ПОЧВОВЕДЕНИЕ, 2017, № 1, с. 93–104

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.48

МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА АНТРОПОГЕННОЙ СОЛОНЦЕВАТОСТИ ПОЧВ ВАО МОСКВЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРОТИВОГОЛОЛЕДНЫХ РЕАГЕНТОВ

© 2017 г. Е. М. Никифорова, Н. С. Касимов, Н. Е. Кошелева*

МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы

**e-mail: natalk@mail.ru*

Поступила в редакцию 21.10.2015 г.

Изучена многолетняя динамика антропогенной солонцеватости почв Восточного округа Москвы в связи с применением противогололедных реагентов. Рассмотрен состав реагентов и вносимые объемы, выявлены тренды содержания и особенности распределения катиона натрия в снеговых водах и почвах различных функциональных зон. Составлены карты солонцеватости почвенного покрова округа на 1989, 2005 и 2010 гг. с оценкой его деградации. Выявлено увеличение размеров и контрастности техногенных аномалий обменного натрия в почвах ВАО. За 21-летний период среднее содержание обменного натрия в их поверхностном слое увеличилось с 0.38 до 0.80 смоль(экв)/кг, а степень солонцеватости – с 3.1 до 7.2%. Темпы накопления натрия в ППК в 2005–2010 гг. возросли вдвое по сравнению с 1989–2005 гг.

Ключевые слова: городские почвы, противогололедные реагенты, обменный натрий, антропогенная солонцеватость, динамика, деградация почв, Eutric Albic Retisols, Urbic Technosols, Urbic Technosols

DOI: 10.7868/S0032180X17010105

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее опасным следствием антропогенного засоления почв в связи с применением противогололедных реагентов (**ПГР**) на автомагистралях Москвы является их осолонцевание, обусловленное вхождением обменного натрия в состав почвенного поглощающего комплекса (**ППК**). В результате развития этого процесса происходит более кардинальное, чем при засолении, ухудшение свойств городских почв, нарушение режима их функционирования и уменьшение устойчивости к загрязнению. Несмотря на актуальность проблемы, солонцеватость в почвах северных мегаполисов и крупных промышленных центров, где используют ПГР, остается практически не изученной.

Антропогенные солонцеватые почвы являются одной из своеобразных форм и стадий засоления. Диагностика этих почв в городе, как правило, затруднена из-за несоответствия между повышенным содержанием обменного натрия в составе ППК и слабо выраженными морфологическими признаками солонцеватости в их профиле. В 1980-е гг. почвы Москвы были несолонцеваты [19], но уже в начале 2000-х гг. этот процесс был диагностирован в почвах вблизи ряда автомагистралей по высокому содержанию обменного натрия, которое в поверхностном слое составило до 24–43% от суммы катионов [5, 30, 31]. В Восточном административном округе (**ВАО**) выявлены особенности многолетней и сезонной динамики антропогенного засоления почв в 1989–2010 гг., отмечено увеличение контрастности и размеров техногенных аномалий легкорастворимых солей [17].

Из-за высокой токсичности засоленные почвы отрицательно влияют на состояние зеленых насаждений и часто служат причиной их стресса и гибели [3, 5, 25, 32, 37, 38]. Сильнее других страдают почвы и растения вблизи крупных автомагистралей. Попадая в почвы вместе с тающим снегом, ПГР накапливаются в верхних горизонтах профиля, изменяя минерализацию почвенных растворов, состав обменных катионов, емкость поглощения и другие свойства [17, 27, 31, 43, 44].

Большая концентрация обменного натрия в придорожных почвах вызывает целый комплекс взаимосвязанных явлений: пептизированность ила и коллоидов, высокую растворимость гумусовых веществ, разрушение алюмосиликатов в щелочной среде, что приводит к ухудшению водопроницаемости, уплотнению, нарушению дыхания и газового режима почв, сокращению видового разнообразия почвенной микрофлоры и значительным изменениям структуры микробных сообществ [2, 28, 39, 40, 44]. Другим важным следствием осо-

лонцевания почв является вынос тяжелых металлов, связанных с коллоидами и органическим веществом, в грунтовые воды [34, 35, 41, 42].

Основными средствами, используемыми в мире для удаления снега и льда с городских магистралей и тротуаров, является техническая поваренная соль (твердый хлорид натрия – NaCl), а также песок и мелкий щебень [18, 24, 47]. В городах РФ на техническую соль перешли с 1993 г., так как во многих странах мира она считалась наиболее надежным ПГР. В США и Европе ее применяют в дозировке 30 г/м^2, тогда как в России ее норма составляет до 150 г/м^2, что объясняется более суровыми климатическими условиями. При этом хлоридные реагенты не должны превышать дозу в 20 г/м^2, а реагента Нордвей – в 50 г/м^2 [3]. В США техническая поваренная соль отнесена к наиболее вредным ПГР [46]. Несмотря на это, соль остается основным и наиболее используемым реагентом во многих городах мира, в том числе в Москве [24, 29].

Цель работы – оценка многолетней динамики антропогенной солонцеватости в почвах ВАО Москвы в связи с большими поставками и длительным использованием ПГР на автомагистралях и тротуарах города. В основу статьи положены результаты почвенно-геохимических съемок на территории округа в 1989, 2005, 2010 гг.

Для достижения цели решались следующие задачи:

– определить уровни содержания легкорастворимых солей в снеге, фоновых и городских почвах, а также особенности распределения обменного натрия в почвах с учетом их функционального назначения;

– составить карты солонцеватости почв на территорию округа за отдельные годы наблюдений и выявить многолетние изменения содержания обменного натрия в поверхностном слое почв с расчетом ежегодной скорости его прироста в ППК разных функциональных зон;

– провести зонирование территории ВАО по степени деградации почвенного покрова под воздействием антропогенной солонцеватости.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследовалась южная часть ВАО, включающая 7 муниципальных районов. Территория относится к южно-таежным ландшафтам Подмосковной Мещеры и представляет собой плоскую зандровую равнину на междуречье Москвы и Клязьмы с отметками абсолютных высот 150–160 м, сложенную водно-ледниковыми и древнеаллювиальными отложениями [33].

Почвенный покров округа сильно изменен в результате длительного антропогенного воздействия. Большие площади покрыты асфальтом. Поверхностный слой городских почв, как правило, имеет мощность более 50 см и состоит из загрязненного урбаногенного материала. Почвообразующими породами служат насыпные или перемешанные грунты и культурные наносы. В результате городские почвы, относящиеся к исходно разным зональным типам, имеют близкие свойства [10, 13, 14, 21, 22]. Для их диагностики использовалась систематика почв и почвообразующих пород, разработанная для Москвы [23]. На территории округа широко распространены дерново-урбоподзолистые (Eutric Albic Retisols (Prototechnic)) и урбаноземы (Urbic Technosols), реплантоземы (Urbic Technosols (Transportic)) и экраноземы (Ekranic Technosols).

Засоление и солонцеватость городских почв изучались традиционными методами, используемыми при оценке загрязнения различными поллютантами [8, 10, 16]. Почвенно-геохимические съемки 1989, 2005 и 2010 гг. выполнены с учетом функционального зонирования территории округа [11]. Поскольку тип землепользования определяет объемы применяемых ПГР и накопление солей, наибольшее внимание уделялось почвам вблизи крупных автомагистралей и внутриквартальных дорог. Опробовался поверхностный (0–15 см) слой городских почв, из которого в разные годы в одних и тех же точках отобрано по 50–55 проб. Дополнительно отобраны 10 проб фоновых дерново-подзолистых почв (Albic Retisols) на территории Подмосковной Мещеры, в 45–50 км к востоку от города.

Содержание легкорастворимых солей в фоновых и городских почвах определялось в водной вытяжке (1 : 5) в Эколого-геохимическом центре географического факультета МГУ, а обменных катионов – методом Пфеффера в Испытательном центре Почвенного института им. В.В. Докучаева. Физико-химические и химические свойства почв анализировались общепринятыми методами [20]: активная кислотность (pH) – в водной суспензии на стационарном приборе “Эксперт-pH”, гранулометрический состав – на лазерном микроанализаторе размеров частиц “Analizette 22”.

Обработка почвенно-геохимических данных включала расчет коэффициентов накопления относительно фона: $Kc = C/C_ф$, где C и $C_ф$ – концентрации обменного натрия или других ионов в городских и фоновых образцах снега или почв соответственно. Степень солонцеватости в поверхностном слое почв определялась как доля (%) содержания обменного натрия в сумме обменных катионов. Степень засоления и солонцеватости почв оценивались по классификации [7], степень деградации от солонцеватости – по описанной методике [15]. Статистический анализ данных проводился в программном пакете STATISTICA 8, картографи-

рование осолонцевания городских почв выполнено в пакете ArcGIS 10.

ХАРАКТЕРИСТИКА СОЛЕВОЙ НАГРУЗКИ НА ТЕРРИТОРИЮ МОСКВЫ

В 1994–2000 гг. на дорогах и улицах города ежегодно распределялось не менее 150 тыс. т технической соли, а в 2004–2011 гг. – не менее 232 тыс. т за сезон при средней дозе 42 г/м^2 твердых и 40 г/м^2 жидких реагентов [29], что в 5–6 раз больше рекомендованных норм (рис. 1).

С применением ПГР в воздухе Москвы появились солевые аэрозоли, а практикуемая роторная перевалка снега на объекты озеленения и газоны усилила засоление и деградацию городских почв, привела к загрязнению объектов гидросферы и биосферы. В результате столичный мегаполис впервые оказался в условиях “солевого стресса” [29]. Поэтому в Москве была разработана новая система зимнего содержания дорожных объектов с частичным замещением хлорида натрия экологически менее опасным хлоридом кальция. Эта система несколько лет успешно функционировала в городе, используя в среднем за зимний период 148 тыс. т солей, а затем вновь была разрешена обработка автомагистралей и тротуаров твердым хлоридом натрия в объеме до 429 тыс. т солей с возможным складированием и хранением загрязненного снега в придорожной зоне.

Таким образом, в последние годы количество ПГР, применяемых на территории Москвы, увеличилось более чем в 3 раза. Из-за этого столица вновь вступила в опасный период “солевого стресса”, когда на каждого жителя приходится 37 кг ПГР за сезон [29]. На фоне развития антропогенной галогенизации городских почв существенно вырос экологический риск осолонцевания.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Морфологическое строение профиля и физико-химические свойства городских почв. Городские почвы – это антропогенно-измененные почвы, имеющие поверхностный диагностический органо-минеральный горизонт “урбик” с антропогенными включениями, мощностью до 50 см [4, 22]. В профиле городских почв сочетаются различные по окраске и мощности слои преимущественно искусственного происхождения с резкими переходами и ровной границей между ними, часто встречаются прослои и фрагменты, состоящие из привнесенного и переотложенного материала. Повсеместно отсутствует подстилка. Почвы имеют нейтральные или щелочные значения pH, высокое содержание С орг, элементов питания, обменных катионов и в том числе натрия, они в той

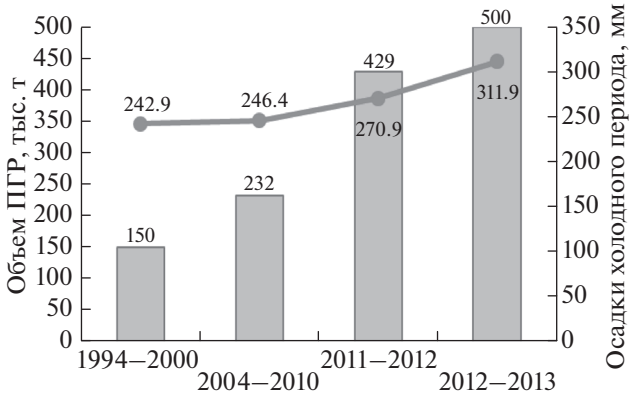

Рис. 1. Динамика средней солевой нагрузки в Москве [28] и сумма осадков за зимний период, по данным метеостанции “Обсерватория МГУ”.

или иной степени засолены легкорастворимыми солями, особенно вблизи крупных автомагистралей [17].

Приведем описание морфологического строения профиля урбанозема супесчаного высокогумусного солончакового сильно солонцеватого, развитого на оглеенных водно-ледниковых отложениях (рис. 2).

Разр. 51. Низкий берег озера, в 80 м западнее внутренней стороны МКАД, в 60 м восточнее улицы Сталеваров, рядом со зданием “Спортбар”. Лесопосадка с редкими деревьями тополя. Изреженный травяной напочвенный покров с доминированием спорыша и рудеральных видов (крапивы двудомной, осота полевого и розового, пырея ползучего).

U1sol, 0–6 см – коричневато-серый, насыпной, органо-минеральный, супесчаный, бесструктурный, рыхлый, сухой, с выраженными белесоватыми выцветами солей хлоридов и сульфатов по граням структурных агрегатов на поверхности почв, слабо переплетен редкими корнями трав, с антропогенными включениями бытового мусора.

U2, 6–14 см – серый, легкосуглинистый, непрочный, порошисто-комковатый, в основной массе бесструктурный, уплотненный, свежий, редкие корни трав, включения бытового и строительного мусора, переход четкий, граница ровная.

Bu1Na, 14–32 см – темно-бурый, среднесуглинистый, крупно глыбистый с небольшой столбчатостью, с выраженными темно-коричневыми кутанами по граням отдельностей, очень плотный, свежий, почти без корней, с редкими антропогенными включениями в верхней части горизонта, переход заметный, граница ровная.

Bu2, 32–65 см – бурый, легкосуглинистый, непрочно глыбистый, менее плотный, чем предыдущий, без кутан, свежий, редкие древесные корни,

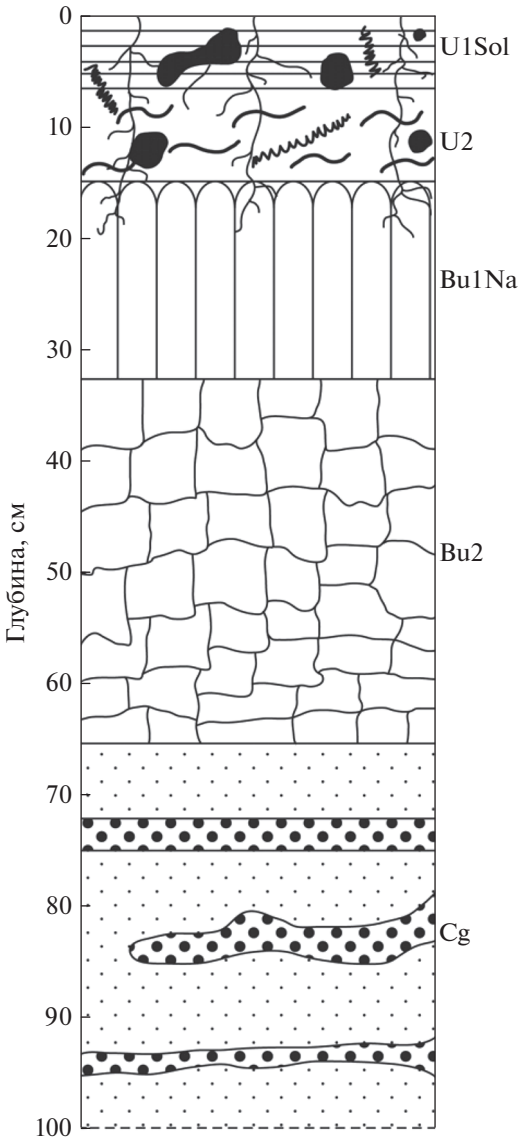

Рис. 2. Морфологическое строение профиля урбанозема супесчаного солончакового сильносолонцеватого на оглеенных водно-ледниковых отложениях ВАО Москвы: U1Sol – насыпной слой с выцветами легкорастворимых солей; U2 – перемешанный горизонт "урбик"; Bu1Na – солонцовый иллювиальный горизонт; Bu2 – подсолонцовый иллювиальный горизонт; Cg – водно-ледниковые оглеенные отложения.

почти без антропогенных включений, переход резкий, граница ровная.

Cg, 65–90 см – грязно-желтый, супесчаный, с линзами крупнозернистого песка, бесструктурный, с мелкими охристыми пятнышками оглеения, рыхлый, влажный, в нижней части сырой, без артефактов, с включениями гальки и гравия из кремня и кварца, диаметром до 3–5 см, ощущается близость верховодки (боковое просачивание и накопление воды на дне разреза).

Основные физико-химические свойства урбаноземов приводятся на рис. 3. Поверхностный слой почвы характеризуется высоким содержанием органического вещества и легкорастворимых солей, повышенной емкостью поглощения, щелочной реакцией, которая изменяется на слабокислую в нижней части профиля. Величина pH, емкость поглощения и содержание обменного натрия имеют сходный характер распределения в профиле, свидетельствуя о текстурной дифференциации по элювиально-иллювиальному типу. Содержание физической глины в солонцовом гор. Bu1Na возрастает в 2–2.5 раза по сравнению с поверхностным слоем и почвообразующей породой, указывая на утяжеление гранулометрического состава и накопление коллоидных частиц.

Развитие солонцового процесса в городских почвах бореальной зоны связано с поступлением катиона натрия из ПГР в снеговые воды, а затем и в почвенные растворы, где он находится в основном в форме простой легкорастворимой соли NaCl. На этапе сезонного рассоления почв в летний период соли вымываются из почвенного профиля, а катион натрия входит в состав ППК, замещая часть обменных катионов кальция и магния. При этом физико-химические условия развития солонцового процесса в почвах определяются сочетанием повышенного содержания обменного натрия на фоне низкой общей концентрации солей в почвенном растворе [28]. Накопление обменного натрия вызывает диспергацию и пептизацию почвенных коллоидов, которые, передвигаясь с растворами под влиянием электролитов солей, коагулируют, образуя иллювиальный солонцовый горизонт [7, 43]. Периодическая смена процессов засоления (зима–весна) и рассоления (лето–осень) почв при положительном балансе солей способствует их прогрессирующему засолению [17]. Критериями для отнесения почв к солонцовым, согласно классификации [36], являются: доля обменного натрия (ESP) в ППК > 15%, удельная электропроводность вытяжки из водонасыщенной пасты (EC_{se}) < 4.0 дСм/м, pH > 8.5. Риск диспергации почвенных коллоидов зависит от сочетания ESP и концентрации солей в водной вытяжке [45].

Химический состав снежного покрова в ВАО Москвы. Загрязнение снега легкорастворимыми солями происходит двумя путями – в результате их выпадения с аэрозолями и пылью из атмосферы и применения ПГР. В итоге снежный покров аккумулирует не только элементы, загрязняющие атмосферу города, но и компоненты ПГР, являясь индикатором общей антропогенной нагрузки на почвы в течение всего холодного периода [1].

Снеговые воды фоновых южно-таежных ландшафтов Подмосковной Мещеры имеют низкую

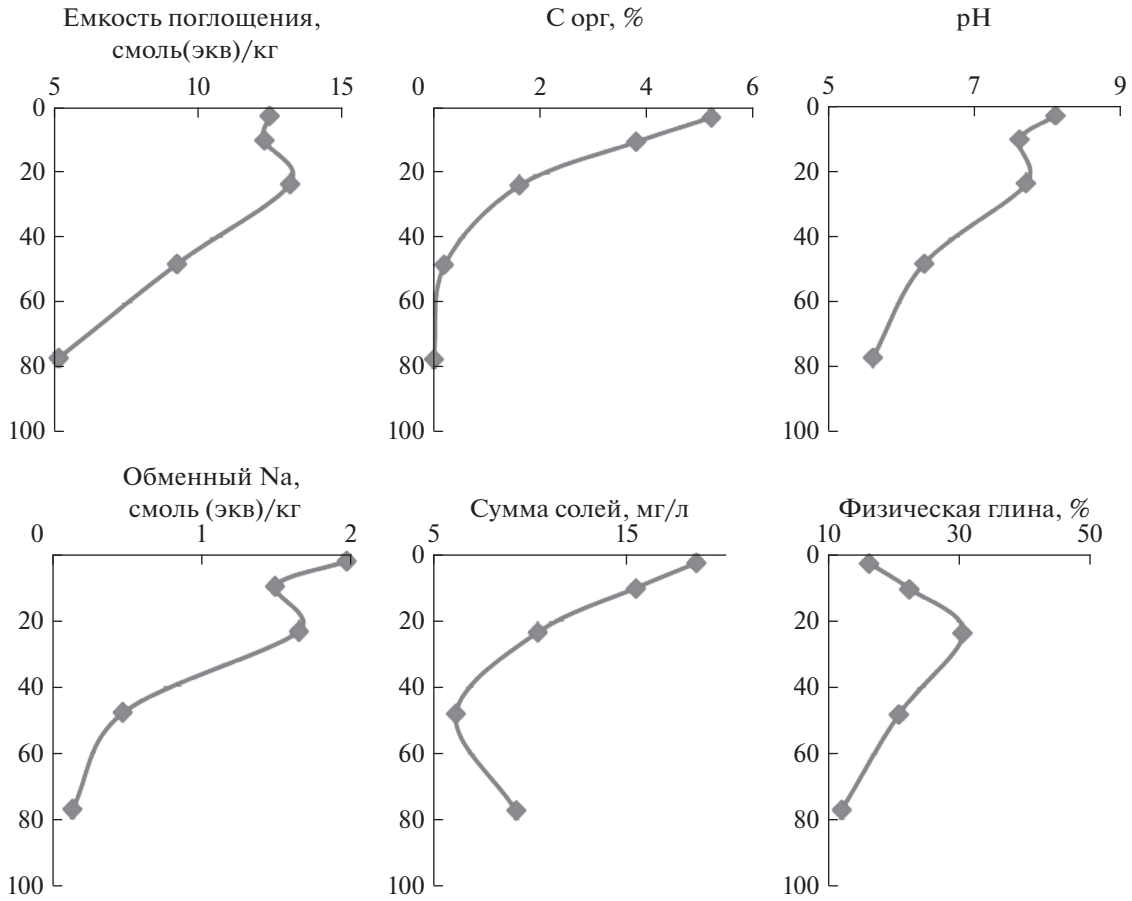

Рис. 3. Основные физико-химические свойства урбанозема супесчаного солончакового сильносолонцеватого на оглеенных водно-ледниковых отложениях.

минерализацию, в среднем равную 9.5 мг/л, и слабокислую реакцию среды (pH 5.6) [17]. По преобладающему ионному составу они относятся к бикарбонатно-кальциевому классу. Среднее содержание хлоридов и ионов натрия в этих водах очень низкое и составляет 1.55 и 0.74 мг/л соответственно.

Значения pH снеговых вод на территории ВАО по данным 2005 и 2010 гг. изменяются в пределах 4.5–7.6 при средних значениях 6.1–6.2. Подщелачивание снежного покрова относительно фоновых территорий составляет 0.5–0.6 единиц. Наиболее высокие значения pH в снеге приурочены к промышленным зонам и автомагистралям. Средняя минерализация талой воды за рассматриваемые годы составляет 16.0 и 19.4 мг/л, что в 1.7 и 2.0 раза больше их фоновых значений. Среднее содержание ионов хлора в снеге увеличилось за 2005–2010 гг. с 2.62 до 8.03 мг/л, а катионов натрия – с 0.89 до 2.84 мг/л, то есть в 3.1–3.2 раза. В 2005 г. в снеговых водах среди анионов доминировали сульфаты (*Кс* 2.0), а среди катионов – кальций (*Кс* 2.1). В 2010 г. в снеговых водах стали преобладать хлориды (*Кс* 5.2), кальций и натрий (*Кс* 2.9 и 3.8). Всего за 5 лет сульфатно-кальциевый состав снеговых вод сменился на хлоридно-кальциевый и хлоридно-натриевый, что обусловлено интенсивным применением антигололедных солей $CaCl_2$ и $NaCl_2$ [29, 47].

Полученные данные по химическому составу снеговых вод ВАО Москвы хорошо согласуются с результатами исследований кислотности и химизма снежного покрова в Москве и Подмосковье в 1999–2006 гг. [6] и в ВАО Москвы в 2009–2010 гг. [9].

Многолетняя динамика солонцеватости почв ВАО Москвы. Большая часть легкорастворимых соединений ПГР при таянии снега поступает в почвы, аккумулируясь в их поверхностном слое. Данные табл. 1 показывают многолетнюю динамику содержания обменных катионов, сумму легкорастворимых солей и плотного остатка, степень солонцеватости и основные свойства поверхностного слоя почв ВАО Москвы за разные годы наблюдений, а также фоновых почв Подмосковной Мещеры.

Фоновые дерново-подзолистые почвы Подмосковной Мещеры характеризуются средним содержанием гумуса – 4.7% и кислой реакцией сре-

Таблица 1. Состав ППК, среднее содержание и свойства поверхностного (0–15 см) слоя фоновых почв и солонцеватых почв ВАО Москвы за разные годы наблюдений

Год	Среднее содержание обменных катионов в ППК, смоль(экв)/кг почвы (коэффициент вариации, %)				Сумма катионов в ППК, смоль(экв)/кг почвы	Степень солонцеватости, %	Сумма легкорастворимых солей, смоль(экв)/кг	Плотный остаток, %	Свойства почв	
	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}					гумус, %	pH H_2O
Фон	6.53 (14.1)	2.37 (19.4)	0.13 (20.0)	0.38 (12.9)	9.41	1.38	0.75	0.03	4.67	4.9
1989	9.81 (30.6)	1.53 (41.2)	0.38 (71.1)	0.33 (48.5)	12.05	3.15	10.2	0.31	5.06	7.2
2005	10.2 (29.4)	1.61 (38.5)	0.63 (81.0)	0.36 (41.7)	12.8	4.92	12.5	0.39	5.84	7.8
2010	8.63 (39.7)	1.30 (49.2)	0.80 (93.4)	0.34 (55.9)	11.07	7.22	15.2	0.48	7.0	7.2

ды – pH 4.9. Они содержат незначительные количества легкорастворимых солей и поглощенных катионов (табл. 1). Отсутствует засоление и солонцеватость: плотный остаток в среднем составляет 0.03%, а обменный натрий – 1.4% от суммы катионов. Содержание обменных катионов в ППК, судя по низким коэффициентам вариации (*Cv* не превышает 20%), довольно однородно.

Городские почвы ВАО Москвы отличаются средним и высоким содержанием гумуса – 5.06–7.00%, нейтральной и слабощелочной реакцией среды и положительной динамикой антропогенного засоления и солонцеватости (табл. 1). За рассматриваемый 21-летний период среднее содержание плотного остатка в поверхностном слое почв увеличилось с 0.31 до 0.48%, то есть в 1.5 раза, обменного натрия – с 0.38 до 0.80 смоль(экв)/кг, степени солонцеватости – с 3.15 до 7.22%, то есть в 2.1–2.3 раза. В 2010 г. сумма легкорастворимых солей превысила фоновый уровень в 20 раз, а степень солонцеватости – в 5 раз.

Согласно классификации засоленных почв [7], антропогенные почвы ВАО по средним показателям их химического состояния в 2010 г. имеют сильную степень засоления и слабую степень солонцеватости. Отдельные функциональные зоны округа довольно сильно различаются по содержанию поглощенных катионов, в том числе обменного натрия и в разные годы наблюдений характеризуются различной степенью солонцеватости почв (табл. 2).

Наиболее высокое содержание обменного натрия установлено в почвах промышленных зон и крупных автомагистралей, причем их солонцеватость увеличилась с 5–6% в 1989 г. до 12–14% от суммы обменных катионов в 2010 г. Стабильно низкие содержания обменного натрия характерны для почв агроландшафтов и усадебной застройки, они относятся к градации несолонцеватых (1–2.5%). Почвы рекреационной зоны за рассматриваемый период также были несолонцеваты (2.2–3.8%).

Пространственную структуру загрязнения обменным натрием почв ВАО в связи с их засолением ПГР отражают карты антропогенной солонцеватости поверхностного слоя за 1989, 2005 и 2010 гг. (рис. 4). Сравнение карт показывает, что со временем размеры и контрастность техногенных аномалий обменного натрия, выраженного в градациях солонцеватости, увеличиваются. Больше других от вносимых реагентов страдают почвы вблизи крупных автомагистралей. Попадая в придорожные почвы вместе с тающим снегом, аккумуляции компонентов ПГР изменяют режим их функционирования и приводят к коренной и часто необратимой трансформации ППК.

На карте 1989 г. значительные площади почв в центральной и восточной частях округа были несолонцеваты (обменный натрий составлял <5% от суммы катионов). Слабая степень солонцеватости (5–10%) почв наблюдалась по обе стороны от крупных автомагистралей на расстоянии до 1000 м и в промышленной зоне на северо-западе округа. В 2005 г. образовавшиеся ранее техногенные аномалии обменного натрия значительно увеличились. Внутри ареалов со слабой солонцеватостью, локализованных в транспортной и промышленной зонах, сформировались ореолы протяженностью до 500–1250 м средней степени солонцеватости (с содержанием обменного натрия до 10–15%).

В 2010 г. наблюдался дальнейший рост техногенных аккумуляций поглощенного натрия в почвах округа. В транспортной и промышленной зонах на северо-западе и на отдельных участках МКАД выявлены аномалии с максимально высокой солонцеватостью почв (10–20% и более от суммы катионов). Почвы со средней солонцеватостью (10–15%) распространены вблизи ш. Эн-

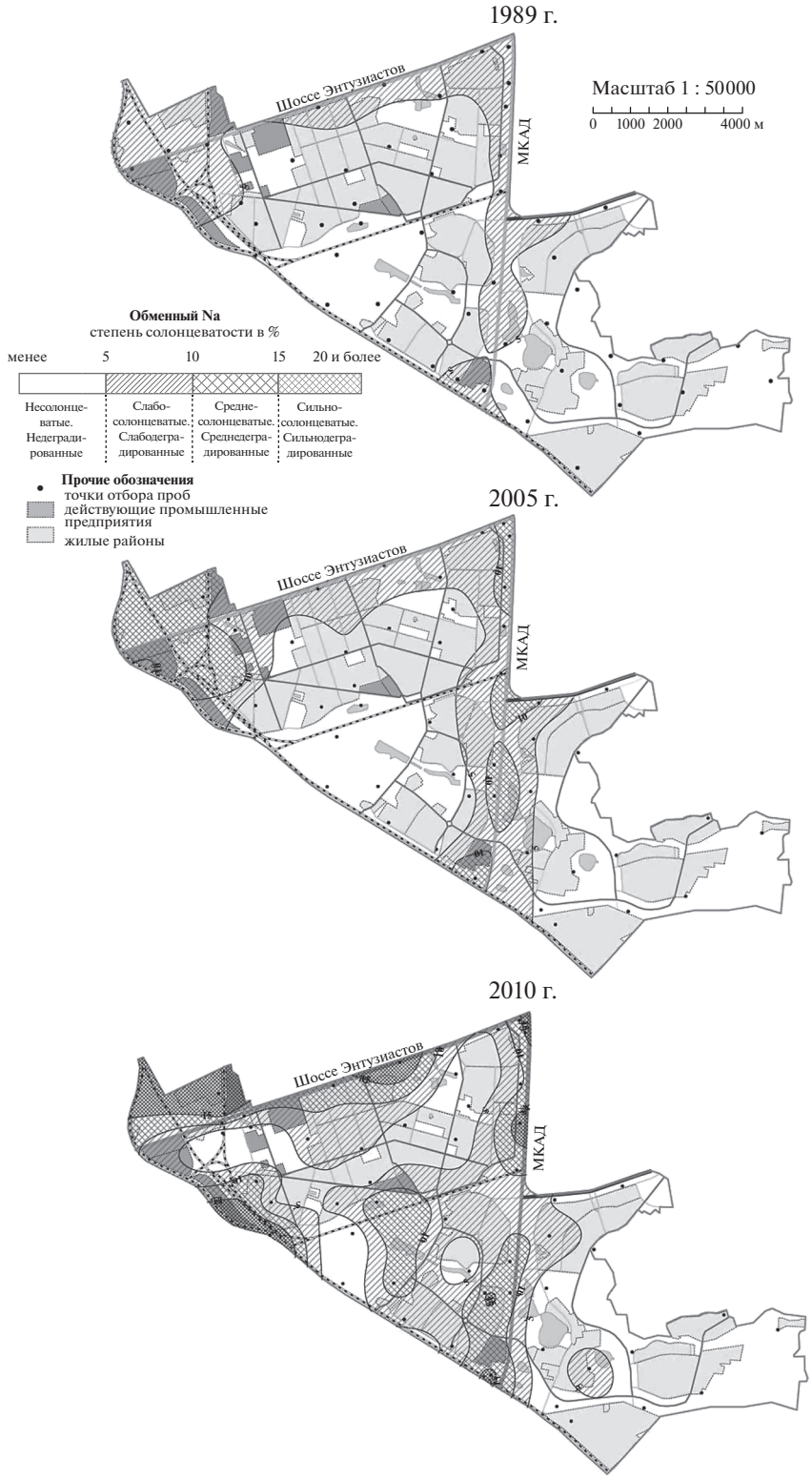

Рис. 4. Техногенные аномалии обменного натрия (по степени антропогенной солонцеватости, %) в поверхностном слое (0–15 см) почв ВАО Москвы, по данным съемок в июле 1989, 2005, 2010 гг.

тузиастов, МКАД и в центре округа. Слабо солонцеватые почвы также существенно расширили свой ареал; несолонцеватые почвы остались лишь на небольших участках в центральной и восточной частях ВАО. Таким образом, за период с 1989 по 2010 г. резко возросла солонцеватость в почвах

Таблица 2. Многолетняя динамика содержания поглощенных катионов и степени солонцеватости в почвах различных функциональных зон ВАО Москвы за разные годы наблюдений

Функциональные зоны (число проб)	Показатель	Обменные катионы в ППК, смоль(экв)/кг почвы				Степень солонцеватости, %
		Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	
1989 г.						
Крупные автомагистрали (10)	среднее	8.09	1.33	0.609	0.308	6.06
	min–max	6.19–10.6	0.92–2.14	0.15–0.81	0.21–0.45	1.21–9.65
Жилая застройка среднеэтажная (13)	среднее	9.17	1.35	0.244	0.379	2.36
	min–max	5.44–15.3	0.43–2.30	0.09–0.86	0.15–0.85	0.69–8.25
Рекреационная (7)	среднее	9.94	1.74	0.323	0.311	2.70
	min–max	5.13–12.6	1.08–3.14	0.15–0.65	0.22–0.55	0.96–5.28
Жилая застройка повышенной этажности (5)	среднее	12.5	1.77	0.31	0.462	2.66
	min–max	7.16–15.4	0.84–2.51	0.14–0.78	0.18–0.96	0.92–8.71
Усадебная застройка (6)	среднее	10.1	1.56	0.183	0.302	1.85
	min–max	3.16–13.8	0.54–2.74	0.14–0.22	0.09–0.46	1.11–4.05
Агроландшафты (4)	среднее	11.3	1.80	0.21	0.272	1.55
	min–max	9.14–12.6	1.19–2.18	0.16–0.30	0.23–0.34	1.23–1.95
Промышленная (7)	среднее	10.3	1.54	0.687	0.284	5.18
	min–max	6.42–16.9	0.90–2.96	0.15–1.18	0.19–0.38	1.84–6.51
2005 г.						
Крупные автомагистрали (10)	среднее	8.28	1.47	1.02	0.34	9.27
	min–max	6.25–11.2	1.0–2.25	0.24–1.41	0.26–0.44	1.83–13.0
Жилая застройка средней этажности (13)	среднее	9.53	1.43	0.37	0.40	3.45
	min–max	5.7–15.9	0.49–2.35	0.16–1.14	0.15–0.88	1.13–10.2
Рекреационная (7)	среднее	10.5	1.78	0.49	0.31	3.85
	min–max	6.07–12.8	1.15–3.20	0.17–1.26	0.24–0.36	1.07–10.1
Жилая застройка повышенной этажности (5)	среднее	12.8	1.88	0.39	0.49	3.19
	min–max	7.21–16.0	1.04–2.64	0.18–0.95	0.20–0.98	1.0–10.1
Усадебная застройка (6)	среднее	11.0	1.68	0.29	0.36	2.56
	min–max	5.26–14.0	0.72–2.81	0.24–0.35	0.16–0.51	1.43–5.39
Агроландшафты (4)	среднее	11.9	1.91	0.26	0.29	1.81
	min–max	9.61–13.6	1.38–2.21	0.18–0.41	0.25–0.35	1.33–2.55
Промышленная (7)	среднее	10.2	1.59	1.34	0.33	9.59
	min–max	6.51–16.1	0.93–2.8	0.25–2.14	0.23–0.43	2.97–13.3
2010 г.						
Крупные автомагистрали (10)	среднее	8.64	1.48	1.51	0.39	12.0
	min–max	0.94–13.8	0.05–2.46	0.33–2.95	0.07–0.77	6.64–20.1
Жилая застройка средней этажности (13)	среднее	9.38	1.48	0.70	0.34	5.99
	min–max	3.52–14.7	0.10–2.89	0.35–1.40	0.14–0.85	2.41–12.2
Рекреационная (7)	среднее	8.27	1.07	0.18	0.41	2.16
	min–max	3.10–12.2	0.12–1.78	0.07–0.42	0.13–0.80	0.86–11.7

Таблица 2. Окончание

Функциональные зоны (число проб)	Показатель	Обменные катионы в ППК, смоль(экв)/кг почвы				Степень солонцеватости, %
		Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	
Жилая застройка повышенной этажности (5)	среднее	6.62	0.92	0.79	0.24	6.22
	min–max	4.19–14.3	0.51–1.72	0.30–1.65	0.18–0.28	2.05–11.1
Усадебная застройка (6)	среднее	8.32	1.22	0.12	0.22	1.03
	min–max	5.24–16.8	0.58–2.91	0.09–0.17	0.12–0.36	0.55–1.7
Агроландшафты (4)	среднее	7.86	1.48	0.09	0.38	1.01
	min–max	6.56–8.58	1.07–1.65	0.05–0.12	0.24–0.57	0.71–1.60
Промышленная (7)	среднее	9.70	1.18	1.40	0.36	14.50
	min–max	5.48–15.5	0.82–1.54	0.11–2.84	0.22–0.55	1.32–22.2

не только транспортной и промышленной, но и селитебной и рекреационной зон в центре округа.

Распространение солонцеватых почв на территории ВАО объясняется широким разносом солей не только путем латеральной миграции засоленных талых вод, но и импульверизацией – ветровым переносом солевой пыли от автомагистралей, являющихся источниками солей в весенне-зимний период. При этом селитебные кварталы и крупные здания служат механическими барьерами для солевых аэрозолей, уменьшая дальность их переноса и тем самым увеличивая их концентрацию в почвах транспортной зоны. Открытые пространства, напротив, способствуют рассеиванию аэрозолей и их более широкому пространственному распространению.

Устойчивость антропогенного засоления и солонцеватости в городских почвах во многом зависит от совместимости техногенных воздействий с современными ландшафтно-геохимическими процессами, действующими на конкретной территории. В почвах южнотаежных ландшафтов, к которым относится ВАО Москвы, антропогенный процесс засоления–солонцеватости почв накладывается на противоположный природный процесс кислого выщелачивания, обусловленного промывным типом водного режима. Поэтому при однократном техногенном воздействии поступающие легкорастворимые соли постепенно вымываются в грунтовые воды. Так, почвы аналогичных таежных ландшафтов после разового воздействия буровых растворов при нефтедобыче очень медленно, но восстанавливали свои свойства: щелочные значения pH в лесных почвах начинали уменьшаться только после 10-летнего срока их реабилитации, а содержание обменного натрия в ППК – спустя 20 лет [26]. Иная картина наблюдается в городских ландшафтах – при ежегодном пополнении запасов солей из ПГР во все возрастающих объемах полного выщелачивания солей из почвенного профиля не происходит, наоборот, отмечается их аккумуляция.

Оценка ежегодного прироста содержания обменного натрия в поглощающем комплексе почв ВАО Москвы. Рассматриваемый 21-летний период наблюдений в целом характеризуется накоплением обменного натрия и усилением солонцеватости в почвах ВАО, однако средняя скорость его ежегодного прироста в поверхностном слое почв разных функциональных зон в 1989–2005 и 2005–2010 гг. заметно различается (табл. 3).

За 1989–2005 гг. средняя скорость ежегодного прироста натрия составила 0.015, а за 2005–2010 – 0.030 смоль(экв)/кг, то есть темпы его накопления в ППК во второй период возросли вдвое, что можно объяснить растущими объемами поступления NaCl с ПГР. По интенсивности прироста содержания обменного натрия в 1989–2005 гг. лидировали почвы промышленной и транспортной зон. В 2005–2010 гг. транспортная зона сохранила свое лидерство, в почвах промышленной и рекреационной зон темпы накопления обменного натрия уменьшились, а в жилой многоэтажной зоне увеличились в 2.5–5 раз. В почвах усадебной зоны и в агроландшафтах с очень низким содержанием обменного натрия прирост фактически отсутствовал. При существующих объемах внесения ПГР в ближайшем будущем можно ожидать дальнейшего усиления осолонцевания почв в ВАО. Концентрации обменного натрия могут достичь столь высоких уровней, что превратят их в солонцы, требующие длительных сроков восстановления.

Оценка деградации почвенного покрова ВАО под воздействием антропогенной солонцеватости. Для выявления и оценки деградированных почв на территории округа использовалась методика определения размеров ущерба от деградации почв и земель [15]. Под деградацией понимается ухудшение состава и свойств почв, приводящих к поте-

Таблица 3. Многолетняя динамика и средняя скорость ежегодного прироста содержания обменного натрия в почвах разных функциональных зон ВАО Москвы

Зоны (число проб)	Показатели	Содержание натрия в ППК, смоль(экв)/кг			Скорость прироста Na^+, смоль(экв)/кг в год	
		1989 г.	2005 г.	2010 г.	1989–2005	2005–2010
Крупные магистрали (10)	среднее	0.609	1.02	1.51	0.0257	0.0306
	min max	0.15–0.81	0.24–1.41	0.33–2.95		
Промышленная (7)	среднее	0.687	1.34	1.40	0.0408	0.0037
	min–max	0.15–1.18	0.25–2.14	0.11–2.84		
Жилая застройка средней этажности (13)	среднее	0.244	0.37	0.70	0.0079	0.0206
	min–max	0.09–0.86	0.16–1.14	0.35–1.40		
Жилая застройка повышенной этажности (5)	среднее	0.31	0.39	0.79	0.0050	0.0250
	min–max	0.14–0.78	0.18–0.95	0.30–1.65		
Усадебная застройка (6)	среднее	0.183	0.29	0.12	0.0067	–0.0106
	min–max	0.14–0.22	0.24–0.35	0.09–0.17		
Рекреационная (7)	среднее	0.323	0.49	0.18	0.0104	–0.0194
	min–max	0.15–0.65	0.17–1.26	0.07–0.42		
Агроландшафты (4)	среднее	0.21	0.26	0.09	0.0031	–0.0106
	min–max	0.16–0.30	0.18–0.41	0.05–0.12		
Округ в целом (52)	среднее	0.381	0.626	0.775	0.0153	0.0298
	min–max	0.09–1.18	0.16–2.14	0.05–2.95		

рям их природно-хозяйственной значимости. Среди основных типов деградации почв в данной методике особо выделяется осолонцевание, представляющее собой приобретение почвой специфических свойств при вхождении ионов натрия в ППК. По уровню содержания обменного натрия и соответствующей ему солонцеватости городских почв (менее 5; 5–10; 10–15; 15–20% от емкости катионного обмена) выделены следующие степени их деградации: недеградированные (ненарушенные), слабо-, средне- и сильнодеградированные. Они были использованы при составлении карт техногенных аномалий обменного натрия в поверхностном горизонте почв ВАО и отражены в их легенде (рис. 4).

Ретроспективный анализ карт выявил прогрессирующую деградацию городских почв. В 1989 г. слабодеградированные почвы были свойственны только участкам вблизи крупных автомагистралей, а также промзонам на северо-западе округа. Они занимали 24.5% площади ВАО. В 2010 г. почвы транспортной и промышленной зон перешли в разряд сильно- и среднедеградированных с общей площадью 22.2%. В центральной части округа наибольшее распространение получили слабодеградированные почвы, занимающие 32% территории. Площадь недеградированных почв сократилась с 75.5% в 1989 г. до 45.8% в 2010 г. Они остались в селитебной зоне южнее ш. Энтузиастов, а также в парке Кусково и на востоке округа за МКАД.

Таким образом, за 2 десятилетия в результате засоления почв ПГР и последующего развития солонцеватости в их профиле произошла деградация почвенного покрова на 54% территории округа, негативно отразившаяся на условиях проживания горожан и произрастании зеленых насаждений. Рассолонцевание почв с улучшением их водно-физических свойств можно добиться лишь путем специальных химических мелиораций [7, 12].

ВЫВОДЫ

1. Засоление снежного и почвенного покровов ВАО Москвы в результате длительного применения больших доз ПГР способствовало развитию в почвах процесса антропогенного осолонцевания. За период 1989–2010 г. среднее содержание обменного натрия в поверхностном слое почв увеличилось с 0.38 до 0.80 смоль(экв)/кг, а степень солонцеватости – с 3.1 до 7.2%. Темпы накопления катиона натрия в ППК в 2005–2010 гг. по сравнению с 1989–2005 гг. возросли вдвое, что вызвано высокими дозами поступления NaCl с ПГР. Кислая реакция почв сменилась нейтральной и слабощелочной, а сумма легкорастворимых солей в их поверхностном слое превысила фон в

20 раз. По средним показателям в 2010 г. почвы ВАО относятся к сильнозасоленным и слабосолонцеватым.

2. Выявлен рост размеров и контрастности техногенных аномалий обменного натрия в почвах округа. В 1989 г. значительные площади почв были не солонцеваты, слабая степень солонцеватости отмечалась в почвах только вблизи крупных автомагистралей и промзон. В 2005 г. появились ореолы со средней степенью солонцеватости, а в 2010 г. – с максимально высокой, приуроченные не только к транспортной и промышленной зонам.

3. Процесс антропогенного осолонцевания привел к деградации почв, охарактеризованной четырьмя уровнями, каждому из которых соответствует свой интервал содержания обменного натрия и степень солонцеватости. Эти градации были использованы при составлении карт техногенных аномалий обменного натрия в поверхностном слое почв, которые отражают масштабы деградации почвенного покрова ВАО. Площадь недеградированных (не солонцеватых) почв в округе сократилась с 75.5% в 1989 г. до 45.8% в 2010 г., а сильнодеградированных (сильносолонцеватых) увеличилась с нуля до 6%.

Благодарность. Полевые и лабораторные исследования выполнены при поддержке Русского географического общества (договор № 07/2014-П1), анализ и интерпретация данных финансировались Российским научным фондом (грант № 14–27–00083).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д.* Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 181 с.
2. *Васильев П.А.* Экологические проблемы, связанные с применением противогололедных реагентов в условиях города // Тез. докл. XV междунар. конф. Ломоносов-8. Секция почвоведение, 8–12 апреля 2008 г. М., 2008.
3. *Герасимов А.О.* Оценка токсичности новых противогололедных средств для высших растений // Экология и промышленность России. Анализ. Методики. Прогнозы. 2013. Март. С. 58–62.
4. *Герасимова М.И., Строганова М.Н., Можарова Н.В., Прокофьева Т.В.* Антропогенные почвы (генезис, география, рекультивация) / Под ред. Г.В. Добровольского. М.: Ойкумена, 2003. 266 с.
5. Государственный доклад о состоянии окружающей природной среды в г. Москве в 2010 г. М., 2011. 135 с.
6. *Еремина И.Д., Григорьев А.В.* Кислотность и химический состав снежного покрова в Москве и Подмосковье за период 1999–2006 гг. // Вест. Моск. ун-та. Сер. география. 2010. № 3. С. 56–60.
7. Засоленные почвы России / Под ред. Л.Л. Шишова, Е.И. Панковой. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2006. 854 с.
8. *Касимов Н.С.* Методология и методика ландшафтно-геохимического анализа городов. Экогеохимия городов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. С. 6–39.
9. *Касимов Н.С., Кошелева Н.Е., Власов Д.В., Терская Е.В.* Геохимия снежного покрова в Восточном округе Москвы // Вестник Моск. ун-та. Сер. география. 2012. № 4. С. 14–25.
10. *Касимов Н.С., Никифорова Е.М.* Геохимия городов и городских ландшафтов. Экология города / Под ред. А.С. Курбатовой и др. М.: Научный мир, 2004. С. 234–268.
11. *Касимов Н.С., Никифорова Е.М., Кошелева Н.Е., Хайбрахманов Т.С.* Геоинформационное ландшафтно-геохимическое картографирование городских территорий (на примере ВАО Москвы). 1. Картографическое обеспечение // Геоинформатика. 2012. № 4. С. 37–45.
12. *Ковда В.А.* Проблемы опустынивания и засоления почв аридных регионов мира / Под ред. Е.И. Панковой, И.П. Айдарова. М.: Наука, 2008. 415 с.
13. *Кошелева Н.Е., Касимов Н.С., Никифорова Е.М.* Современное эколого-геохимическое состояние почв Москвы // Экологические проблемы промышленных городов. Саратов, 2011. Ч. 1. С. 79–85.
14. *Кошелева Н.Е., Никифорова Е.М.* Антропогенная трансформация физико-химических свойств городских почв и ее влияние на накопление свинца // II междунар. научная конф. “Современные проблемы загрязнения почв”. М., 2007. С. 123–127.
15. Методика определения размеров ущерба от деградации почв и земель // Препринт. Упр. охраны почв и земельных ресурсов Минприроды России и упр. мониторинга земель и охраны почв Роскомзема. М., 1994. 13 с.
16. Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве. М.: ИМГРЭ, 2006. 7 с.
17. *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. doi 10.7868/S0032180X1403006X
18. *Николаев Л.Ф., Оцхели О.В., Поршалева Е.Б. и др.* Противогололедные реагенты и их влияние на природную среду. М.: Диалог-МГУ, 1998. 60 с.
19. *Обухов А.И., Лепнева О.М.* Экологические последствия применения противогололедных 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.
20. *Орлов Д.С.* Химия почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1985. 376 с.
21. *Попутников В.О.* Тенденции антропогенной трансформации автоморфных почв территорий городских парков и прилегающих жилых кварталов. Автореф. дис. ... канд. биол. н. М., 2011. 27 с.
22. Почва, город, экология / Под ред. Г.В. Добровольского. М.: Фонд “За экономическую грамотность”, 1997. 320 с.

23. *Прокофьева Т.В., Мартыненко И.А., Иванников Ф.А.* Систематика почв и почвообразующих пород Москвы и возможность их включения в общую классификацию // Почвоведение. 2011. № 5. С. 611–623.

24. *Систер В.Г., Корецкий В.Е.* Инженерно-экологическая защита водной системы северного мегаполиса в зимний период. М.: Центр МГУИЭ, 2004. 159 с.

25. *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.

26. *Солнцева Н.П.* Геохимическая устойчивость природных систем к техногенным нагрузкам (принципы и методы изучения, критерии прогноза) // Добыча полезных ископаемых и геохимия природных экосистем. М.: Наука, 1982. С. 25–32.

27. Состояние зеленых насаждений и городских лесов Москвы. Аналитический доклад. По данным мониторинга 1999 г. М.: Прима-Пресс-М, 2000, 277 с.

28. *Хитров Н.Б.* Физико-химические условия развития солонцового процесса в почвах // Почвоведение. 1995. № 3. С. 298–307.

29. *Хомяков Д.М.* Противогололедные реагенты на объектах дорожного хозяйства Москвы. Опыт прошедшего десятилетия // Дорожная держава. 2013. № 47. С. 92–96.

30. *Черноусенко Г.И., Ямнова И.А., Скрипникова М.И., Борисочкина Т.И.* О засолении и загрязнении почв тяжелыми металлами Юго-Восточного округа Москвы // Доклады РАСХН. 2000. № 1. С. 21–24.

31. *Черноусенко Г.И., Ямнова И.А., Скрипникова М.И.* Антропогенное засоление почв Москвы // Почвоведение. 2003. № 1. С. 97–105.

32. *Шевякова Н.И., Кузнецов В.В., Карпачевский Л.О.* Причины и механизмы гибели зеленых насаждений при действии техногенных факторов городской среды и создание стресс-устойчивых фитоценозов // Лесной вестник. 2009. № 6(15). С. 25–33.

33. Экологический атлас Москвы. М.: АБФ/ABF, 2000. 96 с.

34. *Amrhein C., Strong J.E., Mosher P.A.* Effect of Deicing Salts on Metal and Organic Matter Mobilization in Roadside Soils // Environ. Sci. Technol. 1992. V. 2. P. 703–709.

35. *Bäckström M., Karlsson S., Bäckman L., Folkeson L., Lind B.* Mobilisation of heavy metals by deicing salts in a roadside environment // Water Res. 2004. V. 38. P. 720–732.

36. *Brady C.B., Weil R.R.* The Nature and Properties of Soils. London, Prentice Hall International Editions, 1996. 739 p.

37. *Bryson G.M., Barker A.V.* Sodium accumulation in soils and plants along Massachusetts roadsides // Commun. Soil Sci. Plant Anal. 2002. V. 33(1–2). P. 67–78.

38. *Czerniawska-Kusza I., Kusza G., Duzynski M.* Effect of deicing salts on urban soils and health status of roadside trees in the Opole region // Environ Toxicol. 2004. V. 19(4). P. 296–301.

39. *Joutti A., Schultz E., Pessala P., Nistén T., Hellstén P.* Ecotoxity of Alternative de-Icers // J. Soils & Sediments. 2003. V. 3(4). P. 269–272.

40. *Kim S.-Y., Koretsky C.* Effects of road salt deicers on sediment biogeochemistry // Biogeochemistry. 2013. V. 112(1-3). P. 343–358. doi 10.1007/s10533-012-9728-x

41. *Li F., Zhang Y., Fan Z., Oh K.* Accumulation of De-icing Salts and Its Short-Term Effect on Metal Mobility in Urban Roadside Soils // Bull. of Environmental Contamination and Toxicology. 2015. V. 94(4). P. 525–531. doi 10.1007/s00128-015-1481-0

42. *Nelson S.S., Yonge D.R., Barber M.E.* Effects of road salts on heavy metal mobility in two eastern Washington soils // J. Environ Eng. 2009. V. 135(7). P. 505–510. doi 10.1061//asce/0733-9372/2009

43. *Norrström A.-C., Bergstedt B.* The impact of road de-icing salts (NaCl) on colloid dispersion and base cation pools in roadside soils // Water Air Soil Pollut. 2001. V. 127. P. 281–299.

44. *Ramakrishna D., Viraraghavan T.* Environmental impact of chemical deicers – a review // Water Air Soil Pollut. 2005. V. 166. P. 49–63.

45. *Shainberg I., Letey J.* Response of Soils to Sodic and Saline Conditions // Hilgardia. 1984. V. 52(2). P. 1–57. doi 10.3733/hilg.v52n02p057

46. *Shi X., Fay L., Gallaway C. et al.* Evaluation of alternative anti-icing and deicing compounds using sodium chloride and magnesium chloride as baseline deicers – Phase I. Report No. CDOT-2009-I. Colorado department of transportation. February 2009. 292 p.

47. Интернет-ресурсы: http://www.the-village.ru/village/situation/abroad/111529-vstrechaem-ldom-i-solyu-5-sposobov-izbavitsya-ot-snega