

**Экологическое состояние городских почв  
в условиях антропогенного засоления и загрязнения  
(на примере Северо-Западного округа Москвы)**

© 2015. М. Ф. Дорохова, к.б.н., с.н.с., Н. Е. Кошелева, д.г.н., в.н.с., Е. В. Терская, н.с.,  
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,  
e-mail: dorochova@mail.ru

Приведены результаты комплексного экологического исследования почв Северо-Западного административного округа (СЗАО) г. Москвы. Установлено, что большая часть изученных почв обладает нейтральной реакцией. Несмотря на низкие содержания в них водорастворимых солей на момент отбора проб, существенная доля в составе водной вытяжки ионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$  свидетельствует об их сезонном засолении вследствие использования противогололёдных реагентов. Во всех почвах наблюдаются высокие уровни содержания подвижных форм некоторых тяжёлых металлов (ТМ), приоритетными загрязнителями являются Cu, Cd и Cr. Суммарное загрязнение подвижными формами ТМ – наибольшее в почвах промышленной и селитебной зон изученной части города. Почвы разных функциональных зон различаются также по разнообразию микробиоты, в почвах промышленной зоны оно наименьшее. Высокой устойчивостью к комплексному воздействию антропогенных факторов в городских почвах обладают микромицеты с окрашенным мицелием, нематоды, безгетероцистные цианобактерии и некоторые водоросли. Для альго-цианобактериальных сообществ всех изученных почв характерно присутствие галофильных и существенная роль алкалофильных видов водорослей, что свидетельствует об их хроническом сезонном засолении противогололёдными реагентами и подщелачивании. Использование физико-химических и биологических показателей позволило выявить степень техногенной трансформации почв в разных функциональных зонах СЗАО.

Results of an integrated environmental research of soils in the North-Western District of Moscow are presented. It is found that most of the studied soils have a neutral pH. Despite the low content of water-soluble salts at the period of sampling, a significant share of  $\text{Na}^+$  and  $\text{Cl}^-$  in the aqueous extract from the soils indicates seasonal soil salinity in consequence of de-icing agents. All soils have high levels of mobile forms of some heavy metals (HMs), the priority pollutants are Cu, Cd and Cr. The total contamination with HM mobile forms of soils is maximal in industrial and residential zones of the studied district. Soils of different land-use zones also differ in a variety of microbiota, which is minimal in the soils of industrial zone. In studied urban soils micromycetes with colored mycelium, nematodes, non-heterocystous cyanobacteria and some algae possess high resistance to the complex influence of anthropogenic factors. In addition, in these soils alga-cyanobacterial communities are characterized by the presence of halophilic and by the significant role of alkaliphilic species of algae. This fact indicates to a chronic seasonal salinization of soils with de-icing agents and their alkalization. Due to the application of physical, chemical and biological parameters the degree of anthropogenic soil transformation in different land-use zones of the North-Western District was revealed.

Ключевые слова: городские почвы, засоление, загрязнение, тяжёлые металлы, микробиота

Keywords: urbansoils, salinity, pollution, heavymetals, microbiota

**Введение**

Городские почвы формируются под воздействием антропогенных факторов, они депонируют разнообразные загрязняющие вещества и поэтому существенно отличаются от природных зональных почв по основным физико-химическим свойствам [1, 2] и составу микробиоты [3 – 7]. В результате происходит нарушение их экологических функций [8].

Сообщества почвенных микроорганизмов (сапротрофных бактерий, микромицетов, почвенной нано- и микрофауны, микроводорослей и цианобактерий) чутко реагируют на антропогенные воздействия и являются ценными биоиндикаторами, отражающими направленность и степень трансформации город-

ской среды [9]. Кроме того, именно почвенная микробиота является агентом биохимических превращений разнообразных соединений, поступающих в почву, что определяет её устойчивость к действию внешних факторов. Это делает необходимым изучение её реакций на те антропогенные воздействия, которым она подвергается в условиях города.

Очевидно, что познание закономерностей функционирования городских почв при разнотехногенной нагрузке требует применения комплексного подхода. Он предполагает анализ как физико-химических свойств почв и уровней их загрязнения тяжёлыми металлами (ТМ) и другими поллютантами, так и изучение популяций микроскопических обитателей почвы.

Первые комплексные исследования состояния почв г. Москвы были проведены в связи с разработкой подходов к биологической диагностике городских почв [10]. Была показана связь физических и физико-химических параметров городских почв с разнообразием, составом, структурой и количественными характеристиками комплексов обитающих в почве раковинных амёб и альгоцианобактериальных сообществ и перспективность их использования для индикации общего уровня антропогенного воздействия на почву в условиях мегаполиса. Наиболее подробно были изучены почвы рекреационной зоны, в меньшей степени – почвы других функциональных зон.

В дальнейшем на территории г. Москвы изучение почв, почвенной фауны и микробиоты было продолжено, особенно интенсивно в ботанических садах, городских парках и на прилегающих к ним территориях [5, 11 – 13]. Проблема антропогенного засоления почв г. Москвы была освещена в ряде работ [14 – 18]. Однако исследования, в которых вопросы загрязнения и засоления городских почв рассматривались бы совместно с оценкой их влияния на биологическую активность почв и почвенную микробиоту, единичны [19].

Цель данной работы – комплексная оценка экологического состояния городских почв в связи с их засолением и загрязнением ТМ. Для её достижения поставлены следующие задачи: 1) определить содержание доступных для биоты форм ТМ и основные физико-химические параметры почв в разных функциональных зонах города; 2) выявить состав и относительное обилие активно функционирующей почвенной микробиоты, особенности фототрофного компонента почвенных микробиоценозов при различной техногенной нагрузке; 3) изучить реакцию микробиоты на загрязнение и изменение свойств городских почв. Эти задачи решались на примере Северо-Западного административного округа (СЗАО) г. Москвы, который характеризуется длительным промышленным освоением.

### Объекты и методы исследования

Центральная часть СЗАО г. Москвы, где проводились исследования, расположена на Москворецко-Яузском междуречье в пределах Смоленско-Московской возвышенности, которая представляет собой аккумулятивно-эрозионную равнину с абсолютными отметками 160–180 м, сложенную флювиогляци-

альными и моренными отложениями. Здесь преобладают урбанозёмы слабо- и среднегумусированные среднемощные [20].

Техногенные вещества в ландшафты этой территории поступают от предприятий машиностроения, металлообработки, производства железобетонных изделий, отделочных материалов и строительного раствора; пищевой промышленности, очистных сооружений, станций теплоснабжения, двух междугородних автостанций, автомобильного и железнодорожного транспорта [21]. Зимой дополнительными источниками антропогенного воздействия на почву становятся противогололёдные реагенты. Противогололёдные смеси в настоящее время используют на автомагистралях, тротуарах в жилых кварталах, в промышленных и даже в рекреационных зонах г. Москвы.

Объектом исследования послужили поверхностные (0–5 см) горизонты почв, испытывающие наиболее сильное антропогенное воздействие. Пробы почв с соблюдением стерильности были отобраны весной, после схода снежного покрова, в разных функциональных зонах города: промышленной, транспортной, селитебной и рекреационной. В пределах селитебной зоны обследованы жилые кварталы с разновысотной застройкой (в том числе примыкающие к промышленной зоне). В промышленной, транспортной и селитебной зонах изученные почвы развиваются под травянистой сорнотравно-злаковой растительностью. Рекреационная зона включает парк Покровское-Стрешнево и долину р. Сходни в её нижнем течении (в непосредственной близости от промышленной зоны). В парке пробы почв отобраны в лесных фитоценозах с выраженным травяным ярусом, вне проекции крон взрослых деревьев; в долине р. Сходни – в характерных для неё луговых сообществах.

Содержание ТМ и свойства почв изучены в Эколого-геохимическом центре географического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова. В почвенных пробах определены следующие физико-химические показатели:  $pH_{\text{водн}}$  и TDS в водной вытяжке (соотношение почва:раствор 1:5) потенциометрическим методом на приборе HANNA 2/3; анионный и катионный состав водной вытяжки методом ионной хроматографии (ионный хроматограф «Стайер»). Подвижные формы ТМ извлекали 1н. ацетатно-аммонийным буфером ( $pH$  4,8; соотношение почва:раствор 1:10), их содержание определяли атомно-абсорбционным методом на спектрометре novAA-400 (Analytik-JenaAG, Германия, пламенная атомизация)

и атомно-абсорбционном спектрометре AA-240Z (Varian, США, электротермическая атомизация). Содержание обменного аммония определяли по методу ЦИНАО [22] колориметрически с использованием спектрофотометра Cary 60 (Agilent Technologies) [23, 24].

Для оценки экологической опасности загрязнения почв подвижными формами металлов рассчитывался коэффициент экологической опасности ( $K_o$ ):  $K_o = C/ПДК$ , где  $C$  – содержание подвижных форм элемента в изучаемой почве,  $ПДК$  – предельно допустимая концентрация подвижных форм элемента в почвах [25]. Приняты следующие значения ПДК подвижных форм металлов: Cu – 3,0; Ni – 4,0; Zn – 23 мг/кг [26], Pb – 6 мг/кг [27], Co – 5,0; Cr – 6,0 мг/кг [28]. Ориентировочно допустимая концентрация (ОДК) подвижных форм Cd принята равной 0,32 мг/кг. При её расчёте исходили из ОДК валового содержания Cd 2 мг/кг и средней подвижности этого элемента в почвах Восточного округа г. Москвы [29], равной 16%.

Экологическую опасность полиэлементного загрязнения почвы подвижными формами ТМ предложено оценивать с помощью показателя  $Z_o = \sum p \times K_o$ , в котором суммируются  $K_o > 1$  с коэффициентами  $p$ , зависящими от класса опасности элемента. Для элементов I класса опасности  $p = 1,5$ , для элементов II класса опасности  $p = 1,0$ . В отличие от индекса загряз-

нения почв (ИЗП) [30] его величина зависит от числа элементов, у которых зафиксировано превышение ПДК, и класса их опасности.

В этих же пробах почвы определялась активно вегетирующая микробиота в чашечных культурах со стёклами обрастания. Для выявления видового состава водорослей и цианобактерий использовались также накопительные водные культуры на среде Болда [31, 32]. Оценивались следующие биологические параметры: состав и относительное обилие водорослей, цианобактерий и представителей нано- и микрофауны, относительное обилие бесцветного и окрашенного мицелия грибов, соотношение экологических групп диатомовых водорослей. Относительное обилие представителей почвенной микробиоты определяли, используя шкалу [33]. Экологические характеристики диатомовых водорослей-индикаторов взяты из [34].

### Результаты и обсуждение

#### Физико-химические свойства и загрязнение городских почв ТМ

Большая часть изученных почв обладает нейтральной реакцией. Все почвы на момент исследования были не засолены, но существенная доля в составе водной вытяжки ионов  $Na^+$  и  $Cl^-$  (табл. 1) свидетельствует об их сезонном засолении вследствие использования

Таблица 1  
Физико-химические свойства и состав водной вытяжки поверхностного (0–5 см) слоя почв в разных функциональных зонах СЗАО г. Москвы (в числителе – среднее, в знаменателе – диапазон колебаний)

Функциональные зоны	pH <sub>водн.</sub>	Соли, %	Состав водной вытяжки	N <sub>водораств.</sub> + N <sub>обмен.</sub> , мг/л
Промышленная (n=1)	7,0	0,03	HCO <sub>3</sub> -Ca	5,28
Транспортная (n=5)	<u>7,1</u> 6,6-7,7	<u>0,05</u> 0,03-0,06	Cl-HCO <sub>3</sub> -Ca-Na	<u>7,09</u> 3,97-14,32
Селитебная (n=6)	<u>6,8</u> 6,6-7,5	<u>0,06</u> 0,04-0,09	HCO <sub>3</sub> -Na-Ca, Cl-HCO <sub>3</sub> -Ca-Na, Cl-HCO <sub>3</sub> -Na-Ca, NO <sub>3</sub> -HCO <sub>3</sub> -K-Ca	<u>9,74</u> 5,43-15,32
Рекреационная – в целом (n=6)	<u>6,7</u> 6,4-7,5	<u>0,06</u> 0,04-0,09	HCO <sub>3</sub> -Ca, HCO <sub>3</sub> -Na-Ca, Cl-HCO <sub>3</sub> -Ca-Na, Cl-HCO <sub>3</sub> -Na-Ca	
– парк (n=3)	<u>6,4</u> 6,4-6,5	<u>0,05</u> 0,04-0,07	HCO <sub>3</sub> -Na-Ca, Cl-HCO <sub>3</sub> -Ca-Na	<u>8,55</u> 5,03-15,25
– пойма (n=3)	<u>7,0</u> 6,4-7,5	<u>0,06</u> 0,04-0,09	HCO <sub>3</sub> -Ca, Cl-HCO <sub>3</sub> -Na-Ca	<u>5,75</u> 4,54-7,18

Таблица 2

Содержание подвижных форм тяжёлых металлов в поверхностном (0–5 см) слое почв разных функциональных зон СЗАО г. Москвы, мг/кг  
в числителе – среднее, в знаменателе – диапазон колебаний)

Функциональные зоны	Cd	Zn	Cr	Cu	Pb
Промышленная (n=1)	2,24	18,27	9,27	9,11	9,08
Транспортная (n=5)	<u>0,39</u> 0,05-0,91	<u>31,76</u> 8,77-68,72	<u>16,77</u> 7,58-27,10	<u>9,16</u> 5,89-12,34	<u>8,64</u> 4,70-13,61
Селитебная (n=6)	<u>1,28</u> 0,0-2,85	<u>23,20</u> 7,28-60,13	<u>15,69</u> 2,60-25,71	<u>15,25</u> 5,08-32,74	<u>8,61</u> 0,55-19,89
Рекреационная – в целом (n=6)	<u>1,48</u> 0,34-2,49	<u>14,68</u> 12,70-20,29	<u>13,87</u> 7,52-34,11	<u>6,13</u> 3,83-7,80	
– парк (n=3)	<u>0,46</u> 0,34-0,53	<u>16,81</u> 12,70-20,29	<u>10,49</u> 8,29-11,94	<u>6,52</u> 5,53-7,41	<u>10,73</u> 5,96-14,54
– пойма (n=3)	<u>1,47</u> 0,60-2,49	<u>12,56</u> 10,88-13,44	<u>17,25</u> 7,52-34,11	<u>5,73</u> 3,83-7,80	<u>3,17</u> 2,20-4,53

противогололёдных реагентов. Во всех почвах наблюдаются высокие уровни содержания подвижных форм некоторых ТМ (табл. 2, рис.).

Физико-химические свойства почв в разных функциональных зонах города обладают своей спецификой. Так, почвы *промышленной зоны* отличаются  $\text{HCO}_3$ -Ca составом водорастворимых солей и низким содержанием водорастворимых и поглощённых почвой минеральных форм азота. Для почв *транспортной зоны* характерен Cl- $\text{HCO}_3$ -Ca-Na состав водорастворимых солей, в некоторых случаях слабощелочная реакция и высокая вариабельность содержания минеральных форм азота. Еще большая пространственная неоднородность физико-химических свойств отмечена в почвах *селитебной и рекреаци-*

*онной зон*. Это проявляется в разнообразии не только уровней содержания минеральных форм азота, но и состава водорастворимых солей. Последнее связано как с различиями в интенсивности сезонного засоления почв, так, по-видимому, и с поступлением в почвы этих зон фекалий домашних животных и бытовых стоков. Почвы парка Покровское-Стрешнево отличаются слабокислой реакцией, характерной для слабонарушенных дерново-подзолистых почв под лесной растительностью.

Специфика почв разных функциональных зон проявляется также в содержании подвижных форм ТМ (табл. 2, рис.).

Значения  $K_o$  позволяют составить следующие ряды экологической опасности ТМ: в *промышленной зоне*  $\text{Cd} > \text{Cu} > \text{Cr}$ , Pb; в *транспортной* – Cu, Cr > Pb, Zn, Cd; в *селитебной* – Cu > Cd > Cr > Pb; в *рекреационной* – Cd > Cr > Cu > Pb. В целом для изученных почв СЗАО г. Москвы приоритетными загрязнителями являются Cu, Cd и Cr. В настоящее время уровень содержания подвижных форм Pb в почвах СЗАО даже в наиболее загрязнённой промышленной зоне более чем в 2 раза ниже, чем в почвах промышленной зоны Восточного административного округа [35].

По экологической опасности суммарного загрязнения подвижными формами ТМ, оцененного величиной  $Z_o$ , изученные почвы располагаются в следующий ряд: почвы *промышленной и селитебной зон* ( $Z_o = 19,2-19,6$ ) > почвы *транспортной зоны* ( $Z_o = 13,3$ ) > почвы *рекреационной зоны* ( $Z_o = 11,2$ ).

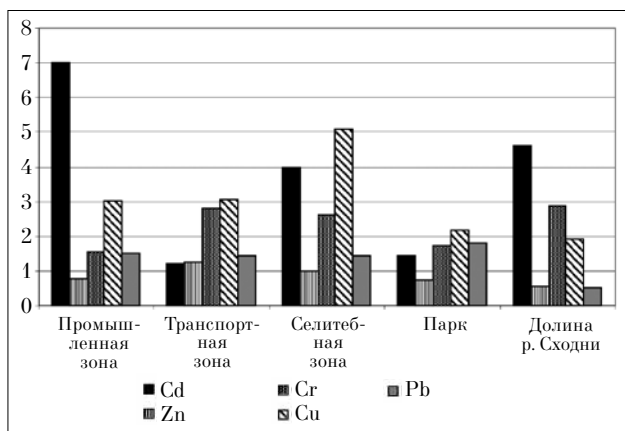


Рис. Коэффициенты экологической опасности подвижных форм тяжёлых металлов в поверхностном слое (0–5 см) почв разных функциональных зон СЗАО г. Москвы

**Особенности активно функционирующей почвенной микробиоты**

Известно, что наибольшим разнообразием отличается микронаселение ненарушенных и слабонарушенных почв. При этом в составе микромицетов преобладают виды с бесцветным мицелием, а среди цианобактерий в микробиоценозах почв таёжной зоны – азотфиксирующие (гетероцистные) виды. Антропогенное воздействие на почву вызывает перестройку сообществ микроскопических организмов, изменение их состава и обилия, что используется при биодиагностике состояния почв в антропогенно преобразованных экосистемах.

Совокупность антропогенных факторов оказывает влияние и на микробиоту городских почв СЗАО (табл. 3).

Почвы *промышленной зоны* характеризуются наиболее бедным составом микроскопических организмов. Микромицеты представлены только видами с окрашенным мицелием, наиболее устойчивыми к действию антропогенных факторов. В то же время в этих почвах наблюдается наибольшее относительное обилие нематод и цианобактерий, представленных безгетероцистными видами, исключительно устойчивыми к подщелачиванию, иссушению почвы, её засолению, загрязнению многими ТМ и вытаптыванию. В почвах *транспортной зоны* разнообразие гетеротрофных организмов несколько возрастает, появляются формы грибов с бесцветным мицелием, что связано с некоторым уменьшением общего уровня антропогенной нагрузки

на почвы. В *селитебной зоне* относительное обилие цианобактерий уменьшается, отмечается равная количественная представленность микромицетов с окрашенным и бесцветным мицелием. Наиболее разнообразен состав микробиоты в *рекреационной зоне*. Преобладают грибы с бесцветным мицелием, появляется мицелий базидиомицетов, что свидетельствует об относительно слабом антропогенном воздействии на почву.

Особенности активно функционирующей микробиоты в почвах СЗАО позволяют их расположить в следующий ряд по степени уменьшения антропогенной нагрузки: почвы *промышленной зоны* > почвы *транспортной зоны* > почвы *селитебной зоны* > почвы *рекреационной зоны*.

Разные компоненты почвенного микробиоценоза по-разному реагируют на комплексное воздействие антропогенных факторов в изучаемом районе. Высокой устойчивостью к ним обладают микромицеты с окрашенным мицелием, что согласуется с имеющимися в литературе данными [36, 37]. Из представителей микрофауны, по результатам нашего исследования, относительно устойчивы к антропогенным изменениям городских почв нематоды. Это подтверждается их обнаружением в моховых консорциях на крышах домов в наиболее загрязнённой части г. Кирова [38].

Наибольшее относительное обилие весной во всех почвах СЗАО г. Москвы имеют водоросли (табл. 3), составляющие вместе с цианобактериями фототрофный блок микробного сообщества.

Таблица 3

Состав и относительное обилие микробиоты в поверхностном (0–5 см) слое почв разных функциональных зон СЗАО г. Москвы

Компоненты микробиоты	Функциональные зоны			
	Промышленная	Транспортная	Селитебная	Рекреационная
Водоросли	+++	++	+++	+++
Цианобактерии	+	+	•	•
Мицелий грибов:				
– бесцветный	–	•	•	+
– окрашенный	•	+	•	•
Нано- и микрофауна:				
– амёбы голые	–	•	–	•
– амёбы раковинные	•	•	•	+
– нематоды	+	•	•	•
– коловратки	–	–	–	+

Примечание: относительное обилие: • единично, + мало, ++ довольно много, +++ много, – отсутствуют.

Таблица 4

Состав альго-цианобактериальных сообществ в поверхностном (0-5 см) слое почв разных функциональных зон СЗАО г. Москвы (в числителе – число видов, в знаменателе – % от общего числа видов)

Компоненты альго-цианобактериальных сообществ	Функциональные зоны			
	Промышленная	Транспортная	Селитебная	Рекреационная (парк+долина)
Водоросли:				
–диатомовые	$\frac{8}{53,3}$	$\frac{21}{50,0}$	$\frac{15}{38,4}$	$\frac{23}{50,0}$
–зелёные	$\frac{3}{20,0}$	$\frac{13}{30,9}$	$\frac{11}{28,2}$	$\frac{13}{28,3}$
–жёлтозелёные	$\frac{1}{6,7}$	$\frac{2}{4,8}$	$\frac{9}{23,1}$	$\frac{9}{19,6}$
Цианобактерии	$\frac{3}{20,0}$	$\frac{6}{14,3}$	$\frac{4}{10,3}$	$\frac{1}{2,1}$
Всего	$\frac{15}{100,0}$	$\frac{42}{100,0}$	$\frac{39}{100,0}$	$\frac{46}{100,0}$

Таблица 5

Доминирующие виды водорослей в альго-цианобактериальных сообществах почв разных функциональных зон СЗАО г. Москвы

Виды водорослей	Функциональные зоны			
	Промышленная	Транспортная	Селитебная	Рекреационная
Диатомовые				
<i>Achnanthes lanceolata</i>	–	+	–	+
<i>Navicula atomus</i>	–	–	+	–
<i>Navicula minima</i>	–	–	+	+
<i>Pinnularia lagerstedtii</i>	–	+	+	–
<i>Caloneis bacillum</i>	–	–	–	+
<i>Amphora sp.</i>	–	–	–	+
<i>Nitzschia pusilla</i>	+	+	+	–
Зелёные				
<i>Chlorococcum sp.</i>	–	–	–	+
<i>Pseudococcomyxa simplex</i>	–	–	+	+
<i>Stichococcus minor</i>	–	–	–	+
Жёлтозелёные				
<i>Heterothrix bristoliana</i>	–	–	–	+
Всего	1	3	5	8

Примечание: – водоросли отсутствуют.

**Особенности альго-цианобактериальных сообществ.**

При отсутствии сомкнутого травяного покрова в условиях невысокой температуры и, напротив, высокой влажности почвы весной во всех функциональных зонах СЗАО наиболее разнообразны диатомовые и зелёные водоросли (табл. 4).

В альго-цианобактериальных сообществах большинства изученных почв СЗАО г. Москвы диатомовые водоросли являются доминантами (табл. 5). Резкое доминирование диатомовых водорослей в почвах транс-

портной и селитебной функциональных зон в составе фототрофов отмечено также в г. Новосибирске [6].

Преобладание диатомовых водорослей весной в альгофлоре наблюдается также в прудах г. Москвы [39] и связывается автором с высокой степенью антропогенной нагрузки на водные объекты.

Показателями «благополучия» альго-цианобактериальных сообществ в почвах таёжной зоны, по данным многочисленных исследований, являются: высокое видовое разнообразие (в том числе жёлтозелёных водо-

рослей), относительно невысокая доля безгетероцистных цианобактерий в составе фототрофов, многовидовой комплекс доминирующих видов, наличие в составе диатомовых водорослей ацидофильных видов (индикаторов кислой среды) и малое разнообразие галофильных видов. Антропогенное воздействие на почвы вызывает перестройку альго-цианобактериальных сообществ. Это сопровождается изменением вышеперечисленных параметров в соответствии с уровнем воздействия, что наблюдается и в почвах СЗАО г. Москвы.

*Промышленная зона* характеризуется наименьшим видовым разнообразием водорослей, особенно жёлтозелёных, и наибольшей долей цианобактерий в альго-цианобактериальных сообществах (табл. 4). Цианобактерии представлены нитчатými безгетероцистными видами из родов *Phormidium* и *Microcoleus*. Доминирует лишь один вид (табл. 5). В комплексе диатомовых водорослей отсутствуют ацидофильные виды, 60% от числа видов составляют алкалофилы, что является следствием подщелачивания почвы. Отсутствуют и галофобные виды, напротив, хорошо представлена группа галофилов (40% от числа видов диатомовых). Это указывает на хроническое антропогенное сезонное засоление почвы.

В *транспортной зоне* общее видовое разнообразие альго-цианобактериальных сообществ существенно возрастает, в основном за счёт диатомовых и зелёных водорослей, при этом доля цианобактерий уменьшается, что свидетельствует о некотором уменьшении общей антропогенной нагрузки на почву. Увеличивается число доминирующих видов (табл. 5). В составе диатомовых водорослей по-прежнему отсутствуют ацидофильные виды. Однако доля алкалофильных и галофильных видов уменьшается (соответственно до 40 и 25%).

В почвах *селитебной зоны* сохраняется высокое видовое разнообразие альго-цианобактериальных сообществ, но существенно изменяется их структура: резко увеличивается доля жёлтозелёных водорослей, ещё больше сокращается доля цианобактерий. Число доминирующих видов возрастает (табл. 5). В составе диатомовых водорослей появляются ацидофильные виды (10% от общего их числа), доля алкалофилов уменьшается до 30%. Галофильные виды составляют 18% от числа видов диатомовых. Состав и структура альго-цианобактериальных сообществ

отражают снижение уровня общего антропогенного воздействия на почву.

Альго-цианобактериальные сообщества почв *рекреационной зоны* отличаются наибольшим видовым разнообразием и наименьшей представленностью цианобактерий. Последнее обусловлено как природными факторами – слабокислой реакцией почвы и наличием опада на поверхности почв в парке, так и антропогенными – уменьшением загрязнения почв подвижными формами ТМ. В альго-цианобактериальных сообществах парка преобладают мелкие зелёные и жёлтозелёные водоросли, что характерно для лесных дерново-подзолистых почв [40]. В комплексе диатомовых водорослей в почвах парка доля алкалофильных видов снижается до 25%, галофильные виды составляют 20%. Это отражает уменьшение интенсивности подщелачивания почв в парке при сохранении того же уровня воздействия сезонного засоления, который наблюдается в почвах селитебной зоны.

Анализ данных о числе видов диатомовых в зависимости от почвенных показателей показал, что они наиболее чувствительны к реакции среды. Число видов диатомовых при  $pH > 6,75$  почти в 2 раза выше, чем в слабокислой среде. В этом диапазоне pH диатомовые реагируют на загрязнение ТМ: если суммарное превышение ПДК по всем изученным 5 элементам превышает 11 единиц, их видовое разнообразие снижается в 1,4 раза. При  $pH < 6,75$  видовое разнообразие диатомовых зависит от концентрации подвижной меди: при её содержании  $< 9,0$  мг/кг оно снижается в 1,6 раза, при этом минимальные значения наблюдаются в слабокислой среде.

Таким образом, по степени трансформации альго-цианобактериальных сообществ функциональные зоны СЗАО г. Москвы располагаются в следующий ряд: *промышленная > транспортная > селитебная > рекреационная*.

Сопоставление результатов физико-химических и биологических исследований почв в СЗАО г. Москвы показывает, что они дополняют друг друга и необходимы для оценки экологического состояния почв в условиях города. Физико-химические методы дают представление об основных направлениях антропогенного изменения свойств почв и уровнях их загрязнения, однако при высокой пространственной и временной вариабельности щелочно-кислотных условий, содержания водорастворимых солей, минеральных форм

азота и подвижных форм ТМ, они не позволили надёжно оценить экологические последствия этих изменений в разных функциональных зонах СЗАО. Привлечение сведений о состоянии почвенной микробиоты, составе и структуре альго-цианобактериальных сообществ дало возможность выявить интенсивность их антропогенного подщелачивания и сезонного засоления и определить степень антропогенного изменения всей совокупности свойств почв.

С учётом комплекса физико-химических и биологических показателей изученные почвы располагаются в следующий ряд по степени их техногенной трансформации: почвы *промышленной зоны* > почвы *транспортной зоны* > почвы *селитебной зоны* > почвы *рекреационной зоны*.

## Выводы

1. Все изученные почвы СЗАО г. Москвы характеризуются изменением физико-химических свойств и загрязнением ТМ. Для почв СЗАО приоритетными загрязнителями являются Cu, Cd и Cr. Суммарная степень загрязнения подвижными формами ТМ наибольшая в промышленной и селитебной зонах ( $Z_0 = 19,2-19,6$ ), наименьшая – в рекреационной ( $Z_0 = 11,2$ ).

2. Техногенная нагрузка вызывает изменение состава и относительного обилия активно функционирующей почвенной микробиоты, хорошо выраженное в почвах промышленной зоны и слабо проявляющееся в рекреационной. Наиболее устойчивы к антропогенному воздействию микромицеты с окрашенным мицелием, нематоды, безгетероцистные цианобактерии и некоторые водоросли.

3. Весной в альго-цианобактериальных сообществах всех изученных почв преобладают диатомовые и зелёные водоросли. Разнообразие и структура альго-цианобактериальных сообществ существенно различаются в почвах разных функциональных зон города, отражая разные уровни интегрального антропогенного воздействия на почву. Для альго-цианобактериальных сообществ всех изученных почв характерно присутствие галофильных и существенная роль алкалофильных видов водорослей, что свидетельствует об их хроническом сезонном засолении противогололёдными реагентами и подщелачивании.

4. Полученные результаты позволяют расположить функциональные зоны города по степени техногенной трансформации со-

обществ почвенной микробиоты (в порядке её уменьшения) следующим образом: промышленная зона > транспортная зона > селитебная зона > рекреационная зона.

*Полевые и лабораторные исследования выполнены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Русского географического общества (проект № 13-05-41191-РГО), анализ и интерпретация данных финансировались Российским научным фондом (грант № 14-27-00083).*

## Литература

1. Герасимова М.И., Строганова М.Н., Можарова Н.В., Прокофьева Т.В. Антропогенные почвы: генезис, география, рекультивация. Учебное пособие / Под ред. Г.В. Добровольского. Смоленск: Ойкумена, 2003. 268 с.
2. Юзефович А.М., Кошелева Н.Е. Загрязнение почв селитебной зоны Москвы и его связь с природными и антропогенными факторами // Теоретическая и прикладная экология. 2009. № 3. С. 35–42.
3. Марфенина О.Е. Антропогенные изменения комплексов микроскопических грибов в почвах: Автореф. дисс... докт. биол. наук. М. 1999. 49 с.
4. Лысак Л.В., Сидоренко Н.Н., Марфенина О.Е., Звягинцев Д.Г. Микробные комплексы городских почв // Почвоведение. 2000. № 1. С. 80–85.
5. Лысак Л.В. Бактериальные сообщества городских почв: Дисс.... докт. биол. наук. МГУ им. М.В. Ломоносова, факультет почвоведения. М. 2010. 350 с.
6. Артамонова В.С., Бортникова С.Б., Ившина И.Б., Каменских Т.Н., Смирнова Н.В., Шапорина Н.А. Микробные комплексы почв урбанизированных территорий // Сибирский экологический журнал. 2007. № 5. С. 797–808.
7. Особенности урбоэкосистемподзоны южной тайги Европейского Северо-Востока / Под ред. Т.Я. Ашихминой, Л.И. Домрачевой. Киров: Изд-во ВятГГУ, 2012. 282 с.
8. Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Экология почв. Учение об экологических функциях почв. М.: Изд-во МГУ, 2012. 413 с.
9. Терехова В.А., Ашихмина Т.Я. Биодиагностика в экологической оценке почв и сопредельных сред // Теоретическая и прикладная экология. 2013. № 1. С. 107–108.
10. Яковлев А.С. Биологическая диагностика целинных и антропогенно измененных почв: Дисс.... докт. биол. наук. МГУ им. М.В. Ломоносова, факультет почвоведения. М. 1997. 335 с.
11. Попутников В.О. Тенденции антропогенной трансформации автоморфных почв территорий городских парков и прилегающих жилых кварталов: Дисс. ... канд. биол. наук. МГУ им. М. В. Ломоносова, факультет почвоведения. М. 2011. 148 с.



12. Прокофьева Т.В., Мартыненко И.А., Попутников В.О. Трансформация почв рекреационных территорий г. Москвы // Лесные экосистемы и урбанизация. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2008. С. 125–151.
13. Раппопорт А.В., Лысак Л.В., Марфенина О.Е., Рахлеева А.А., Строганова М.Н., Терехова В.А., Митрофанова Н.В. Актуальность проведения почвенно-экологических исследований в ботанических садах (на примере Москвы и Санкт-Петербурга) // Бюл. Моск. о-ва испытателей природы. Отд. Биол. 2013. Т. 118. Вып. 5. С. 45–56.
14. Обухов А.И., Лепнева О.М. Экологические последствия применения противогололёдных соединений на городских автомагистралях и меры по их устранению // Экологические исследования в Москве и Московской области: Мат-лы науч.-практ. конф. М. 1990. С. 197–202.
15. Николаев Л.Ф., Оцхели О.В., Поршалаева Е.Б. и др. Противогололёдные реагенты и их влияние на природную среду. М.: Диалог-МГУ, 1998. 60 с.
16. Черноусенко Г.И., Ямнова И.А., Скрипникова М.Н. Антропогенное засоление почв Москвы // Почвоведение. 2003. № 1. С. 97–105.
17. Систер В.Г., Корецкий В.Е. Инженерно-экологическая защита водной системы северного мегаполиса в зимний период. М.: Центр МГУИЭ, 2004. 159 с.
18. Никифорова Е.М., Касимов Н.С., Кошелева Н.Е. Многолетняя динамика антропогенного засоления почв Москвы (на примере Восточного округа) // Почвоведение. 2014. № 3. С. 351–363.
19. Смагин А.В., Азовцева Н.А., Смагина М.В., Степанов А.Л., Мягкова А.Д., Курбатова А.С. Некоторые критерии и методы оценки экологического состояния почв в связи с озеленением городских территорий // Почвоведение. 2006. № 5. С. 603–615.
20. Экологический атлас Москвы / Под ред. Ишкова А.Г. и др. М.: ГУП НИиПИ Генплана г. Москвы, 2000. 96 с.
21. Большой атлас Москвы. М.: Феория, 2013. 1000 с.
22. ГОСТ 26489-85. Почвы. Определение обменного аммония по методу ЦИНАО. М., 1986. 5 с.
23. Теория и практика химического анализа почв / Под ред. Л.А. Воробьёвой. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
24. Ермаченко Л.А., Ермаченко В.М. Атомно-абсорбционный анализ с графитовой печью: Методич. пособие для практического использования в санитарно-гигиенических исследованиях / Под ред. Л.Г. Подуновой. М.: ПАИМС, 1999. 220 с.
25. Прикладная геохимия. Экологическая геохимия Москвы и Подмосковья. Вып. 6. М.: ИМГРЭ, 2004. 326 с.
26. Предельно допустимые концентрации химических веществ в почве (ПДК). М.: МЗ СССР, 1985. 31 с.
27. Черных Н.А., Овчаренко М.М. Тяжёлые металлы и радионуклиды в биогеоценозах. М.: Агроконсалт, 2002. 200 с.
28. Обобщённые перечни предельнодопустимых концентраций вредных веществ в почве. Прил. 1 и Прил. 2 к письму ЦСИГоскомприроды РСФСР от 18.12.90 № ЦС-299/15-73. М.: ЦСИГоскомнедра, 1990.
29. Кошелева Н.Е., Власов Д.В., Касимов Н.С. Факторы накопления тяжёлых металлов и металлоидов на геохимических барьерах в городских почвах // Почвоведение. 2015. № 5. С. 536–553.
30. Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы. СанПиН 2.1.7.1287-03. М.: Минздрав РФ, 2003. 18 с.
31. Голлербах М.М., Штина Э.А. Почвенные водоросли. Л.: Наука, 1969. 228 с.
32. Bishoff H.W., Bold H.C. Some soil algae from Enchanted Rock and related algae species // Univ. Texas Publ. 1963. № 6318. P. 43–59.
33. Костиков И.Ю. Почвенные водоросли Лазовского заповедника (Дальний Восток, Россия) // Альгология. 1993. Т. 3. № 1. С. 42–50.
34. Баринаева С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: PiliesStudio, 2006. 498 с.
35. Никифорова Е.М., Касимов Н.С., Кошелева Н.Е., Новикова О.В. Пространственно-временные тренды загрязнения городских почв и растений соединениями свинца (на примере Восточного округа Москвы) // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2010. № 1. С. 11–20.
36. Марфенина О.Е. Нарушение эколого-географической зональности комплексов микроскопических грибов в почвах при антропогенных воздействиях // Перспективы развития почвенной биологии: Труды Всерос. конф. М. 2001. С. 79–93.
37. Широких А.А. Грибы в урбоэкосистемах // Особенности урбоэкосистем подзоны южной тайги Европейского Северо-Востока / Под ред. Т.Я. Ашихминой, Л.И. Домрачевой. Киров: Изд-во ВятГГУ, 2012. С. 104–120.
38. Целищева Л.Г., Пестов С.В., Ходырев Н.Н. Зооценозы городских территорий // Особенности урбоэкосистем подзоны южной тайги Европейского Северо-Востока / Под ред. Т.Я. Ашихминой, Л.И. Домрачевой. Киров: Изд-во ВятГГУ, 2012. С. 46–67.
39. Романова О.Л. Диатомовые водоросли искусственных водоемов г. Москвы // Морфология, систематика, онтогенез, экология и биогеография диатомовых водорослей: Сб. тез. IX школы диатомологов России и стран СНГ. Борок, 2005. С. 54–55.
40. Алексахина Т.И., Штина Э.А. Почвенные водоросли лесных биогеоценозов. М.: Наука, 1984. 149 с.