенная нагрузка на городскую экосистему. В городских почвах постоянно осаждаются и накапливаются в почвенном профиле взвесь атмосферных поллютантов (Кулачкова и др., 2018), что не может не отразиться на состоянии почв.

Почва – главный резервуар и естественная среда обитания микроорганизмов, принимающих участие в процессах ее формирования, самоочищения, а также в круговоротах веществ в природе (азота, углерода, серы, фосфора и др.). Аккумулированные загрязнения меняют биологическую активность городской почвы, снижают в ней биоразнообразие (Дорохова, 2015), эффективное и потенциальное плодородие и способность к самоочищению. Все это приводит к потере оздоровительных экологических функций почвы и дестабилизации экосистем (Li, 2020; Polyakov и др., 2021). Всё чаще при экологической оценке городской среды исследователи обращаются к методам биоиндикации (Соколова, 2014; Петункина, Сарсацкая, 2015; Pishchimko и др., 2023), и используют для этого почвенный микробценоз, быстро реагирующий на антропогенную дестабилизацию (Назаренко и др., 2015; Оказова, Автаева, 2015; Пестова, Чупахина, 2017; Домрачева и др., 2018; Свистова и др., 2019; Степанова 2019). Состояние микробных ценозов городских почв (в Новосибирске в основном естественно-антропогенные поверхностно-преобразованные серые лесные почвы и чернозем выщелоченный) говорит об изменениях в них круговоротов элементов (Артамонова, Бортникова, 2016). Для питания и роста растений ключевым среди биогеохимических циклов

является круговорот азота, и первейшая роль в его превращениях принадлежит почвенным микроорганизмам: аммонификаторам, нитрификаторам, азотфиксаторам и денитрификаторам. В результате в городских почвах образуются как важные для питания растений минеральные соединения азота, так и токсичные вещества. К ним отнесены нитро- и нитрозосоединения, первичные и вторичные амины, нитрилы и другие (Резников, 2006).

Цель исследования: изучить микробиологические изменения в круговороте азота в разных зонах Новосибирска и сравнить с содержанием в воздухе загрязнителей.

Задачи исследования:

1. Выявить изменения в зонах города с транспортным, транспортно-промышленным загрязнением и ослабленным транспортным потоком на окраине у 6 групп микроорганизмов, связанных с круговоротом азота.

2. Сопоставить эти данные с содержанием в городском воздухе NO_2 , CO , формальдегида и пыли.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Отбор почвенных проб проводили в 2022–2023 годах в 3 районах Новосибирска в слое 0–20 см урбо-серой лесной почвы:

1 – пр. Лаврентьева – зона окраины города с ослабленным транспортным потоком в Советском районе. Площадкой учетов стала граница сквера имени М. А. Лаврентьева, принятая нами в исследованиях за условный контроль. Расстояние от центральной части города до учетных площадок составляет 25 км.

2 – ул. Советская – зона автотранспортного загрязнения. Улица проходит через Центральный район, и поток грузового транспорта на ней сильно ограничен. Учетные площадки располагались на территории Первомайского сквера, в самом центре города.

3 – ул. Дуси Ковальчук, зона транспортно-промышленного загрязнения в Заельцовском районе, характеризующаяся большим потоком грузового транспорта. Площадки учетов здесь располагались на расстоянии 4,3 км от центра города (рис. 1).

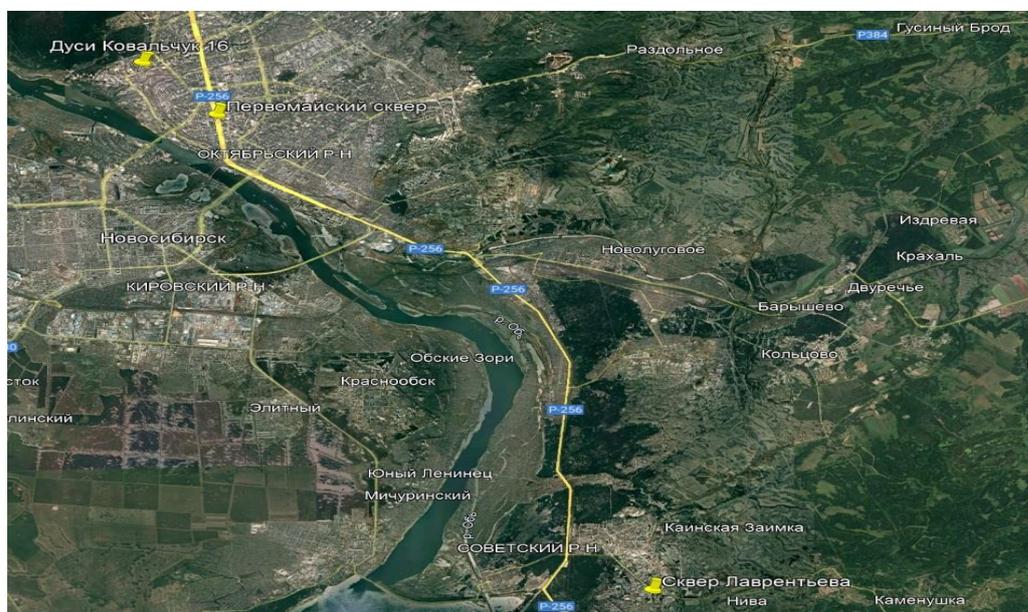


Рис. 1. Карта-схема мест отбора проб почвы в Новосибирске

Пробы почвы отбирались в близости от стационарных постов Службы мониторинга окружающей среды по трансекте: 5, 10, 15, 20, 30 м от проезжей части. Отбор проводили в пяти точках почвенным буром в начале августа. После отбора почвы делали смешанный

образец, из которого методом предельных разведений в 3-х кратной повторности высевали микроорганизмы.

Для оценки численности аммонификаторов и бактерий, усваивающих минеральный азот, использовали агаризированные среды: мясо-пептонный агар (МПА) и крахмало-аммиачный агар (КАА). Для определения численности нитрификаторов и денитрификаторов использовали жидкие среды Виноградского для 1 и 2 стадий нитрификации и Березовой. На МПА и КАА микробы высевали после 5-кратного разведения, на среду Виноградского – после 3–5 разведений, Березовой – после 4–6 разведений. При расчетах численности нитрификаторов и денитрификаторов использовали таблицу Мак–Креди, составленную на основании вариационной статистики. Азотфиксаторов выделяли на среде Эшби.

Достоверность различий численности КОЕ микроорганизмов на твердых средах устанавливали с помощью наименьшей существенной разницы ($НСР_{0,05}$ и $НСР_{0,1}$), на жидких питательных средах по величине доверительных интервалов.

Содержание солей определяли в почвенной пасте с соотношением почва : вода = 1 : 5. Концентрацию растворов электролитов измеряли с помощью лабораторного кондуктометра КЛ-С.

Содержание загрязнителей в воздухе было определено специалистами ФГБУ «Западно-Сибирского УГМС» по методикам, утвержденным Главной ГО: пыль – гравиметрически по РД 52.04.893-2020, формальдегид и NO_2 – фотометрически соответственно по РД 54.04.824-2015 и РД 52.04.792-2014, CO – газоанализатором по РД 52.04.909-2021.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что разное по силе антропогенное воздействие в изученных зонах мегаполиса привело к разной обсемененности почвы микроорганизмами. Чувствительными к загрязнению оказались аммонификаторы (табл. 1). В экосистемах они выполняют функцию минерализации азотсодержащих органических соединений и снабжают растения минеральным азотом (аммонием). Подавлялась группа аммонификаторов только в зоне постоянного промышленного и транспортно-логистического загрязнения. В сравнении с центром города (зоной активного потока легкового транспорта) и окраиной, прилегающей к парку Лаврентьева (условным контролем), ее численность в годы исследований снижалась в 1,5–1,6 раза.

При этом параллельно снижалась численность иммобилизаторов NH_4^+ , то есть процесс связывания азота в микробной биомассе не нарушался, и скорость разложения органических веществ в почве в момент отбора проб в мегаполисе везде была примерно одинаковой. Об этом свидетельствует величина коэффициента минерализации, рассчитанного, согласно классической почвенной микробиологии (Мишустин, 1972), по обратному соотношению микробов – аммонификаторов и микробов, усваивающих (иммобилизующих) выделенный ими аммонийный азот.

Аммоний, не включенный в микробную биомассу, подвергается в почве бактериальному окислению нитрификаторами. Их численность в изученных зонах города в условиях оптимального увлажнения первого года исследования менялась идентично (табл. 2). Обсемененность почвы нитрификаторами была несколько ниже в зонах транспортного и транспортно-промышленного загрязнений, но статистически это не доказывалось. Отсутствие существенных отличий в развитии автотрофных нитрификаторов в зонах города вполне объяснимо. Известно, что в развитых городах в почву идет активное отложение соединений азота из атмосферного воздуха (Gorovtsov et al., 2020). Они связаны с выбросами оксидов азота в процессе горения автомобильного топлива и угля на ТЭС и промышленных предприятиях, а также с формированием «островов тепла» (Lorenz K., Kandeler E., 2005; Trammell et al., 2017). В результате в городской почве появляются дополнительные закис азота, нитриты и нитраты, а нитрификация и содержание азот окисляющих бактерий всегда высокие.

Таблица 1

Реакция почвенных бактерий, усваивающих органический и минеральный азот,
на уровень антропогенного загрязнения в зонах мегаполиса

Вариант	Бактерии, усваивающие органический азот (аммонификаторы)	Бактерии, усваивающие минеральный азот (иммобилизаторы NH ₄ ⁺)	Коэффициент минерализации (КАА/МПА)
1. Зона ослабленного транспортного потока – условный контроль (пр. Лаврентьева)	41,9	10,5	0,25
2. Зона транспортного загрязнения (ул. Советская)	44,1	9,5	0,22
3. Зона транспортно- промышленного загрязнения (ул. Д. Ковальчук)	28,1**	7,7*	0,27
НСР ₀₅	5,82	3,4	
НСР ₁₀	4,8	2,7	
Степень влияния по Снедекору, %	95,3	69,0	

Примечание к таблице: КОЕ, млн/1 г абс. сух. почвы, слой почвы 0–20 см, среднее за 2 года исследований; * – $p < 0,1$ по сравнению с условным контролем; ** – $p < 0,05$ по сравнению с условным контролем.

Таблица 2

Численность нитрификаторов и денитрификаторов в почве районов Новосибирска
с разной антропогенной нагрузкой

Эколого- трофическая группа	Численность нитрификаторов и денитрификаторов, тыс. в 1 г абс. сухой почвы		
	Зона ослабленного транспортного потока – условный контроль (пр. Лаврентьева)	Зона транспортного загрязнения (ул. Советская)	Зона транспортно- промышленного загрязнения (ул. Д. Ковальчук)
Нитрификаторы	24,1 (14,7–39,5)	20,0 (12,2–32,8)	17,2 (10,5–28,2)
Денитрификато ры	54,5 (33,2–89,4)	15,0** (9,1–24,6)	15,0** (9,1–24,6)

Примечание к таблице. В скобках – доверительный интервал. ** – $p < 0,05$ по сравнению с условным контролем.

Из-за преобладания в городской среде нитрификации возрастают потери азота в воздух (Wan et al., 2017). Это дополнительный вклад городов в создание парникового эффекта и формирование кислотных дождей. Потенциал денитрификационных потерь в Новосибирске, судя по численности денитрификаторов, ожидаемо реализуется только в одной точке отбора: на окраине, вблизи парка (зона 1 – условный контроль). Здесь относительно других зон численность микробов-денитрификаторов увеличена в 3,6 раза. В Центральном районе, в зоне 2, почва отличается высоким содержанием солей, лимитирующих развитие микробов. Соли

появляются вдоль дорог из-за применения антигололедных веществ. Такой вывод подтверждают данные по электропроводности урбо-серой лесной почвы, полученные нами в тех же пробах, из которых выделялись микроорганизмы (рис. 2). Электропроводность ЕС является общепринятым показателем, используемым в почвенных исследованиях для характеристики общего содержания солей в почве.

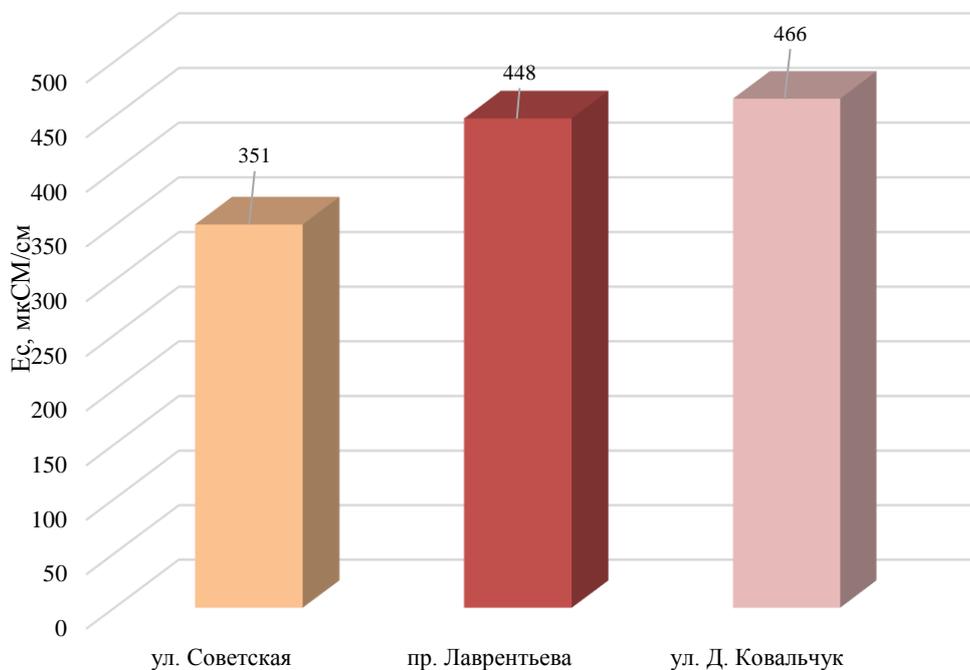


Рис. 2. Различия в засоленности городской урбо-серой лесной почвы в точках отбора почвенных проб

Несколько подавленной в центре города (зоне транспортного загрязнения) и в рядом расположенном Заельцовском районе (зоне транспортно-промышленного загрязнения), относительно условного контроля, оказалась также численность азотфиксаторов (рис. 3). Частота обрастания комочков почвы азотфиксаторами является одним из микробиологических критериев оценки состояния почв (Микробиологические указания, 2003). Кроме этого, процент подавления *Azotobacter*, согласно санитарно-эпидемиологическим правилам по определению класса опасности токсичных отходов производства и потребления (СанПин 2.1.7.1386-03), служит эколого-гигиеническим показателем опасности размещенных в почве отходов.

Установлено, что встречаемость азотобактера в зоне транспортно-промышленного загрязнения Новосибирска меньше по сравнению с зоной 1 – условным контролем на 20 %. Скорее всего, здесь и в зоне 2 выше загрязненность почвы тяжелыми металлами. Негативная реакция роста азотобактеров на содержание Cu, Zn, Pb в почвах нашего города показана в исследованиях В. С. Артамоновой и С. Б. Бортниковой (2016). Опираясь на азотобактер как на индикатор, авторы делают вывод о необходимости оздоровления городской среды в зоне транспортно-коммуникационных сообщений.

В работе И. Д. Свистовой и В. Истоминой (2019) сообщается, что содержание *Azotobacter* в городской почве зависит от типа самой почвы и уровня транспортной нагрузки. В их исследованиях негативное воздействие на микробов круговорота азота заметно усиливалось в зоне влияния автомагистралей, где существенно хуже было плодородие городской почвы, отмечалось ее иссушение и потеря выполняемых экологических функций.

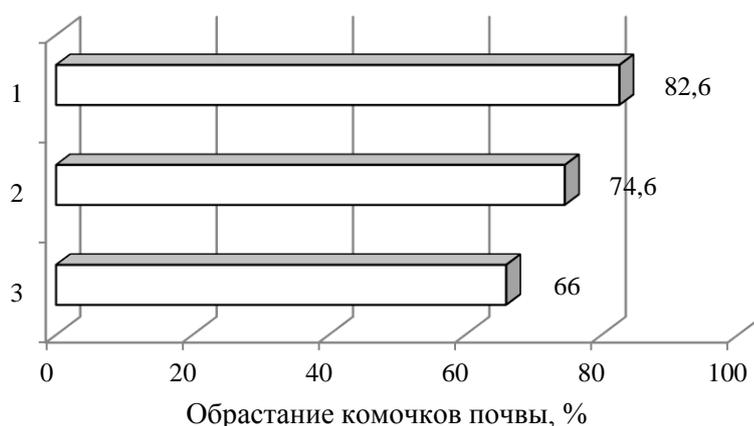


Рис. 3. Численность свободноживущих азотфиксирующих бактерий в зонах города с разным уровнем антропогенного загрязнения

Условные обозначения. По вертикали: 1 – зона ослабленного транспортного потока, условный контроль (пр. Лаврентьева); 2 – зона транспортного загрязнения (ул. Советская); 3 – зона транспортно-промышленного загрязнения (ул. Д. Ковальчук).

Изменение численности бактерий в почве изученных районов города Новосибирска совпадает по тренду с загрязненностью воздуха пылью, угарным газом, формальдегидом и диоксидом азота (рис. 4). По данным инструментального мониторинга ФГБУ «Западно–Сибирского УГМС», из трёх мест отбора почвенных проб наибольшее загрязнение воздуха этими веществами наблюдается в Заельцовском районе Новосибирска (ул. Дуси Ковальчук), где численность бактерий-минерализаторов и иммобилизаторов аммонийного азота в почве ниже. Связь между почвенными микробами и загрязнением воздуха опосредованная. Так, содержание токсических веществ в воздухе может влиять на развитие биомассы растений и количество их корневых выделений, что, в свою очередь, отражается на численности и состоянии микрофлоры почвы. Также под влиянием оксидов, выпадающих с осадками, могут измениться физико-химические характеристики городской почвы, что сказывается и на структуре микробного сообщества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В урбо-серой лесной почве Новосибирска под воздействием антропогенных факторов нарушаются процессы в таком важнейшем цикле, как круговорот азота, что снижает ее плодородие. Сильнее подвергается негативному антропогенному влиянию микробное сообщество цикла в зоне транспортно-промышленного загрязнения города. Здесь подавляется численность азотфиксаторов и минерализаторов белковых органических веществ. В сравнении с окраиной города – зоной ослабленной транспортной нагрузки – их становится меньше в 1,3–1,6 раза. Количество почвенных бактерий, минерализующих органику и иммобилизующих аммонийный азот, в почвах обследованных районов города по тренду развития совпадает с загрязнением атмосферного воздуха пылью, диоксидом азота, формальдегидом и угарным газом.

Обилие автотрофных нитрификаторов к середине лета во всех зонах города статистически не различается: соединения азота активно поступают в почву из загрязненного атмосферного воздуха. Потенциал роста численности денитрификаторов при относительно высоком содержании азота на изученных территориях реализуется только в почве окраины города Новосибирска: вблизи парковой зоны на проспекте Лаврентьева. В густонаселенном Центральном районе с высокой транспортной нагрузкой численность денитрификаторов

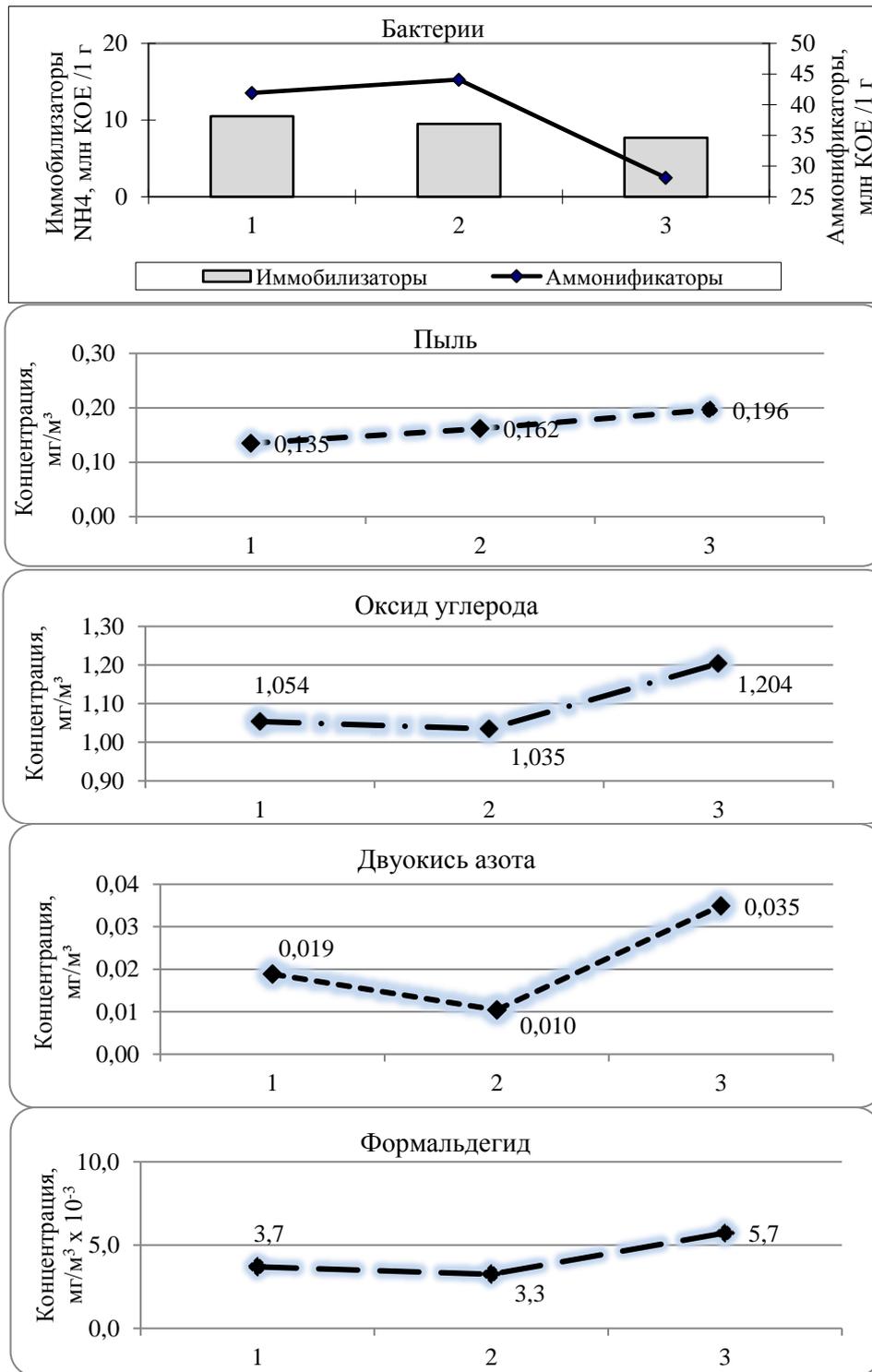


Рис 4. Тренд изменения обилия почвенных бактерий и загрязнения воздуха обследованных районов Новосибирска

По горизонтали: 1 – зона ослабленного транспортного потока, условный контроль (пр. Лаврентьева); 2 – зона транспортного загрязнения (ул. Советская); 3 – зона транспортно-промышленного загрязнения (ул. Д. Ковальчук).

снижена содержанием солей. Выявленные в урбо-серой лесной почве Новосибирска изменения в биологическом круговороте азота в целом свидетельствуют о деградации экологических функций почвы в загрязненных городских районах.

Список литературы

- Артамонова В. С., Бортникова С. Б. О состоянии почвенных азотфиксирующих бактерий на территории городского леса // Вестник Пермского университета. Серия: Биология. – 2016. – № 2. – С. 150–159.
- Дорохова М. Ф., Кошелева Н. Е., Терская Е. В. Экологическое состояние городских почв в условиях антропогенного засоления и загрязнения (на примере Северо-Западного округа Москвы) // Теоретическая и прикладная экология. – 2015. – № 4. – С. 16–24.
- Домрачева Л. И., Скугорева С. Г., Кутявина Т. И., Симакова В. С., Люкина А. Л. Микроорганизмы в биоиндикации городских почв // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: Материалы XVI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Киров, 03–05 декабря 2018 года. Книга 1. – Киров: Вятский государственный университет, 2018. – С. 211–215.
- Мишустин Е. Н. Микроорганизмы и продуктивность земледелия. – М.: Наука, 1972. – 343 с.
- Назаренко Н. Н., Корецкая И. И., Свистова И. Д. Биоиндикация почвы транспортных зон г. Воронежа // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. – 2015. – № 1. – С. 46–50.
- Оказова З. П., Автаева Т. А. Использование микроорганизмов в качестве индикаторов загрязнения окружающей среды // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 5. – С. 636.
- Пестова О. А., Чупахина А. И. Биотестирование качества почвы с помощью микроорганизмов // Декада экологии: материалы XI Международного конкурса, Омск, 11–19 мая 2017 года. – Омск: Омский государственный технический университет, 2017. – С. 39–43.
- Петункина Л. О., Сарсацкая А. С. Берёза повислая как индикатор качества городской среды // Вестник Кемеровского государственного университета. – 2015. – № 4–3 (64). – С. 68–71.
- Резников В. А. Химия азотсодержащих органических соединений: Учеб. пособие / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2006. – 130 с.
- Кулачкова С. А., Лебедь-Шарлевич Я. И., Можарова Н. В., Николаева А. М. Роль городских почв в регулировании эмиссии парниковых газов в атмосферу // Городские исследования и практики. – 2018. – Т. 3, № 3 (12). – С. 48–68.
- Свистова И. Д., Корецкая И. И., Истомина Е. И., Влияние городской нагрузки на напряженность процесса азотфиксации на примере почв г. Воронежа // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: Материалы XVII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Киров, 05 декабря 2019 года. Том Книга 2. – Киров: Вятский государственный университет, 2019. – С. 34–37.
- Соколова Г. Г. Оценка стабильности развития листьев березы бородавчатой в условиях Новосибирска // География и природопользование Сибири. – 2014. – № 18. – С. 195–206.
- Степанова Л. П., Писарева А. В., Яковлева Е. В., Раскатов В. А. Экологическая оценка состояния почвенной микро- и мезофауны в условиях техногенных воздействий // Труды Карадагской научной станции им. Т. И. Вяземского - природного заповедника РАН. – 2019. – № 2 (10). – С. 30–41.
- Gorovtsov A., Rajput V., Pulikova E., Gerasimenko A., Ivanov F., Vasilchenko N., Demidov A., Jatav H, Minkina T. Soil Microbial Communities in Urban Environment / In book: Advances in Environmental Research. Vol. 76. – Publisher: Nova Science Publisher, USA, 2020. – 92 p.
- Li Z., Lu W., Huang J. Monitoring, diffusion and source speculation model of urban soil pollution // Processes. – 2020. – Vol. 8, N 11. – 1339.
- Lorenz K., Kandeler E. Biochemical characterization of urban soil profiles from Stuttgart, Germany. Soil Biol Biochem. – 2005. – Vol. 37, N 7. – P.1373–1385.
- Pishchimko O., Korobova L., Riksen V. Bioindication of environmental security in urban and rural territory according to *Betula pendula* Roth / E3S Web of Conferences, – 2023. – Vol. 411. – 02072.
- Polyakov V., Abakumov E., Kozlov A., Suleymanov A. Soil pollution status of urban soils in St. Petersburg city, North-west of Russia // Soil and Water Research. – 2021. – Vol. 16, N 3. – P. 1-10.
- Trammell T. L. E., Tripler C. E., Carper S. C., Carreiro M. M. Potential nitrogen mineralization responses of urban and rural forest soils to elevated temperature in Louisville, KY. Urban Ecosyst – 2017. – Vol. 20, N 1. – P. 77–86.
- Wang H., Marshall C. W., Cheng M., Xu H., Li H., Yang X., Zheng T. Changes in land use driven by urbanization impact nitrogen cycling and the microbial community composition in soils // Scientific Reports. – 2017. – Vol. 7. – 44049.

Pishchimko O. I., Korobova L. N. The influence of atmospheric pollution in Novosibirsk on soil microorganisms of the nitrogen cycle // Ekosistemy. 2024. Iss. 37. P. 138–146.

The research was carried out in Novosibirsk, a large metropolis with a population of more than 1.6 million people. The city has a well-developed transportation and logistics infrastructure, and an industrial complex that contribute to an increased environmental burden due to pollutants with a synergistic effect. The study assessed the microbiological characteristics of soil as an indicator of the environmental status in areas with reduced traffic, motor vehicle, and industrial pollution. These findings were compared with data from instrumental analysis of atmospheric air conducted by West Siberian Administration for Hydrometeorological and Environmental Monitoring at stationary sites adjacent to the soil sampling points. It was revealed that the microbiological processes of the nitrogen cycle are disrupted in the urban-gray forest soil of Novosibirsk, especially in the area affected by transport and industrial pollution. This leads to a decrease in the number of nitrogen-fixing and protein-mineralizing microorganisms. The trend of development of microorganisms that utilize organic and mineral nitrogen correlates with air pollution from dust, nitrogen dioxide, formaldehyde, and carbon monoxide in the surveyed areas. The abundance of autotrophic nitrogen fixers in the soils of different zones of the city is similar, which may be attributed to the intensity of fuel combustion processes. Despite the relatively high nitrogen content, the potential for the development of denitrifiers in the densely populated Central district of the city, with its high traffic load, is not realized in the soil due to the salt content. Changes in the nitrogen cycle indicate degradation of the ecological functions of the soil in polluted urban areas.

Key words: bioindication, soil microbiological activity, air pollutants, urban environment.

*Поступила в редакцию 25.02.24
Принята к печати 18.03.24*