

КОМПЛЕКСНОЕ БИОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОЧВ ПРИДОРОЖНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ГОРОДА МУРМАНСКА

OVERALL BIOSTUDY OF ROADSIDE SOILS CONDITION OF MURMANSK

A. Garbul
E. Garbul
E. Makarevich
M. Litvinova
E. Kozhukhova

Summary. During the research, informative biological indicators of the condition of the soil were identified: biological activity, respiratory rate, phytotoxicity, total microbial number and percentage of soil bacilli. When studying the experimental plots, the dependence of the values of the above indicators on the distance from the source of pollution was revealed. With increasing distance from the highway, biological activity, respiratory rate, total microbial number, and percentage of soil bacilli in the soil increase, and phytotoxicity and acidity decrease. Using regression analysis methods, a strong dependence of biochemical indicators on microbiological ones was revealed. It was established that the relationship between biochemical and microbiological indicators of the soil is maintained regardless of the season.

Keywords: roadside area, soil pollution, phytotoxicity, biochemical properties of soil, soil microbiome.

Гарбуль Анна Викторовна
 кандидат биологических наук, доцент,
 Мурманский арктический университет
 anna.cucumaria@yandex.ru

Гарбуль Евгений Алексеевич
 научный сотрудник, Мурманский морской
 биологический институт Российской академии наук
 garbul@mmbi.info

Макаревич Елена Викторовна
 кандидат биологических наук,
 зав. кафедрой микробиологии и биохимии,
 Мурманский арктический университет
 makarevichev@mauniver.ru

Литвинова Марина Юрьевна
 кандидат биологических наук, доцент,
 Мурманский арктический университет
 litvinovamtyu@mauniver.ru

Кожухова Екатерина Вячеславовна
 старший преподаватель,
 Мурманский арктический университет
 kozhukhovaev@mauniver.ru

Аннотация. В ходе исследований выявлены информативные биологические показатели состояния почвы: биологическая активность, интенсивность дыхания, фитотоксичность, общее микробное число и доля почвенных бацилл. При изучении опытных участков выявлена зависимость значений вышеперечисленных показателей от удалённости источника загрязнения. По мере удаления от автодороги биологическая активность, интенсивность дыхания, общее микробное число и доля почвенных бацилл в почве увеличиваются, а фитотоксичность и кислотность уменьшаются. Методами регрессионного анализа выявлена сильная зависимость биохимических показателей от микробиологических. Установлено, что связь между биохимическими и микробиологическими показателями почвы сохраняется вне зависимости от времени года.

Ключевые слова: придорожная территория, загрязнённая почва, фитотоксичность, биохимические свойства почвы, почвенная микробиом.

Введение

Техногенное загрязнение окружающей среды имеет значимое влияние на состояние почв и влечёт за собой сокращение биоразнообразия растений, макро- и микроорганизмов, что в свою очередь негативно сказывается на биологической активности почвы и её способности к биоремедиации.

Транспортно-дорожный комплекс является мощнейшим источником загрязнения природной среды, харак-

теризующимся высокими значениями концентрации поллютантов и широкой распространённостью. Подавление микробиома почвы приводит к снижению в ней интенсивности дыхания и уменьшению ферментативной активности. В дальнейшем происходит накопление неразложившегося органического вещества и исключение азота из круговорота веществ. Негативное влияние техногенного загрязнения на биологическую активность почвы пропорционально уровню транспортных выбросов и удалённости от их источника [1].

Транспортная нагрузка на город Мурманск увеличивается с каждым годом, что диктует необходимость разработки объективных методов контроля над загрязнением окружающей среды, при этом особое внимание необходимо уделять зонам придорожных полос, как территориям максимальной техногенной нагрузки. Анализ литературных источников показал отсутствие данных по комплексным биологическим исследованиям почв придорожных зон города Мурманска.

Цель работы — провести исследования состояния почв придорожных территорий г. Мурманска в различные сезоны года с использованием биохимических и микробиологических методов анализа.

Задачи исследования:

- 1) оценить микробиологические и биохимические показатели почвы, проводя количественную и качественную оценку состава почвенного микробиома;
- 2) определить фитотоксичность опытных образцов почвы;
- 3) установить взаимосвязь количественных и структурных характеристик почвенного микробиоценоза с биохимическими показателями (биологической активностью, интенсивностью дыхания и токсичностью почвенных участков).

Материалы и методы

Объектом исследования являлись почвенные образцы, отобранные на участке автодороги «Р-21» с координатами 68.877404 N, 33.109719 E. Данный участок находится в черте города, единственный источник загрязнения — автодорога.

Почвенные образцы отбирались с пяти участков от дороги: 0 м — обочина (№ 1), 10 м (№ 2), 20 м (№ 3), 50 м (№ 4) и 100 м (№ 5). Отбор проб осуществляется согласно ГОСТ Р 58595–2019. С каждого участка для параллельных опытов брались по три пробы [2]. Сбор проб осуществлялся с апреля по декабрь 2024 года. Для диагностики состояния почв оценивали вышеперечисленные биохимические параметры [3, 4, 5, 6, 7] и микробиологические показатели: общее микробное число (ОМЧ), а также долю почвенных бацилл в общей численности микроорганизмов [8, 9, 10, 11, 12].

Результаты работы обработаны статистически с применением регрессионного анализа. Оценка связи биохимических параметров с микробиологическими показателями осуществлялась по шкале Дворецкого по значению коэффициента детерминации (R^2): $R^2 < 0,3$ — слабая связь, $R^2 = 0,31–0,5$ — умеренная связь, $R^2 = 0,51–0,7$ — значительная связь, $R^2 = 0,71–0,9$ — тесная связь, $R^2 > 0,9$ — очень тесная связь [13, 14].

Результаты и обсуждение

При изучении качественного состава микробиоценоза почвенных образцов на всех исследуемых участках преобладали микромицеты, а также встречались бактерии родов *Bacillus*, *Pseudomonas* и *Clostridium*. В незначительном количестве обнаруживались бактерии родов *Proteus* и *Enterococcus*.

Общее количество почвенных микроорганизмов даёт представление о степени загрязнения почвы и интенсивности протекания процессов и самоочищения. Нами была отмечена прямая зависимость между показателем общего микробного числа и удалённостью участка отбора проб от источника антропогенного загрязнения. На 5-м экспериментальном участке общее содержание микроорганизмов достигает максимальных значений: зимой — $2,01 \times 10^5$ КОЕ/г, а летом — $4,52 \times 10^5$ КОЕ/г (Рисунок 1).

Установлено, что в зимний период ОМЧ имело минимальные значения, весной и осенью данный показатель был ниже, чем в летний период. Численность и активность почвенных микроорганизмов связаны со скоростью протекания микробиологических процессов в почве. При удалении от источника загрязнения общая численность почвенных микроорганизмов исследуемых участков возрастила.

Число почвенных бацилл и их доля в ОМЧ является индикатором степени минерализации органического субстрата. В чистых почвах число бацилл относительно общего микробного числа достигает 20–50 %, а в загрязнённых — не превышает 20 %. Наши исследования показали (Рисунок 2), что почвы участков № 4 и № 5 можно отнести к условно чистым, поскольку количество почвенных бацилл составляло 33 и 43 % соответственно, почву участка № 3 — относительно чистой, доля почвенных бацилл достигала 25 %, а почвы участков № 1 и № 2 — загрязнёнными, так как количество почвенных бацилл достигло значений в 17 и 21 % соответственно.

О биологической активности почвы судили по интенсивности дыхания и ферментной активности. Ферментную активность определяли по скорости разложения мочевины (экспресс-метод). По мере удаления от автодороги увеличивается ферментная активность, а время необходимое на разложение мочевины уменьшается (Таблица 1).

Минимальные показатели биологической активности регистрировались на всех опытных участках в зимнее время, а максимальные — летом. Скорость разложения мочевины на участке № 5, более чем в 2 раза превышает скорость разложения мочевины на участке № 1, который находится в непосредственной близости

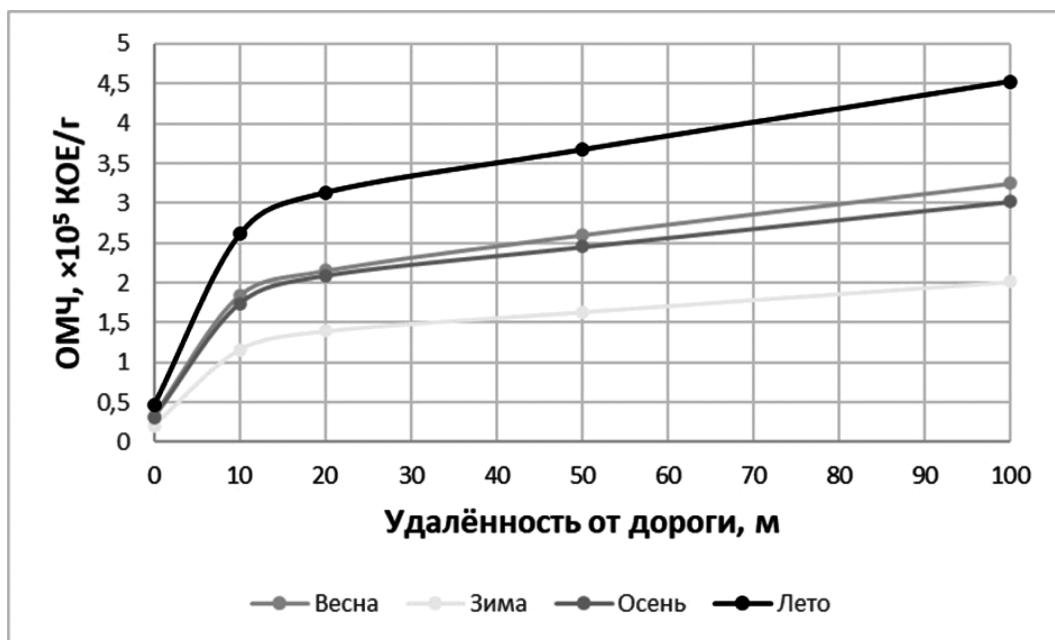


Рис. 1. Общее микробное число в почве опытных участков

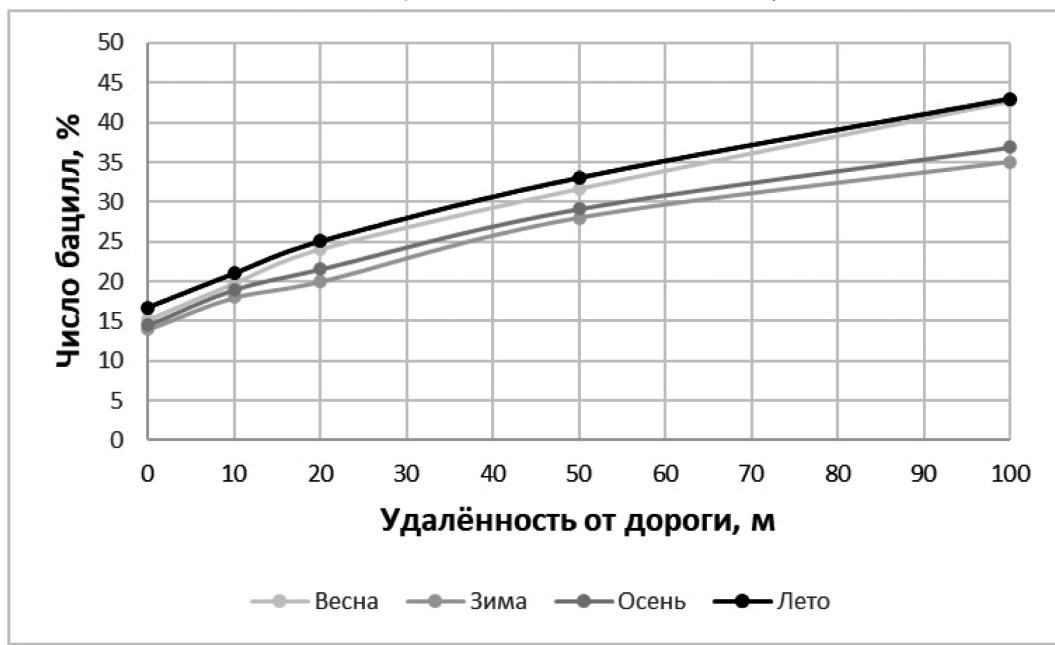


Рис. 2. Доля почвенных бацилл в составе микробиоценозов опытных образцов почвы

от источника загрязнения. Биологическая активность почв опытных участков увеличивается пропорционально увеличению расстояния от автодороги.

Интенсивность выделения углекислого газа даёт достоверную информацию о самоочищающей способности антропогенно нарушенных почв [13]. О биологических процессах судят по почвенному дыханию, чем активнее в почве протекают микробиологические процессы, тем больше выделяется углекислого газа. В литературных источниках отмечено, что содержание кислорода и углекислого газа в почве изменяется по сезонам. Аналогичные данные получены и в настоящем исследо-

вании. Эмиссия CO_2 всех исследуемых почвенных образцов максимальна в летний период, а минимальна — зимой. Весной и осенью этот показатель газообмена имеет сходные значения. Во все периоды измерений количество выделившегося диоксида углерода увеличивается при удалении от автодороги. Интенсивность дыхания почвы опытных образцов увеличивается пропорционально удалению от источника загрязнения. За 24 часа из 10 г почвы с участка № 1 выделилось 2,4–5,4 мг CO_2 , с участка № 2 — 4,64–10,44 мг, с участка № 3 — 4,96–11,16 мг, с участка № 4 — 6,81–15,33, а с участка № 5 — 9,66–21,75 мг. Общая тенденция наблюдается во все периоды измерений: количество выделившегося угле-

Таблица 1.
Результаты опытов по определению биологической активности почвы на опытных участках

№ участка	Удалённость от дороги, м	Среднее время разложения мочевины, ч	Относительная погрешность $\delta_{y/x} \%$
Весна			
1	0	17,92	0,12
2	10	15,74	0,16
3	20	13,05	0,10
4	50	11,32	0,17
5	100	9,01	0,12
Лето			
1	0	11,95	0,08
2	10	10,49	0,16
3	20	8,70	0,10
4	50	7,55	0,20
5	100	6,01	0,08
Осень			
1	0	26,88	0,08
2	10	23,61	0,14
3	20	19,58	0,10
4	50	16,98	0,07
5	100	13,52	0,06
Зима			
1	0	26,88	0,12
2	10	23,61	0,07
3	20	19,58	0,00
4	50	16,98	0,13
5	100	13,52	0,06

кислого газа на условно незагрязнённом участке № 5 примерно в 4 раза превышает количество выделившегося углекислого газа на участке № 1, находящемся в непосредственной близости от источника загрязнения (Рисунок 3).

Токсичность почвы определяли по реакции кress-салата (*Lepidium sativum*). В ходе опыта фиксировали всхожесть и энергию прорастания семян. Почвы, которые сдерживают прорастание семян, развитие проростков и корней на 20% и более считаются фитотоксич-

ными. В зависимости от сезона сбора образцов почвы, за трое суток на почве с участка № 1 проросло 14–16 семян из 50, с участка № 2 — 19–21, с участка № 3 — 25–27, с участка № 4 — 28–30, а с участка № 5 — 37–38.

В настоящей работе также определяли актуальную и потенциальную кислотность почвенных образцов (Рисунок 4). Результаты потенциального измерения рН почвы оценивали по стандартным шкалам [13].

Определение актуальной кислотности позволило установить, что во все исследуемые сезоны рН на участке № 1 составляет от 4,0 до 4,1, на участках №№ 2–5 — от 4,6 до 4,9. Кислотность почв колеблется от сильно-кислых до кислых, чем ближе к источнику загрязнения, тем больше кислотность исследуемых участков. Повышение кислотности почвы на придорожных участках свидетельствует о возможном поступлении загрязняющих веществ в почву. Потенциальная кислотность почв независимо от сезона на изученных участках больше ($\text{рН} < 4$), чем актуальная, что соответствует норме, поэтому потребность почвы в известковании увеличивается по мере приближения к источнику загрязнения.

В различные сезоны энергия прорастания семян и их всхожесть, при удалении от автодороги, увеличиваются более чем в 2 и 1,5 раза соответственно, а токсичность почв уменьшается. На участке № 1, который находится непосредственно близко к источнику загрязнения, доля всхожести семян имеет самые низкие значения (52–53 %). Можно предположить, что почва на данном участке является среднетоксичной. Почва с участков, удалённых от автодороги на расстояниях 10, 20 и 50 м имеет слабое загрязнение, всхожесть семян составляет 63–84 %, а почва, собранная с участка № 5 является нетоксичной, так как имеет самые высокие показатели всхожести — более 90 %.

Наши исследования показали, что определение фитотоксичности почвы по реакции биологических объектов является показательным и эффективным методом изучения загрязнённых почв. Расчеты демонстрируют обратно пропорциональную связь между ОМЧ, долей почвенных бацилл и биологической активностью, токсичностью почв. Полученные коэффициенты детерминации означают тесную связь между исследуемыми показателями (Таблицы 2, 3).

Биологическая активность почвы зависела от ОМЧ в почве и содержания почвенных бацилл в образце. В свою очередь выявлен характерный отклик микробиологических показателей на уровень токсичности почвы, выражаемый в снижении общей численности микроорганизмов и доли бацилл в образцах загрязнённых почв.

Прямо пропорциональная связь установлена между ОМЧ, долей почвенных бацилл и интенсивностью ды-

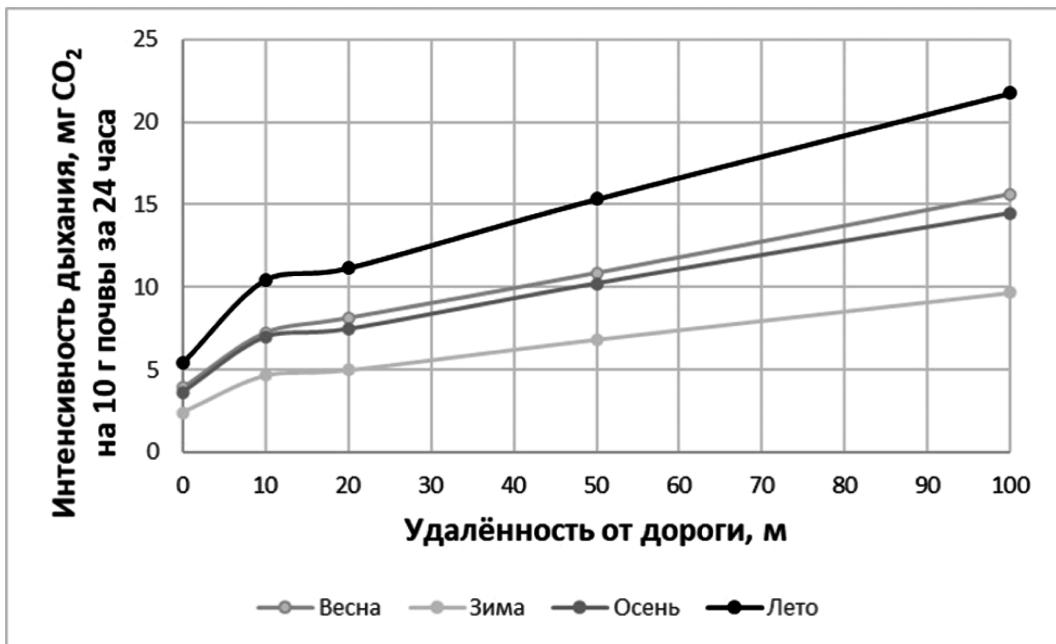


Рис. 3. Интенсивность дыхания почвы за сутки на опытных участках

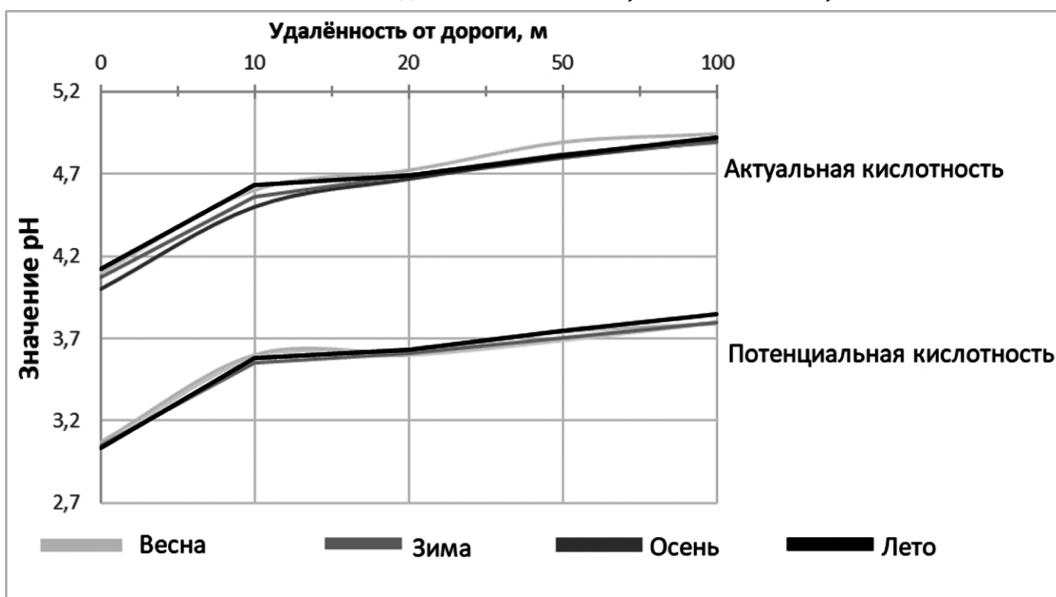


Рис. 4. Кислотно-щелочные свойства почвы опытных участков

хания почв. Полученные коэффициенты детерминации означали тесную связь между исследуемыми показателями (Таблица 4). Разница в полученных коэффициентах в пределах погрешности позволяет предположить, что связь между ОМЧ, содержанием почвенных бацилл и биохимическими показателями почвы сохраняется вне зависимости от времени года.

По сезонам года разница между исследованиями незначительна и не превышает погрешности, что подтверждает достоверность измерений (Таблицы 2–4).

Таким образом, комплекс биохимических и микробиологических показателей биологической активности

почв может быть использован для диагностики состояния её загрязнения при условии сравнения с соответствующими фоновыми почвами. Предложенные биохимические и микробиологические методы отличаются высокой информативностью, при этом не требуют значительных экономических затрат и специального оборудования.

Выводы

На основании проведённых исследований можно сделать следующие выводы:

1. В почве, исследованных участков, преобладали микромицеты, встречались бактерии родов *Bacillus*, *Pseudomonas* и *Clostridium*, в единичных

Таблица 2.

Зависимость биологической активности почв
от микробиологических показателей

№ п/п	Сезон	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации $R^2_{x,y}$	Относительная погрешность $\delta_{y/x'} \%$
Общее микробное число				
1	Весна	$y = -2,10x + 13,08$	-0,94	5,10
2	Лето	$y = -2,30x + 17,08$	-0,95	5,40
3	Осень	$y = -2,03x + 12,94$	-0,95	6,20
4	Зима	$y = -2,24x + 14,85$	-0,94	4,9
Доля почвенных бацилл				
1	Весна	$y = -0,35x + 15,02$	-0,86	3,09
2	Лето	$y = -0,30x + 16,81$	-0,88	2,32
3	Осень	$y = -0,34x + 19,80$	-0,89	3,07
4	Зима	$y = -0,31x + 14,23$	-0,89	3,11

Таблица 3.

Зависимость токсичности почв
от микробиологических показателей

№ п/п	Сезон	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации $R^2_{x,y}$	Относительная погрешность $\delta_{y/x'} \%$
Общее микробное число				
1	Весна	$y = -0,07x + 3,76$	0,89	4,30
2	Лето	$y = -0,07x + 5,41$	0,88	4,15
3	Осень	$y = -0,06x + 3,87$	0,89	4,25
4	Зима	$y = -0,07x + 4,15$	0,88	4,19
Доля почвенных бацилл				
1	Весна	$y = -0,59x + 38,98$	-0,99	4,29
2	Лето	$y = -0,50x + 46,06$	-0,97	4,19
3	Осень	$y = -0,53x + 45,86$	-0,98	4,14
4	Зима	$y = -0,56x + 41,89$	-0,97	4,21

Таблица 4.

Зависимость интенсивности дыхания почвы
от микробиологических показателей

№ п/п	Сезон	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации $R^2_{x,y}$	Относительная погрешность $\delta_{y/x'} \%$
Общее микробное число				
1	Весна	$y = 3,59x + 1,51$	0,94	3,45
2	Лето	$y = 3,59x + 1,40$	0,94	3,92
3	Осень	$y = 3,49x + 0,80$	0,94	4,70
4	Зима	$y = 3,53x + 1,23$	0,94	3,55
Доля почвенных бацилл				
1	Весна	$y = 0,46x - 2,49$	-0,97	3,59
2	Лето	$y = 0,47x - 3,24$	-0,97	3,87
3	Осень	$y = 0,48x - 1,62$	-0,97	4,12
4	Зима	$y = 0,47x - 1,40$	-0,97	3,74

количествах обнаруживаются бактерии родов *Proteus* и *Enterococcus*.

2. По мере удаления от источника загрязнения общее микробное число и доля почвенных бацилл в почве возрастила.
3. Биологическая активность, интенсивность дыхания почв опытных участков увеличивалась пропорционально удалённости от автодороги, а фитотоксичность и кислотность уменьшались.
4. Между общим микробным числом, долей почвенных бацилл и выбранными для исследования биохимическими параметрами (биологической активностью, интенсивностью дыхания и токсичностью почвенных участков) прослеживается тесная связь — 86–98% их изменчивости зависела от микробиологических показателей.

Связь между биохимическими и микробиологическими показателями почвы сохранялась вне зависимости от времени года, что подтверждено статистически.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горовцов А.В., Показатели структуры микробиоценоза почв г. Ростов-на-Дону как инструмент мониторинга состояния антропогенно-преобразованных почв // Научный журнал КубГАУ. — №89(05). — 2013. — С. 1–13.
2. ГОСТ Р 58595–2019 Почвы. Отбор проб.
3. Звягинцев Д.Г. Биология почв. — 2005. — 445 с.
4. Казеев К.Ш. Биологическая диагностика и индикация почв: методология и методы исследований. — 2003. — 216 с.
5. Даденко Е.В., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Методы определения ферментативной активности почв. — 2021. — 176 с.
6. Никулина А.Р., Сачкова Е.Д., Бубнова Л.В. Определение биологической активности почв в целях поддержания равновесия урбоэкосистемы // Известия БГУ. — 2020. — № 4. — С. 586–592.
7. Сорокин А.Е., Савич В.И. Мохаммади Ш. Колесник А.И. Агробиологическая оценка депонирования CO_2 почвами сухостепной зоны // Плодородие. — 2021. — № 2. — С. 65–67.
8. Звягинцев Д.Г. Методы почвенной микробиологии и биохимии. — 1991. — С. 144–145.
9. МУК 4.2.3695–21 Методы контроля. Биологические и микробиологические факторы. Методы микробиологического контроля почвы.
10. Добровольская Т.Г. Структура бактериальных сообществ почв. — 2002. — 282 с.
11. Зенова Г.М., Степанова А.Л., Лихачева А.А., Манучарова Н.А. Практикум по биологии почв. — 2002. — 120 с.
12. Инешина Е.Г., Гомбоева С.В. Почвенные микроорганизмы. Прокариоты, выделение, учет и идентификация. — 2007. — 147 с.
13. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). — 2011. — 351 с.
14. Мешалкина Ю.Л., Самсонова В.П. Математическая статистика в почвоведении: Практикум. — 2008. — 84 с.

© Гарбуль Анна Викторовна (anna.cucumaria@yandex.ru); Гарбуль Евгений Алексеевич (garbul@mmbi.info);
Макаревич Елена Викторовна (makarevichev@mauniver.ru); Литвинова Марина Юрьевна (litvinovamyu@mauniver.ru);
Кожухова Екатерина Вячеславовна (kozhukhovaev@mauniver.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»