



DOI: <https://doi.org/10.23859/estr-240514>

EDN: <https://elibrary.ru/mwdlqh>

УДК 504.05:631.46 (470.44)

Научная статья

Геохимическая и микробиологическая индикация техногенной трансформации почв города Балаково (Саратовская область)

Е.В. Плешакова*^{ORCID}, А.С. Шешнёв^{ORCID}, О.А. Герасимов^{ORCID},
Е.В. Глинская^{ORCID}, Д.М. Голубев^{ORCID}, Д.Д. Нестеркина^{ORCID},
А.А. Овечкина^{ORCID}

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет
им. Н.Г. Чернышевского, 410012, Россия, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83*

*plekat@yandex.ru

Аннотация. В результате почвенно-экологических исследований на территории города Балаково Саратовской области в 2023 г. выявлены две локальные техногенные геохимические аномалии. Установлено высокое содержание технофильных элементов и основные элементы-загрязнители почв – цинк, свинец, медь и никель. По уровню обогащенности гетеротрофными микроорганизмами почвы характеризуются как очень богатые ($> 1 \times 10^7$ КОЕ/г почвы), на двух участках в промышленной зоне и на двух в рекреационной зоне – как богатые (1×10^7 КОЕ/г почвы). Среднее количество культивируемых аэробных гетеротрофных микроорганизмов в урбаноземах в 2 раза, в индустриоземах – в 3 раза ниже, чем в природных почвах. По уровню обогащенности микромицетами городские почвы варьируют от очень обедненных ($< 2 \times 10^6$ КОЕ/г почвы) до богатых ($1-2 \times 10^7$ КОЕ/г почвы). Зоны максимальной техногенной трансформации почв характерны для промышленных районов и жилой малоэтажной застройки с низким уровнем благоустройства.

Ключевые слова: городские почвы, тяжелые металлы, бактерии, микромицеты

ORCID:

Е.В. Плешакова, <https://orcid.org/0000-0003-3836-0258>

А.С. Шешнёв, <https://orcid.org/0000-0003-3566-8652>

О.А. Герасимов, <https://orcid.org/0000-0003-3837-6938>

Е.В. Глинская, <https://orcid.org/0000-0002-1675-5438>

Д.М. Голубев, <https://orcid.org/0000-0001-9471-6066>

Д.Д. Нестеркина, <https://orcid.org/0009-0006-5953-3647>

А.А. Овечкина, <https://orcid.org/0009-0001-8110-7891>

Для цитирования: Плешакова, Е.В. и др., 2025. Геохимическая и микробиологическая индикация техногенной трансформации почв города Балаково (Саратовская область). *Трансформация экосистем* 8 (3), 99–117. <https://doi.org/10.23859/estr-240514>

Поступила в редакцию: 14.05.2024

Принята к печати: 28.08.2024

Опубликована онлайн: 15.08.2025








DOI: <https://doi.org/10.23859/estr-240514>

EDN: <https://elibrary.ru/mwdlqh>

UDC 504.05:631.46 (470.44)

Article

Geochemical and microbiological indication of technogenic transformation of soils in the city of Balakovo (Saratov Oblast)

E.V. Pleshakova* , A.S. Sheshnev , O.A. Gerasimov ,
E.V. Glinskaya , D.M. Golubev , D.D. Nesterkina ,
A.A. Ovechkina 

Saratov National Research State University named after N.G. Chernyshevsky, Astrakhanskaya St. 83, Saratov, 410012 Russia

*plekat@yandex.ru

Abstract. The soil-ecological studies (2023) conducted in the city of Balakovo, Saratov oblast allowed to detect two local technogenic geochemical anomalies with a high content of technophilic elements and major pollutants of soils (zinc, lead, copper and nickel). In terms of heterotrophic microorganisms enrichment, soils are characterized as highly rich ($> 1 \times 10^7$ CFU/g), while in two sites of the industrial zone and in two plots of the recreational area as rich (1×10^7 CFU/g). The average number of cultivated aerobic heterotrophic microorganisms in urban soils is 2 times and in industrial 3 times lower than in natural soils. By micromycetes presence, urban soils range from very poor ($< 2 \times 10^6$ CFU/g) to rich ($1-2 \times 10^7$ CFU/g). Zones of maximum technogenic soil transformation are typical of industrial areas and low-rise residential buildings with bad amenities of life.

Keywords: urban soils, heavy metals, bacteria, micromycetes

ORCID:

E.V. Pleshakova, <https://orcid.org/0000-0003-3836-0258>

A.S. Sheshnev, <https://orcid.org/0000-0003-3566-8652>

O.A. Gerasimov, <https://orcid.org/0000-0003-3837-6938>

E.V. Glinskaya, <https://orcid.org/0000-0002-1675-5438>

D.M. Golubev, <https://orcid.org/0000-0001-9471-6066>

D.D. Nesterkina, <https://orcid.org/0009-0006-5953-3647>

A.A. Ovechkina, <https://orcid.org/0009-0001-8110-7891>

To cite this article: Pleshakova, E.V. et al., 2025. Geochemical and microbiological indication of technogenic transformation of soils in the city of Balakovo (Saratov Oblast). *Ecosystem Transformation* 8 (3), 99–117. <https://doi.org/10.23859/estr-240514>

Received: 14.05.2024

Accepted: 28.08.2024

Published online: 15.08.2025

Введение

Воздействие опасных загрязнителей окружающей среды на почвы как депонирующую среду широко и разнообразно. В районах крупных городов приоритетными для контроля загрязнителями почв являются тяжелые металлы (ТМ), обладающие экотоксичностью (Скугорева и др., 2016). В зависимости от вида промышленных предприятий в городские почвы могут с различной интенсивностью поступать ксенобиотики. Широкая вариабельность антропогенного загрязнения почв особенно актуализирует вопросы мониторинга городских территорий, определения степени техногенной трансформации биогеоценозов не только по геоиндикационным, но и по биоиндикационным показателям.

Для Саратовской области актуальна проблема ухудшения состояния почв вокруг промышленных городов в связи с техногенным воздействием (Абросимова и Макарова, 2018; Ларионов, 2013; Ларионов и др., 2020; Меркулова и др., 2015). Одним из лидеров региона по выбросам загрязняющих веществ является г. Балаково – индустриальный город с развитой энергетической, машиностроительной, химической, металлургической и другими отраслями промышленности (транспортной, строительной, пищевой, легкой и пр.). Город с населением около 182 тыс. человек (данные 2022 г.¹) расположен на левом берегу Саратовского и Волгоградского водохранилищ. Поступление загрязняющих веществ в почвы происходит преимущественно аэрогенным путем. По данным Саратовского ЦГМС, ежегодные выбросы пыли в атмосферный воздух города в течение 2018–2022 гг. составили около 2.7 млн тонн/год².

Общеизвестна важность эколого-геохимических исследований почв городских территорий для диагностики экологического состояния среды обитания человека, выявления очагов техногенного воздействия, организации мониторинга окружающей среды и принятия управленческих решений. Данные биомониторинга служат одним из чутких показателей состояния почв. Почва – основной компонент наземной экосистемы, функционирование которой во многом обеспечивается почвенным микробиомом, что определяет важность исследования микробных сообществ (Pospelova et al., 2015; Wolińska et al., 2016). Изучение почвенных микробоценозов дает важную информацию о состоянии почв в условиях техногенного воздействия (Ананьева и др., 2021; Стома и др., 2020). Почвенные микробные сообщества реагируют на изменения в окружающей среде модификациями в своей структуре и численности; многие исследователи отмечают высокую индикаторную способность микроорганизмов (Abbasian et al., 2016; Adesina and Adelasoye, 2014; Alrumman et al., 2015). Показатели численности микроорганизмов определенных эколого-физиологических групп применяются для диагностики трансформации почвенно-биотического комплекса в условиях урбанизации (Жуйкова и др., 2016; Степанова и др., 2016). С помощью комплекса микробиологических показателей можно заметить отрицательные изменения в почве еще на начальных этапах техногенного воздействия (Korneykova et al., 2021; Sumampouw and Risjani, 2014).

Внимание к исследованию качества урбанизированной среды Саратовской области возникло на рубеже 1980–1990-х гг. На территории г. Балаково и его ближайших окрестностей была установлена геохимическая аномалия с высоким содержанием технофильных элементов, в первую очередь Zn, Pb, Cu и Ni³. Детальные геохимические исследования почв выполнялись в 1998 г. при создании «Экологического атласа г. Балаково». Закартированы полиэлементные аномальные техногенные геохимические поля в районах расположения промышленных предприятий, в зоне городской свалки и очистных сооружений, в жилой застройке и садово-дачных массивах. Обнаружено высокое содержание Pb, Zn, Ni, Cr, Cu (Макаров и др., 2002). В 2013 г. картирование эколого-геохимического состояния почв в зоне воздействия Балаковского полигона захоронения бытовых отходов обнаружил в ряду определяемых показателей экологически опасное площадное загрязнение почв Ni, Zn

¹ Федеральная служба государственной статистики. Интернет-ресурс. URL: rosstat.gov.ru (дата обращения: 12.02.2024).

² Обзор состояния и загрязнения окружающей среды на территории деятельности Саратовского ЦГМС – филиала ФГБУ «Приволжское УГМС» за 2022 г., 2023. Саратовский ЦГМС, Саратов, Россия, 80 с.

³ Отчет по объекту «Мониторинг геологической среды, прилегающей к территории Балаковской АЭС», 1991. Саратовская ГГЭ, НИИГ СГУ, Приволжский, Россия, 704 с.

и Cu (Еремин, 2016). Зону вокруг крупных предприятий в юго-западной части города (ТЭЦ-4, «Балаковорезинотехника», завода минеральных удобрений, закрытого завода «Химволокно») следует рассматривать как исторически сложившуюся техногенную геохимическую аномалию.

Во всех исследованиях отмечалось повышенное (а для Cr, Ni и Cu – высокое) местное фоновое содержание ТМ в почвах Балаковского района, что обусловлено как особенностями почвообразующих пород, так и субрегиональным техногенным загрязнением со стороны крупного Балаковского промышленного узла. Высокое содержание Zn связывалось с воздействием выбросов завода «Химволокно», который к настоящему времени прекратил существование.

Таким образом, исследование содержания ТМ на всей территории г. Балаково не проводилось с 1998 г. Микробиологические свойства почв города, как и их взаимосвязи с геохимическими показателями, ранее не изучались. Цель исследований – анализ техногенной трансформации почв города Балаково методами геохимической и микробиологической индикации.

Материал и методы

Территорию города условно разделяет на две части плотина Саратовского водохранилища. Восточнее линии оси плотины и железной дороги на берегах водоема располагаются жилые районы, западнее – садово-дачные участки. Селитебная зона состоит из трех крупных районов: Островного, Зakanального и Центрального. Зakanальный и Центральный районы разделены Саратовским обводнительно-оросительным каналом. Основной массив промышленных предприятий расположен к югу и юго-западу от селитебной застройки.

Городская территория имеет равнинно-низменный рельеф надпойменных волжских террас. Почвообразующие породы – позднелейстоцен-голоценовые песчано-глинистые аллювиальные и лиманно-морские образования. На большей части застроенной территории в связи с созданием Саратовского водохранилища и каналов, утечек из коммуникаций грунтовые воды залегают на глубине менее 5 м, значительная часть подтоплена с локальным развитием заболачивания. Климат континентальный. В холодное время года преобладают ветры южного и юго-западного, летом – северного и северо-восточного направлений.

В ближайших окрестностях города природные почвы – черноземы южные и темно-каштановые почвы, развитые на четвертичных отложениях волжских надпойменных террас. В пойме развиты пойменные луга, ныне в основном затопленные водохранилищем. Прилегающие к городу природные ландшафты – разнотравно-типчачково-ковыльные и типчачково-ковыльные степи. Практически весь земельный фонд освоен в сельскохозяйственных целях.

В ходе нашей работы исследованы 50 почвенных проб, отобранных на территории г. Балаково в конце августа 2023 г. (Рис. 1). Все образцы проанализированы по геохимическим показателям, 32 – по микробиологическим параметрам. Отбор проб из верхнего почвенного горизонта (до 5 см) методом конверта на площадках размером 5×5 м проведен в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-2017⁴. Площадки опробования относительно равномерно распределены по жилой застроенной территории города (Табл. 1). Все площадки расположены в пределах парков, дворовых зеленых зон и палисадников на удалении от крупных автомобильных и железнодорожных линий. Такой подход позволяет получить общее представление о геохимическом поле городской территории и выделить участки для детальных исследований структуры возможного загрязнения.

Участки фонового опробования расположены к юго-западу от зон техногенной нагрузки: на расстоянии 20 км от города и на удалении 14 км от ближайшего предприятия – завода сортового проката «Металлургический завод Балаково».

Два фоновых участка (ландшафты-аналоги) расположены на плоских водоразделах, представляющих собой целинные степные участки, покрытые естественной типчачково-ковыльной растительностью. Этот район использовался в качестве местного фонового при исследованиях Балаковского полигона в 1998 г. как расположенный за пределами установленных зон загрязнения снегового и почвенного покровов. Значение фона принято нами как среднее арифметическое по фоновым площадкам.

Почвенные пробы для химических исследований просушены при комнатной температуре, проведено их квартование и растирание, подготовлены навески фракции менее 1 мм. Анализ содержания кислоторастворимых форм Zn, Ni, Cr, Cu, Pb, Cd выполнен методом атомно-абсор-

⁴ ГОСТ 17.4.4.02-2017. Охрана природы (ССОП). Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа (с Поправкой).

Табл. 1. Краткая характеристика площадок отбора проб почв.

№№ проб	Характеристика почв и грунтов (по: Строганова и Агаркова, 1992; Строганова и др., 1997)	Местоположение точек отбора проб
10, 16, 17, 38	уплотнённые культуроземы – рыхлый насыпной грунт в благоустроенных кварталах современной застройки	
11, 12, 21, 22, 26, 30, 34, 35, 37	урбаноземы – антропогенно-глубоко-преобразованные почвы, уплотненные, с обилием техногенных включений и физико-химическими изменениями, в старых районах города	селитебно-транспортная зона с зелеными насаждениями в районах многоэтажной застройки
7, 28	культуроземы палисадников	
2, 41, 45	урбаноземы участков с малоэтажной застройкой	
9	урбанозем переувлажненного участка с влаголюбивой растительностью	селитебная зона, палисадники и зеленые зоны в частном секторе и дачных массивах
14	природные почвы с бытовым мусором	
1, 8, 36, 43	урбаноземы – антропогенно-глубоко-преобразованные почвы, уплотненные, с обилием техногенных включений, строительных отходов и физико-химическими изменениями	промышленная зона с травянистой и древесно-кустарниковой растительностью около действующих и закрытых заводов, гаражных массивов
15, 19, 33, 40, 42, 44	индустриоземы – грунты с обилием техногенного рыхлого материала, строительного мусора	
3, 5	природные почвы, представленные черноземом южным в естественном сложении, уплотненные	
13, 24, 29	культуроземы – недавний насыпной грунт в благоустроенных парках	
6, 20, 25	уплотненные почвы в старых городских парках	рекреационная зона, участки в скверах и парках
23, 27	урбаноземы – антропогенно-глубоко-преобразованные почвы, уплотненные, с физико-химическими изменениями, со строительными и бытовыми отходами	
4, 18, 31, 39, 46, 47, 48, 49, 50	природные почвы – черноземы южные и темно-каштановые почвы, на многих участках замусорены, с обилием включений	рекреационная зона, лесопосадки по периферии города
32	урбанозем	

Табл. 2. Содержание кислоторастворимых форм тяжелых металлов в почвах на территории г. Балаково, мг/кг.

№ пробы	Cu	Cr	Pb	Zn	Ni	Cd
1	5.19	0.19	8.68	13.65	6.63	0.05
2	6.66	0.22	21.54	34.25	8.11	0.09
3	9.97	0.51	12.53	33.34	15.4	0.17
4	7.22	0.43	4.67	15.19	13.57	0.08
5	3.97	0.22	3.21	9.92	6.0	0.04
6	5.83	0.23	8.0	21.07	7.52	0.11
7	6.28	0.21	15.32	29.91	6.86	0.09
8	7.29	0.25	23.57	26.18	8.86	0.08
9	7.57	0.33	27.99	20.55	13.03	0.1
10	6.45	0.23	12.59	29.07	8.47	0.07
11	5.43	0.27	9.68	25.72	8.67	0.25
12	4.29	0.19	6.93	30.45	6.15	0.13
13	4.84	0.2	5.13	16.81	7.38	0.11
14	12.82	0.18	9.09	45.32	12.52	0.26
15	4.75	0.16	13.14	20.57	5.15	0.14
16	7.11	0.32	14.84	44.83	9.47	0.17
17	7.19	0.21	13.76	77.08	5.7	0.17
18	6.48	0.24	5.61	27.12	7.68	0.1
19	14.78	0.31	85.51	77.98	4.86	0.21
20	6.06	0.21	7.03	20.62	7.78	0.13
21	6.0	0.19	8.73	46.12	7.61	0.11
22	6.39	0.26	85.59	174.36	6.13	0.27
23	3.97	0.14	4.43	15.43	3.87	0.05
24	5.26	0.2	4.31	18.85	7.99	0.13
25	4.08	0.18	5.22	13.18	5.97	0.05
26	7.04	0.21	9.3	48.51	7.29	0.15

№ пробы	Cu	Cr	Pb	Zn	Ni	Cd
27	15.36	0.27	104.35	109.11	6.78	0.34
28	4.74	0.2	309.88	35.3	7.34	0.07
29	4.96	0.23	5.43	17.34	8.92	0.13
30	5.46	0.2	5.44	17.80	8.0	0.11
31	3.89	0.21	4.16	12.72	9.09	0.1
32	6.07	0.29	5.25	18.62	9.29	0.07
33	9.44	0.25	21.45	36.93	5.02	0.16
34	6.07	0.21	16.38	122.61	4.26	0.11
35	5.31	0.25	6.26	27.08	9.49	0.11
36	6.18	0.21	5.16	13.6	7.88	0.06
37	4.66	0.22	6.46	69.91	7.9	0.11
38	4.48	0.22	2.66	11.86	9.87	0.09
39	5.12	0.29	4.41	20.96	11.38	0.09
40	2.96	0.13	5.19	30.08	3.54	0.07
41	6.01	0.24	6.06	14.64	8.87	0.07
42	12.78	0.41	15.74	45.54	13.36	0.15
43	5.57	0.3	5.65	12.35	9.46	0.04
44	4.76	0.12	5.57	34.24	3.3	0.05
45	5.24	0.24	5.2	10.97	7.22	0.04
46	5.01	0.25	4.53	13.15	11.6	0.09
47	7.05	0.24	9.91	28.97	10.99	0.15
48	11.07	0.33	12.87	41.24	9.25	0.1
49	5.68	0.28	5.37	46.88	10.7	0.14
50	7.28	0.32	5.31	9.7	11.87	0.09
фон	6.42	0.36	7.09	15.09	10.67	0.16

Табл. 3. Коэффициенты концентрации химических элементов и суммарные показатели загрязнения почв на территории г. Балаково.

№ пробы	K_c						Z_c
	Cu	Cr	Pb	Zn	Ni	Cd	
1	0.81	0.53	1.22	0.9	0.62	0.31	< 16
2	1.04	0.61	3.04	2.27	0.76	0.56	< 16
3	1.55	1.42	1.77	2.21	1.44	1.06	< 16
4	1.12	1.19	0.66	1.01	1.27	0.5	< 16
5	0.62	0.61	0.45	0.66	0.56	0.25	< 16
6	0.91	0.64	1.13	1.4	0.7	0.69	< 16
7	0.98	0.58	2.16	1.98	0.64	0.56	< 16
8	1.14	0.69	3.32	1.73	0.83	0.5	< 16
9	1.18	0.92	3.95	1.36	1.22	0.63	< 16
10	1.0	0.64	1.78	1.93	0.79	0.44	< 16
11	0.85	0.75	1.37	1.7	0.81	1.56	< 16
12	0.67	0.53	0.98	2.02	0.58	0.81	< 16
13	0.75	0.56	0.72	1.11	0.69	0.69	< 16
14	2.0	0.5	1.28	3.0	1.17	1.63	< 16
15	0.74	0.44	1.85	1.36	0.48	0.88	< 16
16	1.11	0.89	2.09	2.97	0.89	1.06	< 16
17	1.12	0.58	1.94	5.11	0.53	1.06	< 16
18	1.01	0.67	0.79	1.8	0.72	0.63	< 16
19	2.3	0.86	12.06	5.17	0.46	1.31	17.84
20	0.94	0.58	0.99	1.37	0.73	0.81	< 16
21	0.93	0.53	1.23	3.06	0.71	0.69	< 16
22	1.0	0.72	12.07	11.55	0.57	1.69	23.31
23	0.62	0.39	0.62	1.02	0.36	0.31	< 16
24	0.82	0.56	0.61	1.25	0.75	0.81	< 16
25	0.64	0.5	0.74	0.87	0.56	0.31	< 16

№ пробы	K_c						Z_c
	Cu	Cr	Pb	Zn	Ni	Cd	
26	1.1	0.58	1.31	3.21	0.68	0.94	< 16
27	2.39	0.75	14.72	7.23	0.64	2.13	23.47
28	0.74	0.56	43.71	2.34	0.69	0.44	45.05
29	0.77	0.64	0.77	1.15	0.84	0.81	< 16
30	0.85	0.56	0.77	1.18	0.75	0.69	< 16
31	0.61	0.58	0.59	0.84	0.85	0.63	< 16
32	0.95	0.81	0.74	1.23	0.87	0.44	< 16
33	1.47	0.69	3.03	2.45	0.47	1.0	< 16
34	0.95	0.58	2.31	8.13	0.4	0.69	< 16
35	0.83	0.69	0.88	1.79	0.89	0.69	< 16
36	0.96	0.58	0.73	0.9	0.74	0.38	< 16
37	0.73	0.61	0.91	4.63	0.74	0.69	< 16
38	0.7	0.61	0.38	0.79	0.93	0.56	< 16
39	0.8	0.81	0.62	1.39	1.07	0.56	< 16
40	0.46	0.36	0.73	1.99	0.33	0.44	< 16
41	0.94	0.67	0.85	0.97	0.83	0.44	< 16
42	1.99	1.14	2.22	3.02	1.25	0.94	< 16
43	0.87	0.83	0.8	0.82	0.89	0.25	< 16
44	0.74	0.33	0.79	2.27	0.31	0.31	< 16
45	0.82	0.67	0.73	0.73	0.68	0.25	< 16
46	0.78	0.69	0.64	0.87	1.09	0.56	< 16
47	1.1	0.67	1.4	1.92	1.03	0.94	< 16
48	1.72	0.92	1.82	2.73	0.87	0.63	< 16
49	0.88	0.78	0.76	3.11	1.0	0.88	< 16
50	1.13	0.89	0.75	0.64	1.11	0.56	< 16

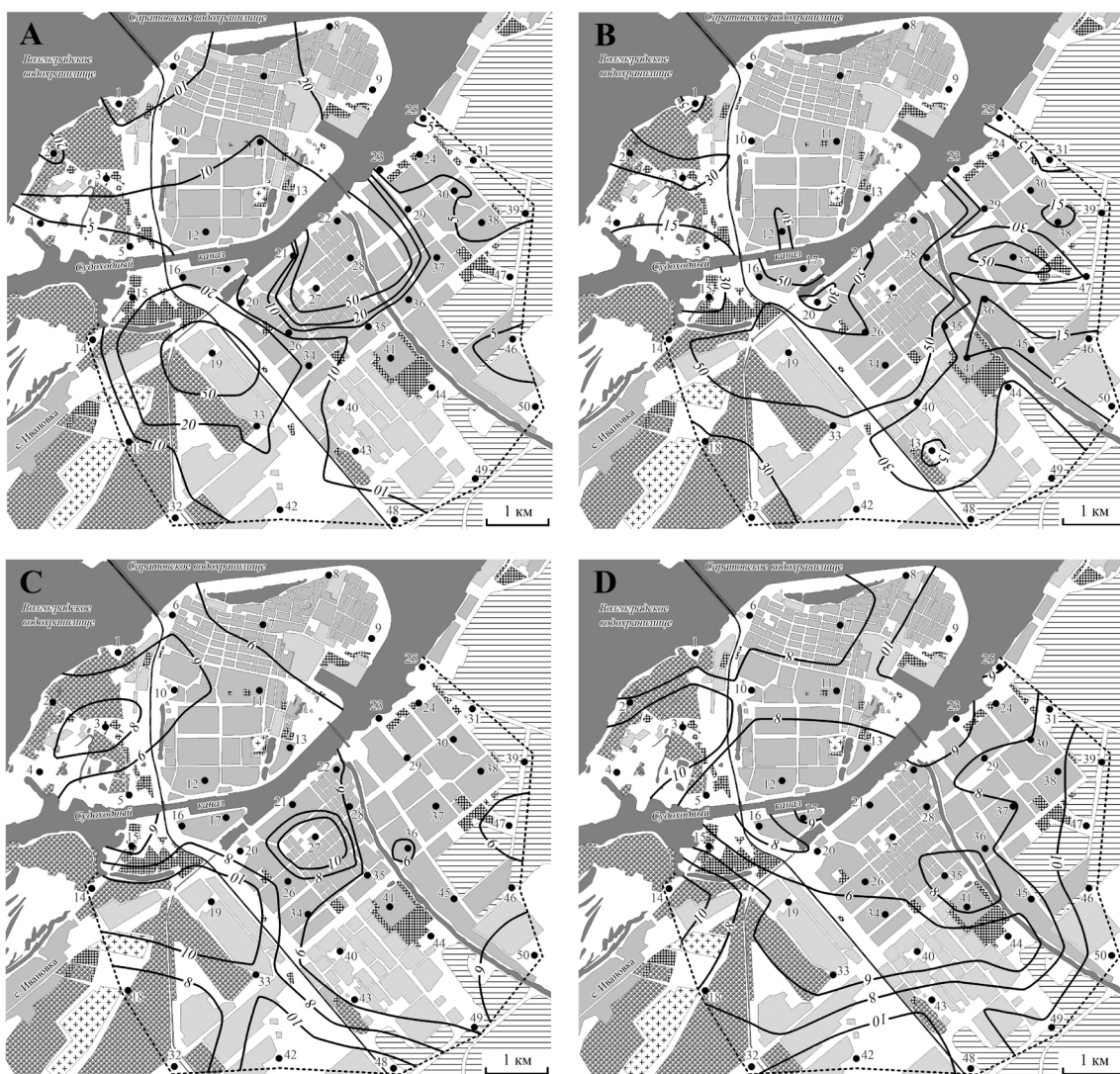


Рис. 2. Содержание кислоторастворимых форм тяжелых металлов в почвах, мг/кг. **А** – свинец, **В** – цинк, **С** – медь, **Д** – никель. Прочие обозначения как на Рис. 1.

бционной спектрометрии в режиме пламенной атомизации на спектрометре «Квант-2АТ» (ООО «КОРТЭК», Россия) в вытяжках 1 М раствором HNO_3 (ПНД Ф 16.2.2:2.3.71-2011)⁵. Перечень металлов определен на основе результатов детальных почвенно-геохимических работ 1990-х гг.

С целью оценки техногенной геохимической трансформации почв выполнен расчет коэффициентов концентрации химических элементов:

$$K_c = C_i / C_{\text{ф}},$$

где C_i – содержание i -того элемента в образце, $C_{\text{ф}}$ – его фоновое содержание.

Для интегральной оценки полиметаллического загрязнения использован суммарный показатель загрязнения:

$$Z_c = \sum(K_{c1} + \dots + K_{cn}) - (n - 1),$$

где K_{ci} – коэффициент концентрации i -того элемента, n – число элементов с $K_c > 1$.

⁵ ПНД Ф 16.2.2:2.3.71-2011. Количественный химический анализ почв. Методика измерений массовых долей металлов в осадках сточных вод, донных отложениях, образцах растительного происхождения спектральными методами.

Категории химического загрязнения выделены в соответствии с СанПиН 1.2.3685-21⁶ по величине Z_c : < 16 – допустимая, 16–32 – умеренно опасная, 32–128 – опасная, >128 – чрезвычайно опасная.

Учет численности микроорганизмов в почве проведен методом предельных разведений путем посева почвенных суспензий на агаризованные питательные среды и подсчета выросших колоний через 3–7 суток культивирования при температуре 28–30 °С. Оценка общей численности культивируемых гетеротрофных микроорганизмов (ОЧГМ) выполнена на ГРМ-агаре (ФБУН ГНЦ ПМБ, Оболенск, Россия) (Нетрусов и др., 2005). Для определения численности микроскопических грибов использована среда Сабуро. Высев на ГРМ-агар выполнен из разведений 10^{-6} , 10^{-7} , на среду Сабуро – 10^{-3} , в трех повторностях. Данные по численности микроорганизмов пересчитаны на воздушно-сухие образцы.

Экспериментальные данные проверены на нормальность распределения по критерию Колмогорова – Смирнова. Сравнение средних проведено с использованием теста Фишера и показателя наименьшей существенной разницы ($p \leq 0.05$) в однофакторном анализе дисперс (ANOVA). Корреляционный анализ взаимосвязей между микробиологическими и геохимическими свойствами почв выполнен с помощью коэффициента Пирсона (r). Для обработки и анализа данных использован пакет STATISTICA 13.0 (TIBCO Software Inc. 2017, Statsoft Russia). Карты построены в MapInfo Pro 11.0 (Pitney Bowes Software Inc., 2011, США).

Результаты и обсуждение

Результаты определения содержания металлов на территории г. Балаково представлены в Табл. 2, расчеты коэффициентов концентрации и суммарных показателей загрязнения – в Табл. 3. Схемы содержания ТМ в почвах приведены на Рис. 2.

Содержание Cd находится в пределах фонового в 84% проб, и лишь в 8 пробах оно превышено. Величина $K_c > 1.5$ зафиксирована для почв четырех пробных площадок, удаленных друг от друга (№№ 11, 14, 22, 27). Четких закономерностей площадного распространения Cd не обнаружено.

Высокое фоновое содержание Cr приводит к тому, что на территории города в 94% проб его содержание ниже уровня фона: он превышен в пределах 1.5 раза лишь в трех пробах (№№ 3, 4, 42). Закономерности пространственного распространения не выявлены.

Содержание Ni ниже фонового уровня выявлено в 40 пробах (80%), выше фона – в 10 (20%, все до уровня 1.5 фонов). Повышенная концентрация Ni образует площадную зону на восточной – юго-восточной окраине города и на западе островной части в природных почвах естественного сложения. Вероятно, повышенное содержание Ni характерно для естественных почв района. При создании культуроземов и физико-химических воздействиях в жилых и промышленных зонах отмечается рассеяние этого элемента. В отдельных пробах повышение уровня Ni связано

Табл. 4. Корреляция между геохимическими и микробиологическими показателями почв. * – значимый уровень r при $p = 0.05$; C – концентрация металла; ОЧГМ – общая численность гетеротрофных микроорганизмов.

Показатели	C_{Ni}	C_{Pb}	C_{Zn}	C_{Cu}	C_{Cr}	C_{Cd}	ОЧГМ	Численность микромицетов
C_{Ni}	1	-0.128	-0.258	0.274*	0.740*	0.089	0.117	-0.070
C_{Pb}		1	0.327*	0.193	0.001	0.203	-0.025	0.206
C_{Zn}			1	0.399*	0.055	0.640*	-0.068	0.060
C_{Cu}				1	0.506*	0.635*	-0.119	-0.200
C_{Cr}					1	0.208	-0.114	-0.063
C_{Cd}						1	-0.086	-0.187

⁶ СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания (Раздел IV. Почва населенных мест и сельскохозяйственных угодий).

с техногенным воздействием. Так, максимальное содержание зафиксировано на следующих площадках: № 4 ($K_c = 1.27$), недалеко от которой ранее располагалась территория деревообрабатывающего завода; № 14 ($K_c = 1.17$), рядом с которой ранее располагалась нефтебаза; № 42 ($K_c = 1.25$) – район между ТЭЦ-4, авто- и железной дорогой.

Аналогичные тенденции обнаружены в отношении содержания в почве Си. Содержание ниже фонового наблюдалось в 32 (64%) пробах, выше – в 18 пробах (36%). Концентрации Си выше 1.5 фоновых значений характерны для юго-западной части города, где расположены промышленные предприятия энергетического и машиностроительного профилей. Показательно, что в двух пробах, где зафиксировано наибольшее содержание Ni, уровень Си также максимален: на площадках №№ 14 ($K_c = 2$) и 42 ($K_c = 1.99$). В районе площадок № 19 ($K_c = 2.3$) и 27 ($K_c = 2.39$) расположены действующие и закрытые цеха строительного-монтажных предприятий, присутствует строительный и бытовой мусор.

Содержание Pb в почвенных пробах изменяется в широком диапазоне от 2.66 до 309.88 мг/кг. Превышено фоновое содержание в 24 пробах (48%), понижено – в 26 (52%). В Заканальной части города с преобладанием частной застройки и относительно низким уровнем благоустройства отмечена наиболее контрастная аномалия по трем площадкам: №№ 22 ($K_c = 12.07$), 27 ($K_c = 14.72$) и 28 ($K_c = 43.71$). Вероятно, свинцовое загрязнение в этом районе города носит унаследованный характер и сформировалось под воздействием аэрогенного выпадения выбросов автотранспорта. Вторая аномалия содержания Pb приурочена к обширной промышленной территории с расположением машиностроительных и строительных предприятий – площадки №№ 19 ($K_c = 12.06$) и 33 ($K_c = 3.03$). Воздействием производств может быть объяснено повышенное содержание Pb на востоке островной части города на площадках №№ 8 ($K_c = 3.32$) и 9 ($K_c = 3.95$). Участки пониженного содержания свинца приурочены к сельскохозяйственным землям и лесопосадкам по периферии города, а также к районам новой застройки с распространением культуроземов.

Диапазон концентраций Zn в городских почвах значителен: от 9.7 до 174.36 мг/кг. Выше фонового содержание в 39 (78%), ниже – в 11 пробах (22%). Наиболее контрастная аномалия протягивается от промышленной зоны на западе города на северо-восток через селитебную зону старой средне- и малоэтажной застройки, при этом максимальное содержание приурочено к жилой зоне ($K_c = 7.23$ – 11.55). На обширном участке города содержание Zn превышает два фоновых уровня: площадки №№ 17 ($K_c = 5.11$), 19 ($K_c = 5.17$), 22 ($K_c = 11.55$), 27 ($K_c = 7.23$) и 34 ($K_c = 8.13$). Меньшее на общегородском фоне содержание Zn характерно для островной части города.

Полученные нами данные о содержании тяжелых металлов соответствуют исследованиям, выполненным в 1980–1990-х гг. По-прежнему на территории города выделяется геохимическая аномалия с высоким содержанием технофильных элементов. Приоритетными для литогеохимического мониторинга элементами-загрязнителями выступают Zn, Pb, Си и Ni.

Проведенный корреляционный анализ (Табл. 4) показал наличие взаимосвязей между определенными парами ТМ. Сильная прямая корреляционная связь обнаружена в парах: Ni–Cr ($r = 0.74$; $p = 0.05$). Средняя корреляционная связь (значения $r \pm 0.3$ – 0.69) выявлена в парах: Cd–Zn, Cd–Си, Cr–Си, Zn–Си и Pb–Zn. Для пары Ni–Си выявлена достоверная слабая корреляционная взаимосвязь.

По величине Z_c почвы 46 пробных площадок (92%) относятся к категории допустимого химического загрязнения (Табл. 3). Умеренно опасное загрязнение обнаружено на площадках №№ 19 (ассоциация $Pb_{12.06}$ – $Zn_{5.17}$ – $Cu_{2.3}$ – $Cd_{1.31}$) и 27 ($Pb_{14.72}$ – $Zn_{7.23}$ – $Cu_{2.39}$ – $Cd_{2.13}$). Опасным загрязнением характеризуется почва площадки № 28 ($Pb_{43.71}$ – $Zn_{2.34}$). В пространственном отношении полиметаллическое загрязнение образует две локальные техногенные геохимические аномалии

- 1) в промышленной зоне в районе площадки № 19;
- 2) в центре города, занятом исторически сложившейся частной жилой застройкой с низким уровнем благоустройства (площадки №№ 2, 27, 28).

Известно, что общая численность гетеротрофных микроорганизмов, несмотря на существенное влияние сезонных факторов, является надежным индикатором экологического состояния городских почв (Sumatrouw and Risjani, 2014).

По уровню обогащенности гетеротрофными микроорганизмами по шкале Д.Г. Звягинцева (1978) почвы на территории г. Балаково охарактеризованы как очень богатые ($> 1 \times 10^7$ КОЕ/г почвы), а на нескольких участках (№№ 20, 33, 36 и 48) как богатые (1×10^7 КОЕ/г почвы) (Табл. 5) Максимальное количество культивируемых аэробных гетеротрофных микроорганизмов ($\approx 10^{10}$) обнаружено в пробах №№ 5, 47 (природные почвы) и 41 (культурозем). Среднее количество культивируемых аэробных гетеротрофных микроорганизмов убывало в ряду природные почвы → культуроземы → урбаноземы (2.5×10^8 , 1.9×10^8 и 1.2×10^8 КОЕ/г почвы соответственно).

Табл. 5. Результаты оценки микробиологических показателей в почвах г. Балаково.

Почвы	Номер пробы	Общая численность гетеротрофных микроорганизмов, lg КОЕ/г почвы	Численность микромицетов, lg КОЕ/г почвы
Урбаноземы	1	8.2	6.2
	8	8.6	5
	11	8.2	6
	21	8.4	6
	26	9	6.2
	32	8	6
	35	7.6	5.6
	36	7	6.3
	37	8.3	7
	43	7.5	7
Индустриоземы	19	7.6	5
	33	7	7
	40	8	6.2
	42	8	7
	44	9	7
Культуроземы	9	9	5.8
	10	8.8	5.6
	13	8	5.5
	14	9	6
	20	7	6.7
	24	7.9	5.9
	25	7.5	7
	28	8.2	7.3
	29	7.3	6.2
	41	10	6
Природные почвы	4	8.7	6
	5	10	5.8
	18	8.3	6.1
	31	8.3	6
	39	8.7	7
	47	9.5	5.5
	48	7	6.3
	49	7.3	7
	50	7.5	5.9

В индустриоземах среднее количество культивируемых аэробных гетеротрофных микроорганизмов было в 3 раза ниже, чем в природных почвах, составляя 8.3×10^7 КОЕ/г почвы. ОЧГМ была минимальной (1×10^7 КОЕ/г почвы) на участках №№33 и 36 в промышленной зоне, №№20 и 48 – в рекреационной зоне, указывая на возможное ингибирующее действие загрязнителей.

В рамках настоящих исследований не обнаружены достоверные корреляции между содержанием ТМ и количеством гетеротрофных микроорганизмов в почвенных микробеценозах города. В целом данный микробиологический показатель в городских почвах не отличался существенным образом от показателя в фоновых почвах, расположенных за пределами города, что свидетельствует о благоприятной экологической ситуации, за исключением нескольких участков. Известно, что реакция микробного комплекса на загрязнение почв ТМ максимально проявляется непосредственно после их внесения и постепенно ослабевает благодаря действию защитных механизмов у бактерий. Наши исследования указывают на устойчивость микробеценозов изученных городских почв к антропогенному воздействию и их высокий адаптационный потенциал.

В.А. Тереховой (2007) доказана возможность и необходимость использования показателей численности и видового состава микромицетов в целях индикации и диагностики загрязнения почв. Под влиянием антропогенных факторов видовое богатство и разнообразие микромицетов в почве нередко падает, что рассматривается как опасная тенденция (Марфенина, 2005). Показано, что в сильно загрязненных почвах, содержащих комплекс $Zn+Pb+Cd$, иногда сохраняется лишь несколько видов с высокой частотой встречаемости или появляются нехарактерные виды. Так, под воздействием ТМ в микробеценозах появляются устойчивые к большим концентрациям металлов виды грибов: *Penicillium funiculosum*, *Penicillium purpurogenum*, *Penicillium lilacinum*, *Aspergillus terreus* (Берсенева и Саловарова, 2011). При дальнейшем переходе от зоны резистентности к зоне репрессии может наступить полное подавление роста и развития микромицетов. Есть данные о стимуляции развития почвенных фитопатогенных микромицетов с доминированием *Verticillium tenerum*, *Fusarium solani* при антропогенном загрязнении соединениями Cd и Cu (Рудаков и Рудаков, 2009).

В наших исследованиях почвы на территории г. Балаково сильно различались по уровню обогащенности микромицетами (Табл. 5): от очень обедненных ($< 2 \times 10^6$ КОЕ/г почвы) до богатых ($1-2 \times 10^7$ КОЕ/г почвы). Зависимость между данным микробиологическим показателем и уровнем загрязнения почвы ТМ установить не удалось. Максимальное количество микромицетов ($\approx 10^7$) наблюдалось как в индустриоземах и урбаноземах на юге изученной территории (например, в пробах №№ 33, 42, 43 и 44), так и в культуроземах в северо-восточной части (в пробах №№ 25 и 28). В островной части города содержание микромицетов в почве более низкое. Среднее количество микромицетов в природных почвах, культуроземах, урбаноземах и индустриоземах было сходным, составляя $\approx 1-2 \times 10^6$ КОЕ/г почвы, и не отличалось от содержания микромицетов в фоновых почвах.

Выводы

Геохимический анализ территории г. Балаково позволил выявить основные элементы-загрязнители почв: Zn , Pb , Cu и Ni , что соответствует результатам исследований конца XX в. Определены участки максимальной техногенной трансформации почв с полиметаллическим загрязнением, приуроченные к зоне вокруг крупных предприятий в юго-западной части города и району малоэтажной жилой застройки с низким уровнем благоустройства. Особо следует отметить влияние качества благоустройства и мероприятий по созданию комфортной городской среды на состояние почв. В микрорайонах современной застройки культуроземы скверов и парков обладают удовлетворительным состоянием, в отличие от зон старой малоэтажной застройки с обнаруженными литогеохимическими аномалиями.

Показано отсутствие значимых различий в количественном составе почвенных микробеценозов г. Балаково и микробеценозов фоновых почв. Установлен убывающий ряд содержания гетеротрофных микроорганизмов в почвах: природные почвы → культуроземы → урбаноземы → индустриоземы. В культуроземах, урбаноземах и индустриоземах среднее количество культивируемых аэробных гетеротрофных микроорганизмов было в 1,3, 2 и 3 раза ниже, чем в природных почвах.

Полученные данные геохимических и микробиологических исследований использованы для построения картографического материала, наглядно отражающего проблемные участки в различных функциональных зонах города. Проведенное зонирование может служить основой для мониторинга почв в экологических и санитарно-гигиенических целях.

Результаты позволяют представить характер распределения опасных экотоксикантов в различных по характеру техногенной нагрузки зонах города и их влияние на состояние микробеценозов

почв, что важно учитывать при проектировании для создания комфортной среды обитания человека. Для сокращения содержания ТМ в почве необходима модернизация промышленных предприятий, а также создание вокруг них расширенных санитарно-защитных зон. Особое внимание следует уделить рекультивации территории закрытых и частично демонтированных предприятий, на промышленных площадках которых накоплены значительные объемы разнообразных отходов.

Список литературы

- Абросимова, О.В., Макарова, А.А., 2018. Экологический анализ почвенных разностей урбосистем г. Саратова. *Антропогенная трансформация природной среды* 4, 129–133.
- Ананьева, Н.Д., Иващенко, К.В., Сушко, С.В., 2021. Микробные показатели городских почв и их роль в оценке экосистемных сервисов (обзор). *Почвоведение* 10, 1231–1246. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21100038>
- Берсенева, О.А., Саловарова, В.П., 2011. Воздействие выбросов металлургических производств на почвенные микробиоценозы. *Известия Иркутского государственного университета. Серия «Биология. Экология»* 4 (4), 18–24.
- Еремин, В.Н., Павлов, П.Д., Решетников, М.В., Шешнёв, А.С., 2016. Эколого-геохимическая оценка почвенного покрова в районе Балаковского полигона захоронения бытовых отходов (Саратовская область). *Инженерная геология* 2, 50–58.
- Жуйкова, Т.В., Гордеева, В.А., Безель, В.С., Костина, Л.В., Ившина, И.Б., 2016. Структурно-функциональное состояние почвенной микробиоты при химическом загрязнении среды. *Поволжский экологический журнал* 2, 186–198. <https://doi.org/10.18500/1684-7318-2016-2-186-198>
- Звягинцев, Д.Г., 1978. Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых ее показателей. *Почвоведение* 6, 48–54.
- Ларионов, М.В., 2013. Особенности накопления техногенных тяжелых металлов в почвах городов Среднего и Нижнего Поволжья. *Вестник Томского государственного университета* 368, 189–194.
- Ларионов, М.В., Ларионов, Н.В., Громова, Т.С., Сираева, И.С., Ермоленко, А.С., Володькин, А.А., Левкина, Г.В., 2020. Факторы деградации почв и атмосферного воздуха и их влияние на состояние растений в городских и пригородных экосистемах. *Самарский научный вестник* 9 (2), 78–85. <https://doi.org/10.17816/snv202113>
- Макаров, В.З., Новаковский, Б.А., Чумаченко, А.Н., 2002. Эколого-географическое картографирование городов. Научный мир, Москва, Россия, 196 с.
- Марфенина, О.Е., 2005. Антропогенная экология почвенных грибов. Медицина для всех, Москва, Россия, 196 с.
- Меркулова, М.Ю., Тихомирова, Е.И., Абросимова, О.В., 2015. Комплексный мониторинг экологического состояния урбаноземов по биологическим показателям (на примере г. Саратова). *Теоретическая и прикладная экология* 4, 25–29. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2015-4-025-029>
- Нетрусов, А.И., Егорова, М.А., Захарчук, Л.М., 2005. Практикум по микробиологии. Академия, Москва, Россия, 608 с.
- Рудаков, В.О., Рудаков, О.Л., 2009. Природа почвенных фитотоксикозов и проблема защиты растений. *Агро XXI* 1–3, 11–13.

- Скугорева, С.Г., Ашихмина, Т.Я., Фокина, А.И., Лялина, Е.И., 2016. Химические основы токсического действия тяжелых металлов (обзор). *Теоретическая и прикладная экология* 1, 4–13. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2016-1-014-019>
- Степанова, Л.П., Яковлева, Е.В., Писарева, А.В., 2016. Экологическая оценка характера антропогенного воздействия на изменение структуры микробиологического комплекса техногенно-трансформированных земель. *Плодородие* 3, 37–40.
- Стома, Г.В., Манучарова, Н.А., Белокопытова, Н.А., 2020. Биологическая активность микробных сообществ в почвах некоторых городов России. *Почвоведение* 6, 703–715. <https://doi.org/10.31857/S0032180X2006012X>
- Строганова, М.Н. Агаркова, М.Г., 1992. Городские почвы: опыт изучения и систематики. *Почвоведение* 7, 16–24.
- Строганова, М.Н., Мягкова, А.Д., Прокофьева, Т.В., 1997. Роль почв в городских экосистемах. *Почвоведение* 1, 96–101.
- Терехова, В.А., 2007. Микробиоты в экологической оценке водных и наземных экосистем. Наука, Москва, Россия, 215 с.
- Abbasian, F., Lockington, R., Megharaj, M., Naidu, R., 2016. The biodiversity changes in microbial population of soils contaminated with crude oil. *Current Microbiology* 72 (6), 663–670. <https://doi.org/10.1007/s00284-016-1001-4>
- Adesina, G.O., Adelasoye, K.A., 2014. Effect of crude oil pollution on heavy metal contents, microbial population in soil, and maize and cowpea growth. *Agricultural Sciences* 5 (1), 43–50. <https://dx.doi.org/10.4236/as.2014.51004>
- Alrumman, S.A., Standing, D.B., Paton, G.I., 2015. Effects of hydrocarbon contamination on soil microbial community and enzyme activity. *Journal of King Saud University – Science* 27 (1), 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2014.10.001>
- Korneykova, M.V., Vasenev, V.I., Nikitin, D.A., Soshina, A.S., Dolgikh, A.V., Sotnikova, Y.L., 2021. Urbanization affects soil microbiome profile distribution in the russian arctic region. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18 (21), 11665. <https://doi.org/10.3390/ijerph182111665>
- Pospelova, O.A, Mandra, Y.A, Stepanenko, E.E, Okrut, S.V, Zelenskaya, T.G., 2015. Identification of technogenic disturbances of urban ecosystems using the methods of bioindication and biotesting. *Biosciences Biotechnology Research Asia* 12 (3), 2241–2251. <https://doi.org/10.13005/bbra/1897>
- Sumampouw, O.J., Risjani, Y., 2014. Bacteria as indicators of environmental pollution: review. *International Journal of Ecosystem* 4 (6), 251–258. <https://doi.org/10.5923/j.ije.20140406.03>
- Wolińska, A., Kuźniar, A., Szafranek-Nakonieczna, A., Jastrzębska, N., Roguska, E., Stępniewska, Z., 2016. Biological activity of autochthonic bacterial community in oil-contaminated soil. *Water, Air and Soil Pollution* 227, 130. <https://doi.org/10.1007/s11270-016-2825-z>

References

- Abbasian, F., Lockington, R., Megharaj, M., Naidu, R., 2016. The biodiversity changes in microbial population of soils contaminated with crude oil. *Current Microbiology* 72 (6), 663–670. <https://doi.org/10.1007/s00284-016-1001-4>

- Abrosimova, O.V., Makarova, A.A., 2018. Ekologicheskii analiz pochvennykh raznostei urbosistem g. Saratova [Ecological analysis of the soil differences of the urban system of Saratov]. *Antropogennaia transformatsiia prirodnoi sredy [Anthropogenic Transformation of Nature]* 4, 129–133. (In Russian).
- Adesina, G.O., Adelasoye, K.A., 2014. Effect of crude oil pollution on heavy metal contents, microbial population in soil, and maize and cowpea growth. *Agricultural Sciences* 5 (1), 43–50. <https://dx.doi.org/10.4236/as.2014.51004>
- Alrumman, S.A., Standing, D.B., Paton, G.I., 2015. Effects of hydrocarbon contamination on soil microbial community and enzyme activity. *Journal of King Saud University – Science* 27 (1), 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2014.10.001>
- Ananyeva, N.D., Ivashchenko, K.V., Sushko, S.V., 2021. Microbial indicators of urban soils and their role in the assessment of ecosystem services: a review. *Eurasian Soil Science* 54 (10), 1517–1531. <https://doi.org/10.1134/S1064229321100033>
- Berseneva, O.A., Salovarova, V.P., 2011. Vozdeistvie vybrosov metallurgicheskikh proizvodstv na pochvennye mikrobiotsenozy [The influence of emissions of metallurgical production on soil microcenoses]. *Izvestiia Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Biologiya. Ekologiya" [The Bulletin of Irkutsk State University. Series "Biology. Ecology"]* 4 (4), 18–24. (In Russian).
- Eremin, V.N., Pavlov, P.D., Reshetnikov, M.V., Sheshnev, A.S., 2016. Ekologo-geokhimicheskaya otsenka pochvennogo pokrova v raione Balakovskogo poligona zakhoroneniia bytovykh otkhodov (Saratovskaya oblast) [Ecological and geochemical assessment of a soil cover near the Balakovo ground of burial of municipal solid waste (Saratov region)]. *Inzhenernaya geologiya [Engineering Geology]* 2, 50–58. (In Russian).
- Korneykova, M.V., Vasenev, V.I., Nikitin, D.A., Soshina, A.S., Dolgikh, A.V., Sotnikova, Y.L., 2021. Urbanization affects soil microbiome profile distribution in the Russian arctic region. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18 (21), 11665. <https://doi.org/10.3390/ijerph182111665>
- Larionov, M.V., 2013. Osobennosti nakopleniya tekhnogennykh tiazhelykh metallov v pochvakh gorodov Srednego i Nizhnego Povolzh'ya [Features of the accumulation of technogenic heavy metals in the soils of cities in the Middle and Lower Volga region]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta [Tomsk State University Journal]* 368, 189–194. (In Russian).
- Larionov, M.V., Larionov, N.V., Gromova, T.S., Siraeva, I.S., Ermolenko, A.S., Volodkin, A.A., Levkina, G.V., 2020. Faktory degradatsii pochvy i atmosfernogo vozdukh i ikh vliianie na sostoianie rastenii v gorodskikh i prigorodnykh ekosistemakh [Factors of soil and atmospheric air degradation and their influence on the state of plants in urban and suburban ecosystems]. *Samarskii nauchnyi vestnik [Samara Journal of Science]* 9 (2), 78–85. (In Russian). <https://doi.org/10.17816/snv202113>
- Makarov, V.Z., Novakovskiy, B.A., Chumachenko, A.N., 2002. Ekologo-geograficheskoe kartografirovaniye gorodov [Geoecological mapping of cities]. Nauchnyi mir, Moscow, Russia, 196 p. (In Russian).
- Marfenina, O.E., 2005. Antropogennaia ekologiya pochvennykh gribov [Anthropogenic ecology of soil fungi]. Meditsina dlia vsekh, Moscow, Russia, 196 p. (In Russian).
- Merkulova, M.Yu., Tikhomirova, E.I., Abrosimova, O.V., 2015. Kompleksnyi monitoring ekologicheskogo sostoianiia urbanozemov po biologicheskim pokazateliam (na primere g. Saratova) [Comprehensive monitoring of the ecological state of urban soils by biological indicators (on the example of Saratov)]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya [Theoretical and Applied Ecology]* 4, 25–29. (In Russian). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2015-4-025-029>

- Netrusov, A.I., Egorova, M.A., Zakharchuk, L.M., 2005. Praktikum po mikrobiologii [Workshop on microbiology]. Akademiia, Moscow, Russia, 608 p. (In Russian).
- Pospelova, O.A, Mandra, Y.A, Stepanenko, E.E, Okrut, S.V, Zelenskaya, T.G., 2015. Identification of technogenic disturbances of urban ecosystems using the methods of bioindication and biotesting. *Biosciences Biotechnology Research Asia* **12** (3), 2241–2251. <https://doi.org/10.13005/bbra/1897>
- Rudakov, V.O., Rudakov, O.L., 2009. Priroda pochvennykh fitotoksikozov i problema zashchity rastenii [The nature of soil phytotoxicoses and the problem of plant protection]. *Agro XXI* **1–3**, 11–13. (In Russian).
- Skugoreva, S.G., Ashihmina, T.Ya., Fokina, A.I., Lyalina, E.I., 2016. Khimicheskie osnovy toksicheskogo deistviia tiazhelykh metallov (obzor) [Chemical groups of toxic effect of heavy metals (review)]. *Teoreticheskaiia i prikladnaia ekologiia [Theoretical and Applied Ecology]* **1**, 4–13. (In Russian). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2016-1-014-019>
- Stepanova, L.P., Yakovleva, E.V., Pisareva, A.V., 2016. Ekologicheskaiia otsenka kharaktera antropogennoho vozdeistviia na izmenenie struktury mikrobiologicheskogo kompleksa tekhnogenno-transformirovannykh zemel' [Environmental assessment of anthropogenic impact on the microbiological complex structure of technogenically transformed lands]. *Plodorodie [Soil Fertility]* **3**, 37–40. (In Russian).
- Stoma, G.V., Manucharova, N.A., Belokopytova, N.A., 2020. Biological activity of microbial communities in soils of some Russian cities. *Eurasian Soil Science* **53** (6), 760–771. <https://doi.org/10.1134/S1064229320060125>
- Stroganova, M.N., Agarkova, M.G., 1992. Gorodskie pochvy: opyt izucheniia i sistematiki [Urban soils: experience of study and systematics]. *Pochvovedenie [Soil Science]* **7**, 16–24. (In Russian).
- Stroganova, M.N., Myagkova A.D., Prokof'eva T.V., 1997. Rol' pochv v gorodskikh ekosistemakh [The role of soils in urban ecosystems]. *Pochvovedenie [Eurasian Soil Science]* **30** (1), 82–86. (In Russian).
- Sumampouw, O.J., Risjani, Y., 2014. Bacteria as indicators of environmental pollution: review. *International Journal of Ecosystem* **4** (6), 251–258. <https://doi.org/10.5923/j.ije.20140406.03>
- Terekhova, V.A., 2007. Mikromitsety v ekologicheskoi otsenke vodnykh i nazemnykh ekosistem [Micromycetes in ecological evaluation of aquatic and terrestrial ecosystems]. Nauka, Moscow, Russia, 215 p. (In Russian).
- Wolińska, A., Kuźniar, A., Szafranek-Nakonieczna, A., Jastrzębska, N., Roguska, E., Stępniewska, Z., 2016. Biological activity of autochthonic bacterial community in oil-contaminated soil. *Water, Air and Soil Pollution* **227**, 130. <https://doi.org/10.1007/s11270-016-2825-z>
- Zhuikova, T.V., Gordeeva, V.A., Bezel', V.S., Kostina, L.V., Ivshina, I.B., 2017. The structural and functional state of soil microbiota in a chemically polluted environment. *Biology Bulletin* **44**, 1228–1236. <https://doi.org/10.1134/S1062359017100193>
- Zviagintsev, D.G., 1978. Biologicheskaiia aktivnost' pochv i shkaly dlia otsenki nekotorykh ee pokazatelei [Biological activity of soils and scales for assessing some of its indicators]. *Pochvovedenie [Soil Science]* **6**, 48–54. (In Russian).