

ГЕОХИМИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ

УДК 631.48

Е.М. Никифорова¹, Н.Е. Кошелева², Т.С. Хайбрахманов³

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОТИВОГОЛОЛЕДНЫХ РЕАГЕНТОВ ДЛЯ ПОЧВ ВОСТОЧНОГО ОКРУГА МОСКВЫ

Изучены экологические последствия многолетнего применения противогололедных реагентов (ПГР) на территории Восточного административного округа (ВАО) Москвы, проявившиеся в антропогенном засолении и осолонцевании почв. Рассмотрен химический состав вносимых реагентов, уровни содержания и особенности распределения легкорастворимых солей и обменных катионов в снеговых водах и почвах зон разного функционального назначения. Причина развития засоления и солонцеватости почв – входящие в состав ПГР смеси солей на основе NaCl и катион натрия, вызывающий диспергацию и пептизацию почвенных коллоидов, которые под влиянием электролитов солей коагулируют, повышая плотность почв. Подщелачивание снежного покрова ВАО характеризуется увеличением pH по сравнению с фоном в среднем на 0,6; средняя минерализация талой воды составляет 19,4 мг/л, что в 2 раза выше фона. По ионному составу снеговые воды относятся к хлоридно-натриевому и хлоридно-кальциевому типам, что объясняется влиянием солей NaCl и CaCl₂, доминирующих в составе ПГР.

Городские почвы, наследуя химический состав снега, приобрели нейтральную реакцию (среднее значение pH 7,2), повышенную в 16–20 раз относительно фона минерализацию (15,2 смоль(экв)/кг) и высокоплотный остаток (0,48%). В составе почвенного раствора преобладают ионы Cl и Na со значениями коэффициента накопления $K_c \approx 100$. По данным за 2010 г. большая часть городских почв имеет среднюю степень засоления и слабую степень солонцеватости. В почвенном покрове сформировались протяженные и контрастные техногенные аномалии солей и обменного Na. Наибольшая степень засоления NaCl и CaCl₂ (до 1,3–1,6% плотного остатка) и солонцеватости (до 12–14,5% от суммы катионов) свойственна почвам в транспортной и промышленной зонах. Карты содержания легкорастворимых солей и обменного натрия в поверхностном слое почв, составленные на территорию ВАО, показали разную степень деградации почвенного покрова в результате развития в них антропогенной солонцеватости. Процессы деградации затронули свыше 50% территории округа. К разряду сильно- и среднедеградированных отнесены почвы вблизи крупных автомагистралей с общей площадью 22,2%. В центре округа распространены слабodeградированные почвы, занимающие 32% территории. Недеградированные почвы с площадью 45,8% сохранились в селитебной зоне южнее ш. Энтузиастов, а также в парке Кусково и на востоке округа за МКАД.

Ключевые слова: городские почвы, противогололедные реагенты, засоление, осолонцевание, техногенные аномалии, Москва.

Введение. Применение противогололедных реагентов (ПГР) на автомагистралях, тротуарах и во дворах жилых кварталов крупных городов и городских агломераций в зимний период приводит к негативным экологическим последствиям, которые затрагивают все компоненты ландшафта [Ramakrishna, Viraraghavan, 2005]. В наибольшей степени страдают почвы, служащие депонирующей средой для многих токсичных соединений, входящих в состав ПГР. Используемые реагенты представляют собой активные вещества, которые отрицательно влияют на химический состав снежного покрова и почв, повреждают городские посадки и приводят к коррозии металлических предметов (мостов, автомобилей, труб), разрушению историчес-

ких памятников и объектов архитектуры, наносят вред здоровью людей.

Наиболее опасное экологическое следствие применения ПГР в Восточном административном округе (ВАО) Москвы – антропогенное засоление почв и их последующее осолонцевание, обусловленное вхождением обменного натрия в состав почвенного поглощающего комплекса (ППК). При этом происходит еще более кардинальное, чем при засолении, ухудшение свойств городских почв с изменением их катионного состава, нарушением режима функционирования и устойчивости к загрязнению. Несмотря на актуальность проблемы, засоление и солонцеватость практически не изучены в почвах северных мегаполисов, крупных промышленных центров и городских агломераций.

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, ст. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: nikiiforova-geo@mail.ru

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, вед. науч. с., докт. геогр. н.; e-mail: nataalk@mail.ru

³Инженерно-технологический центр «Сканэкс», руководитель проектов, канд. геогр. н.; e-mail: haibrahmanov@scanex.ru

Антропогенные солонцеватые почвы – одна из форм и стадий засоления. Их диагностика в городах гумидной зоны затруднена из-за несоответствия между повышенным содержанием обменного натрия в составе ППК и слабо выраженными морфологическими признаками солонцеватости. В 1980-е гг. почвы Москвы были несолонцеваты [Обухов, Лепнева, 1990], но уже в начале 2000-х гг. этот процесс был диагностирован в почвах вблизи крупных автомагистралей, где содержание обменного натрия в поверхностном слое составило 24–43% от суммы катионов [Черноусенко и др., 2003].

Высокая концентрация обменного натрия в придорожных почвах вызывает диспергацию почвенных коллоидов, усиливая их подвижность вместе с органическим веществом и приводя к ухудшению водопроницаемости, увеличению плотности, нарушению дыхания и газового режима, сокращению видового разнообразия почвенной микрофлоры и значительным изменениям структуры микробных сообществ [Norrström, Bergstedt, 2001; Joutti et al., 2003; Kim, Koretsky, 2013]. Другое важное следствие осолонцевания почв – мобилизация тяжелых металлов, связанных с коллоидами и органическим веществом, и их вынос в грунтовые воды [Amrhein et al., 1992; Bäckström et al., 2004; Nelson et al., 2009; Li et al., 2015]. Засоленность и солонцеватость городских почв отрицательно влияют на состояние городских зеленых насаждений и часто служат причиной их стресса и гибели [Смагин и др., 2006; Шевякова и др., 2009; Герасимов, 2013; Bryson, Barker, 2002; Czerniawska-Kusza et al., 2004]. Сильнее других страдают почвы и растения вблизи крупных автомагистралей.

Основные средства, используемые в мире для удаления снега и льда с городских магистралей и тротуаров, представлены технической поваренной солью (твердый хлорид натрия, NaCl), песком и мелким щебнем [Николаев и др., 1998; Систер, Корецкий, 2004]. Наиболее негативно воздействует на почвы техническая поваренная соль. В Москве и городах РФ на соль в качестве ПГР перешли с 1993 г., так как во многих странах она считалась самым надежным средством борьбы с гололедом. В США и Европе ее применяют в дозировке 30 г/м², в России – до 150 г/м², что объясняется более суровыми климатическими условиями [Хомяков, 2013]. Максимальная доза хлоридных реагентов составляет 20 г/м² [Герасимов, 2013]. В США соль отнесена к вредным, токсичным реагентам, однако ее продолжают очень широко использовать во многих городах мира, в том числе в Москве.

В Москве смеси солей на основе хлористого натрия составляют 75–80%, а хлористые кальций, калий и формиат натрия – 25–20% от вносимой массы. Общая разрешенная солевая нагрузка доходит до 420–500 тыс. т за зимний сезон в пересчете на сухое вещество. При среднем соотношении жидких и твердых реагентов 3:1 минимальная солевая нагрузка составляет около 150 тыс. т. В последние годы объем используемых ПГР увеличился более

чем в 3 раза. Учитывая растущее применение ПГР, Москва вступает в опасный период «солевого стресса», когда на каждого жителя приходится 37 кг ПГР за сезон [Хомяков, 2013]. На территории ВАО состав ПГР на 95–96% состоит из технической поваренной соли [Никифорова и др., 2014].

Цель работы – оценить экологические последствия применения ПГР для почв ВАО Москвы, где они используются в течение многих лет во все возрастающем объеме. В основу статьи положены результаты почвенно-геохимической съемки, проведенной на территории округа в июле 2010 г. Для достижения цели решались следующие задачи:

- определение состава и уровня содержания легкорастворимых солей в ПГР, снеговых водах и в поверхностном (0–15 см) слое городских почв;
- выявление особенностей распределения легкорастворимых солей и обменного натрия в почвах фоновых и городских ландшафтов в зависимости от их функционального назначения;
- составление карт антропогенного засоления и солонцеватости почвенного покрова округа и выделение зон с разной степенью деградации почв в результате солонцеватости.

Материалы и методы исследований. Исследована южная часть ВАО, которая относится к южно-таежным ландшафтам Подмосковной Мещеры и представляет собой плоскую задровую равнину в междуречье Москвы и Клязьмы с абсолютными отметками 150–160 м, сложенную водно-ледниковыми и древнеаллювиальными отложениями. Почвенный покров значительно изменен в результате техногенеза и урбанизации, большие площади покрыты асфальтом. Поверхностный слой почв, как правило, состоит из загрязненного материала с включением строительно-бытового мусора и промышленных отходов. Почвообразующими породами служат насыпные грунты и (или) культурные наносы.

Физико-химические и химические свойства городских почв сильно трансформированы и по основным показателям не соответствуют зональным аналогам [Почва..., 1997; Касимов, Никифорова, 2004; Кошелева, Никифорова, 2007; Прокофьева и др., 2011; Кошелева и др., 2011]. Для них характерно подщелачивание верхней части профиля, утяжеление гранулометрического состава, увеличение содержания гумуса и элементов питания, емкости катионного обмена, изменение состава ППК и засоление, которые негативно отражаются на их экологических функциях.

Засоление и солонцеватость почв ВАО изучали путем их геохимического опробования, проводимого на основе функционального зонирования территории [Касимов, 1995; Касимов, Никифорова, 2004; Лабутина, Хайбрахманов, 2010]. Из поверхностного слоя городских почв отобрано 52 пробы и еще 10 фоновых проб – на территории Подмосковной Мещеры, в 45–50 км на восток от города. Карта функциональных зон и транспортной сети ВАО Москвы составлена на основе космических снимков сверхвысокого разрешения (рис. 1).

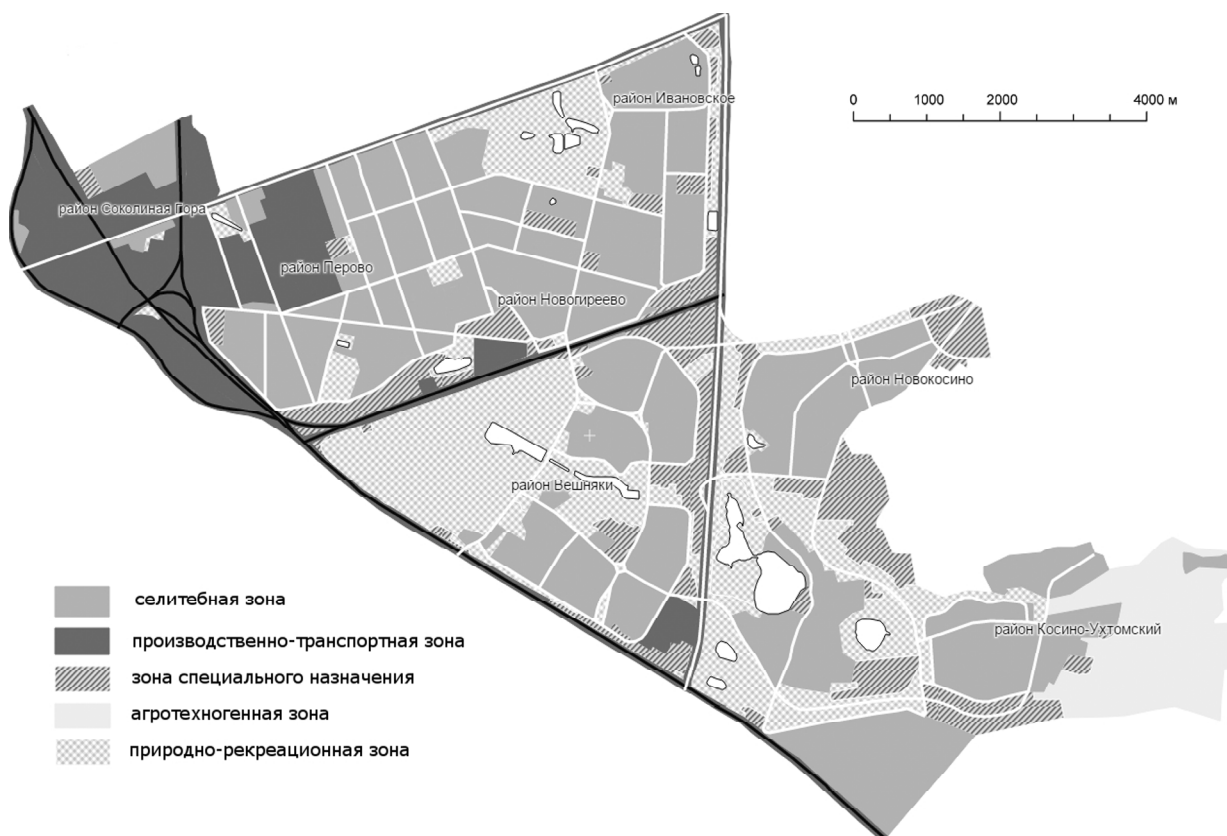


Рис. 1. Функциональные зоны, основная транспортная сеть и муниципальные районы южной части ВАО Москвы

Fig. 1. Land-use zones, the main transport network and municipal regions of the southern part of the Moscow EAD

Содержание легкорастворимых солей в почвах определяли в водной вытяжке (1:5) в Эколого-геохимическом центре географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, обменных катионов – методом Пфейффера в Испытательном центре Почвенного института имени В.В. Докучаева. Актуальную кислотность почв (рН) измеряли в водной суспензии на стационарном приборе «Эксперт-рН», гранулометрический состав – на лазерном микроанализаторе «Analizette 22».

Статистический анализ данных выполнен в программном пакете STATISTICA8, их обработка включала также расчет значений коэффициента накопления (K_c) (относительно фона). Степень солонцеватости почв рассчитывалась, как процент обменного натрия от суммы катионов. Засоление и солонцеватость почв оценивали по классификации [Засоленные..., 2006], степень их деградации – по [Методика..., 1994]. Картографирование содержания обменного натрия в поверхностном слое почв выполнено в пакете ArcGIS10 методом сплайнов.

Результаты исследований и их обсуждение. Химический состав снежного покрова в ВАО Москвы. Снег аккумулирует многие легкорастворимые соли, химические элементы и их соединения, выпадающие из загрязненной атмосферы города, а также вносимые с ПГР (табл. 1).

Снеговые воды фоновых ландшафтов Подмосковной Мещеры имеют кислый состав (рН 5,6) и пониженную минерализацию, в среднем равную

9,5 мг/л. Содержание ионов хлора и натрия в них также очень низкое – 1,55 и 0,74 мг/л соответственно. По преобладающему ионному составу они относятся к сульфатно-хлоридному кальциевому классу.

Снеговые воды городского ландшафта в ВАО характеризуются слабокислой реакцией (рН 6,2) с колебаниями в пределах 4,5–7,6. Подщелачивание снежного покрова относительно фоновых территорий составляет в среднем 0,6 ед. Наиболее высокие значения рН приурочены к промышленным зонам и автомагистралям, что обусловлено интенсивным использованием солевых реагентов. Средняя минерализация талой воды составляет 19,4 мг/л, т.е. в 2 раза выше фона. По ионному составу снеговые воды относятся к хлоридно-натриевому и хлоридно-кальциевому классам, что обусловлено высокими дозами ПГР и преобладанием в их составе солей CaCl_2 и NaCl . Полученные данные о химическом составе снега хорошо согласуются с результатами работ [Еремина, Григорьев, 2010; Касимов и др., 2012].

Засоление почв на территории ВАО. Городские почвы аккумулируют большую часть легкорастворимых соединений из снеговых вод, что приводит к их антропогенному засолению (табл. 2). Фоновые дерново-подзолистые почвы Подмосковной Мещеры, напротив, имеют в среднем кислую реакцию (рН 4,9), среднее содержание гумуса (4,7%), очень низкую минерализацию (0,75 смоль(экв)/кг), преимущественно

Таблица 1

Кислотность (рН), среднее содержание ионов легкорастворимых солей (мг-экв/л) и минерализация снеговых вод (М, мг/л) Подмосковной Мещеры и ВАО Москвы

Показатель	рН	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Fe ³⁺	NH ₄ ⁺	М, мг/л
Подмосковная Мещера, фон (n=5)												
Среднее	5,6	0,030	0,036	0,044	0,022	0,070	0,011	0,032	0,008	0,009	0,017	9,5
ВАО Москвы, весна 2010 г. (n=51)												
Среднее	6,2	0,067	0,044	0,197	0,025	0,168	0,011	0,076	0,014	—	0,003	19,4
Min	4,5	0,001	0,001	0,001	0,001	0,046	0,004	0,008	0,001	—	0,003	3,0
Max	7,6	0,377	0,123	4,51	0,054	1,15	0,025	2,09	0,134	—	0,003	236
K _c	—	2,2	1,2	4,5	1,1	2,4	1,0	2,4	1,8	—	0,2	2,0

Примечание. Здесь и в табл. 2 n – число проб; полужирным шрифтом выделены содержание и значения коэффициента накопления K_c доминирующих ионов. Прочерк – данные отсутствуют.

бикарбонатно-кальциевый состав ионов и небольшой плотный остаток (0,03%), что указывает на отсутствие засоления в их поверхностном слое.

Городские почвы характеризуются близкой к нейтральной реакцией среды (рН 7,2) при колебаниях в диапазоне 6,0–8,5, их подщелачивание относительно фона составляет 2,3 (табл. 2). Им свойственно утяжеление гранулометрического состава и накопление гумуса (до 7,0%). Минерализация почвенного раствора в среднем составляет 15,2 смоль(экв)/кг, что в 20 раз выше фона, а плотный остаток – ≤0,5%, что выше фона в 16 раз. Это соответствует средней степени засоления, которое создают в основном ионы хлора и натрия с концентрацией, почти в 100 раз превышающей фоновый уровень. Наряду с катионом натрия в городских почвах накапливается кальций (K_c=11), входящий в состав смесей в виде CaCl₂. Периодическая смена процессов засоления (зима-весна) и рассоления (лето-осень) при положительном балансе солей в профиле почв способствует их прогрессирующему засолению.

солей занимают большую площадь и отличаются высокой степенью засоления. Процесс антропогенного засоления почв затронул не только придорожные участки вблизи автомагистралей, но распространился практически по всей территории округа, включая районы, расположенные за МКАД. Максимальное содержание солей в почвах отмечено вдоль ш. Энтузиастов и МКАД. Наиболее контрастные аномалии (плотный остаток >1%) сформировались на северо-западе ВАО (районы Соколиная гора и Перово) под влиянием ш. Энтузиастов и промзон, а также на отдельных участках МКАД, образующих полосу шириной 150–200 м. Почвы вблизи крупных автомагистралей засолены настолько сильно, что на их поверхности в засушливые годы появляются выцветы хлоридно-натриевых солей в виде кристаллов галита [Черноусенко и др., 2003]. Аномалии со средней степенью засоления почв (0,4–0,6%) приурочены к автомагистралям и внутриквартальным дорогам. Незасоленные и слабозасоленные почвы (плотный остаток <0,2 и 0,2–0,4% соответственно) занимают небольшие участки в

Таблица 2

Величина рН и среднее содержание легкорастворимых солей (смоль(экв)/кг почвы) в поверхностном (0–15 см) слое почв Подмосковной Мещеры и ВАО Москвы

Показатель	рН	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Сумма ионов	Плотный остаток, %
Подмосковная Мещера, фон (n=5)											
Среднее	4,9	0,18	0,06	0,06	0,08	0,26	0,05	0,04	0,02	0,75	0,03
ВАО, лето 2010 г. (n=52)											
Среднее	7,2	1,72	0,32	5,15	0,42	2,99	0,57	3,97	0,07	15,2	0,48
Min	6,0	0,31	0,08	1,24	0,06	0,49	0,10	0,46	0,002	5,15	0,16
Max	8,5	5,03	1,44	18,2	6,34	10,8	1,83	16,7	0,60	52,5	1,64
K _c	—	9,6	5,3	85,8	5,2	11,5	11,4	99,2	3,5	20,3	16,0

Пространственную структуру загрязнения почв ВАО легкорастворимыми солями отражает карта засоления [Никифорова и др., 2014], выраженного в градациях плотного остатка (рис. 2). Ее анализ показал, что техногенные аномалии легкорастворимых

селитебных и рекреационных зонах – в районах Терлецких озер, Свободного просп., парка Кусково, улиц Юности, Молдагуловой и на востоке округа.

Осолонцевание засоленных почв в ВАО. Развитие процесса осолонцевания в городских почвах

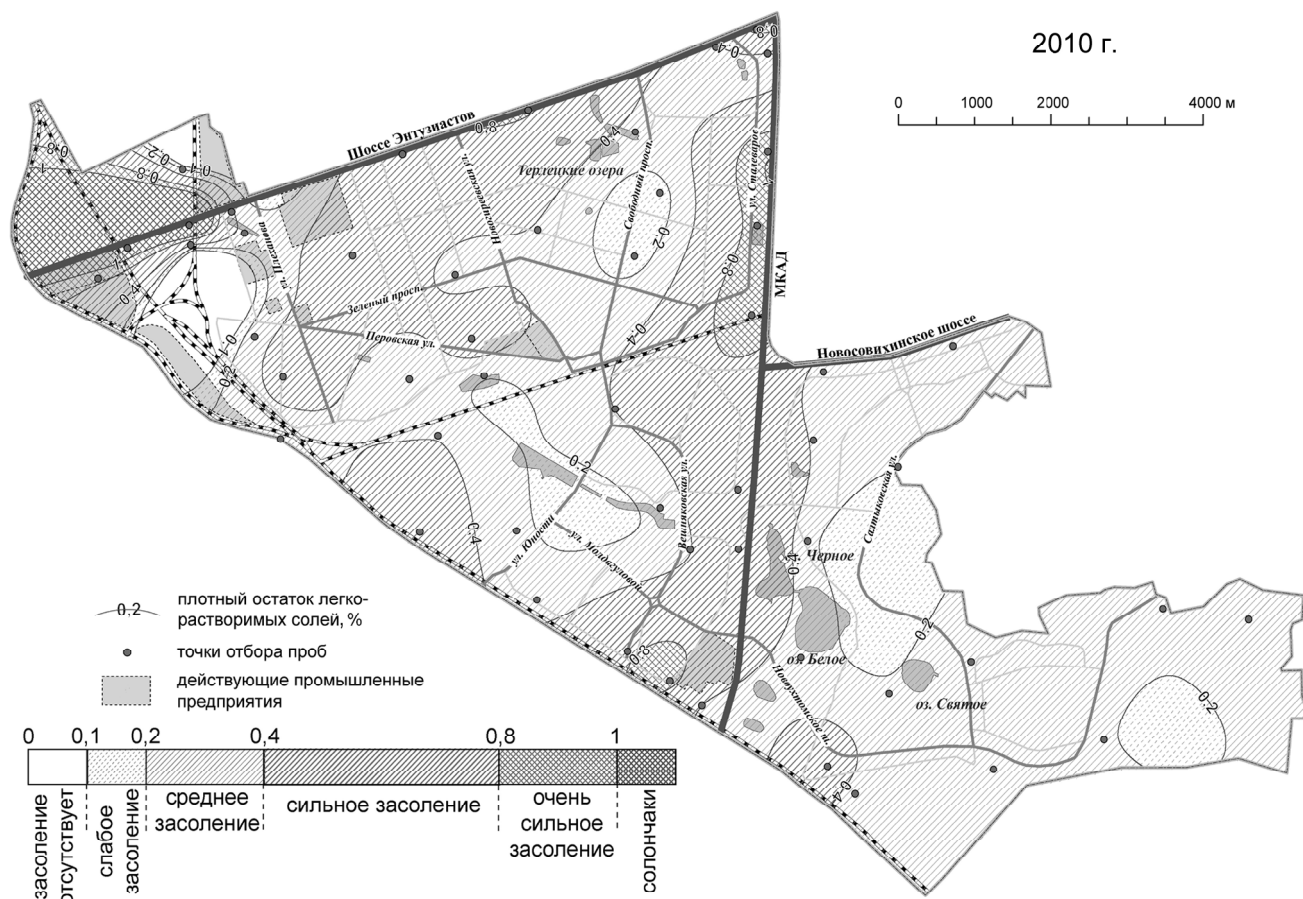


Рис. 2. Техногенные аномалии легкорастворимых солей (по плотному остатку, %) в поверхностном (0–15 см) слое почв БАО Москвы по данным съемки в июле 2010 г.

Fig. 2. Techogenic anomalies of soluble salts (dry residue, %) in the surface (0–15 cm) soil layer, Moscow EAD, July 2010

лесной зоны связано с поступлением иона натрия из ПГР и снега в почвенные воды, где он находится в основном в форме простой легкорастворимой соли NaCl. По мере сезонного рассоления (лето-осень) соли вымываются из профиля почв, а катион натрия входит в состав ППК, замещая часть обменных катионов кальция и магния. Возникновение и развитие солонцового процесса вызывают диспергацию и пептизацию почвенных коллоидов, которые, передвигаясь с растворами под влиянием электролитов солей, коагулируют и образуют иллювиальный солонцовый горизонт. Критериями для отнесения почв

к солонцовым согласно классификации [Brady, Weil, 1996] служат следующие показатели: доля обменного натрия (ESP) в ППК > 15%, емкость поглощения < 4,0 дСм/м и pH > 8,5. Риск диспергации почвенных коллоидов зависит от сочетания ESP и концентрации солей в водной вытяжке [Shainberg, Letey, 1984].

Фоновые дерново-подзолистые почвы Подмосковной Мещеры имеют низкое содержание всех поглощенных катионов в поверхностном горизонте, в том числе обменного натрия (0,13 смоль(экв)/кг, что составляет всего 1,4% от суммы катионов) (табл. 3). Это свидетельствует об отсутствии солонцеватос-

Таблица 3

Состав ППК, среднее содержание (смоль(экв)/кг почвы) и свойства поверхностного (0–15 см) слоя фоновых и городских почв в БАО Москвы

Показатели	Обменные катионы				Сумма катионов	Степень солонцеватости, %	Сумма легко-растворимых солей	Свойства почв	
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺				гумус, %	pH _{вод}
Фоновые почвы Подмосковной Мещеры (n=10)									
Среднее	6,53	2,37	0,13	0,38	9,41	1,38	0,75	4,67	4,9
C _v , %	14,1	19,4	20,0	12,9	16,9	–	–	–	–
Почвы ВАО, 2010 г. (n=52)									
Среднее	8,63	1,30	0,80	0,34	11,07	7,22	15,2	7,0	7,2
C _v , %	39,7	49,2	93,4	55,9	62,9	–	–	–	–

ти в их профиле. Содержание обменных катионов в ППК однородно (значения коэффициента вариации C_v не превышают 20%).

Городские почвы в ВАО имеют положительный тренд антропогенной солонцеватости и характеризуются повышенным содержанием обменных катионов, в том числе поглощенного натрия (табл. 3). Их сумма в поверхностном слое почв в 2010 г. составила 11,07, а обменного натрия – 0,80 смоль(экв)/кг, что в 5 раз выше фона; степень солонцеватости достигла 7,2%. Согласно классификации [Засоленные..., 2006] в целом почвы ВАО можно отнести к средnezасоленным и слабосолонцеватым. При этом почвы в отдельных функциональных зонах по этим показателям отличаются достаточно сильно (табл. 4).

Москвы в связи с их засолением ПГР отражает карта антропогенной солонцеватости за 2010 г. (рис. 3). Карта позволяет проследить изменение антропогенной солонцеватости почв ВАО в зависимости от типа землепользования и источника солей, т.е. дорожной сети. Ее анализ показывает, что больше всего от вносимых реагентов страдают почвы вблизи крупных автомагистралей – ш. Энтузиастов и МКАД. В меньшей концентрации катион натрия присутствует в почвах вдоль внутриквартальных дорог, в жилых кварталах и в рекреационной зоне.

Максимально высокая солонцеватость (≥ 15 –20%) выявлена в почвах в северо-западной части округа (районы Соколиная гора, Перово) и на отдель-

Таблица 4

Содержание обменных катионов и степень солонцеватости в почвах разных функциональных зон ВАО Москвы (данные 2010 г.)

Функциональные зоны (число проб)	Показатели	Обменные катионы в ППК, смоль(экв)/кг почвы				Степень солонцеватости, %
		Ca	Mg	Na	K	
Крупные автомагистрали (10)	1	8,64	1,48	1,51	0,39	12,0
	2	0,94–13,8	0,05–2,46	0,33–2,95	0,07–0,77	6,64–20,14
Промышленная (7)	1	9,70	1,18	1,40	0,36	14,50
	2	5,48–15,5	0,82–1,54	0,11–2,84	0,22–0,55	1,32–22,15
Жилая застройка среднеэтажная (13)	1	9,38	1,48	0,70	0,34	5,99
	2	3,52–14,7	0,10–2,89	0,35–1,40	0,14–0,85	2,41–12,23
Жилая застройка повышенной этажности (5)	1	6,62	0,92	0,79	0,24	6,22
	2	4,19–14,3	0,51–1,72	0,30–1,65	0,18–0,28	2,05–11,07
Рекреационная (7)	1	8,27	1,07	0,18	0,41	2,16
	2	3,10–12,2	0,12–1,78	0,07–0,42	0,13–0,80	0,86–11,67
Усадебная застройка (6)	1	8,32	1,22	0,12	0,22	1,03
	2	5,24–16,8	0,58–2,91	0,09–0,17	0,12–0,36	0,55–1,71
Агроландшафты (4)	1	7,86	1,48	0,09	0,38	1,01
	2	6,56–8,58	1,07–1,65	0,05–0,12	0,24–0,57	0,71–1,60

Примечание. 1 – среднее, 2 – максимальное–минимальное значения.

Максимальное содержание обменного натрия приурочено к почвам промышленных зон и крупных автомагистралей, где солонцеватость (12,0–14,5%) соответствует средней степени. Вблизи МКАД выявлены морфологические признаки солонцеватости в почвенном профиле, проявляющиеся в формировании солонцового горизонта Bu_{1Na} , в котором содержание физической глины возрастает в 2–2,5 раза по сравнению с поверхностным слоем и почвообразующей породой и накапливается обменный натрий. Почвы жилой застройки средней и повышенной этажности слабосолонцеваты (6,0–6,2%). Самое низкое содержание обменного натрия и солонцеватость имеют почвы агроландшафтов, усадебной застройки (~1%) и рекреационной зоны (2,2%), которые отнесены к несолонцеватым.

Пространственную структуру загрязнения обменным натрием поверхностного слоя почв ВАО

на участках вблизи ш. Энтузиастов и МКАД. Большая часть почв транспортной зоны в центре ВАО имеет среднюю степень солонцеватости (10–15%), на небольших площадях встречаются несолонцеватые почвы (<5%), которые приурочены в основном к восточной части ВАО.

Формирование обширных ареалов антропогенно-засоленных и солонцеватых почв в ВАО (рис. 2, 3) объясняется широким разносом солей с латеральными потоками загрязненных снеговых вод и импультверизацией – их ветровым переносом от автомагистралей. При этом важную роль играет тип городской застройки. Так, селитебные кварталы с высокэтажной застройкой служат механическими барьерами для задержания солевых аэрозолей, уменьшая дальность их переноса и тем самым увеличивая аккумуляцию солей вблизи автомагистралей. Открытые пространства, напротив, способствуют

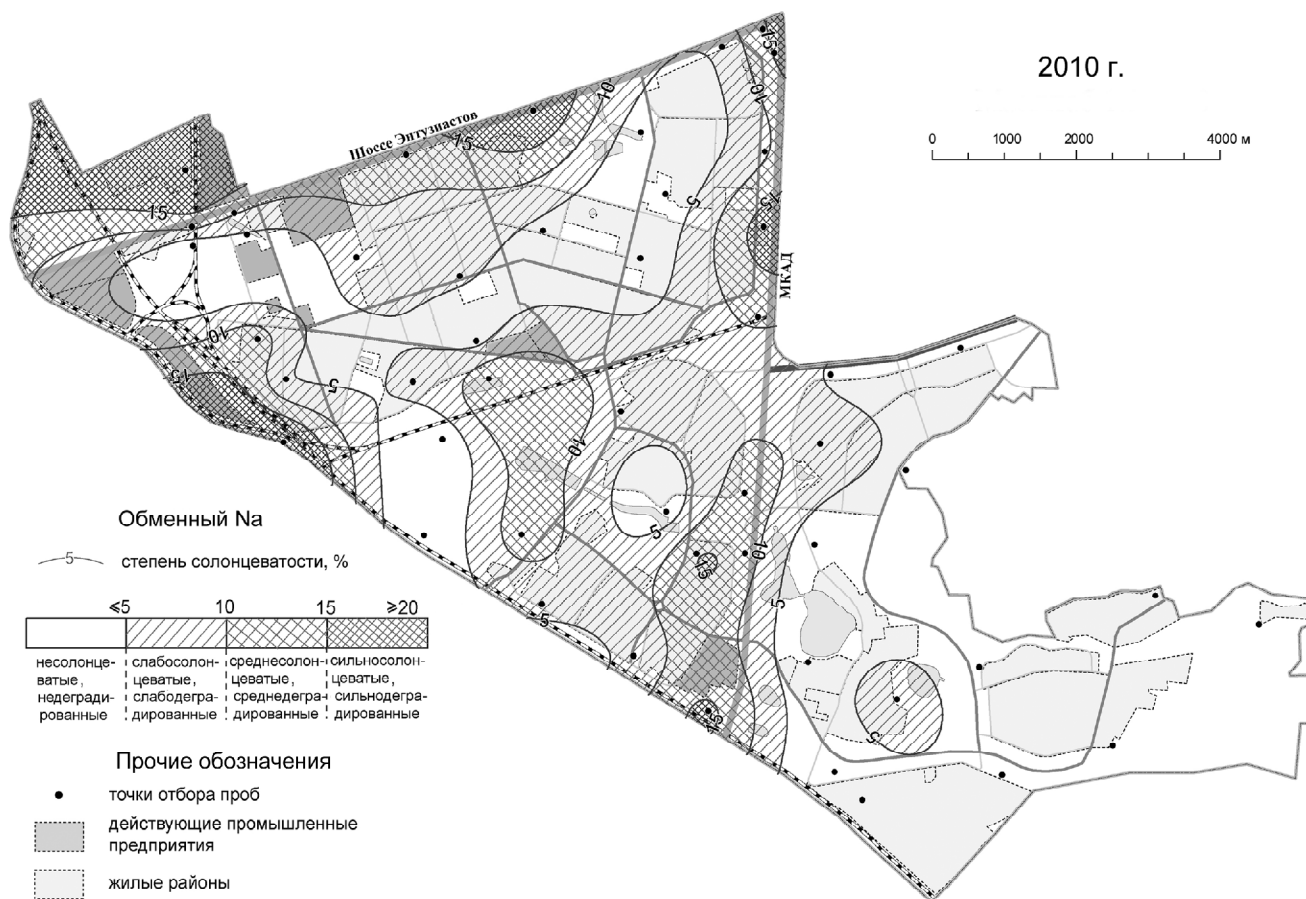


Рис. 3. Техногенные аномалии обменного натрия (в % солонцеватости) в поверхностном слое почв ВАО Москвы (по данным 2010 г.)

Fig. 3. Technogenic anomalies of exchangeable sodium (% of alkalinity) in the surface soil layer, Moscow EAD, 2010

ют рассеиванию солевых аэрозолей и их более широкому распространению по территории города.

Деградация почвенного покрова ВАО под воздействием антропогенной солонцеватости. Оценка выполнена по методике определения размеров ущерба от деградации почв [Методика..., 1994]. Под деградацией понимается ухудшение состава и свойств почв, что приводит к потере их природно-хозяйственной значимости. Среди основных типов деградации почв особо выделяется осолонцевание – приобретение почвой специфических свойств от вхождения ионов натрия в ППК. По уровню содержания обменного натрия в почвах и соответствующей ему солонцеватости (<5, 5–10, 10–15, 15–20% от емкости катионного обмена) выделены четыре степени их деградации: недеградированные, слабо-, средне- и сильнодеградированные. Они использованы при составлении карты техногенных аномалий обменного натрия в поверхностном слое почв ВАО и отражены в ее легенде (рис. 3).

В результате анализа карты (рис. 3) выявлена различная степень деградации почв. В 2010 г. 22,2% общей площади занимали сильно- и среднедеградированные почвы в транспортной и промышленной зонах. В центре округа наибольшее распространение получили слабодеградированные почвы, занимающие 32% территории. Площадь недеградированных почв составила 45,8%, они сохранились в

селитебной зоне южнее ш. Энтузиастов, в парке Кусково и на востоке округа за МКАД. Таким образом, в результате засоления почв ПГР и последующего развития в них солонцеватости произошла деградация почвенного покрова на 50% площади округа и больше. При существующем объеме применения ПГР в ближайшем будущем можно ожидать дальнейшее усиление солонцеватости в почвенном покрове ВАО. Концентрация обменного натрия в почвах может достичь столь высокого уровня, что почвы превратятся в солонцы, что потребует очень длительных сроков восстановления и реабилитации.

Выводы:

– многолетнее и интенсивное использование ПГР на дорогах Москвы привело к экологически опасным последствиям для исходно незасоленных почв – их антропогенной галогенизации и осолонцеванию, не характерных для гумидной зоны. В результате изменились химический состав и физико-химические свойства почв, включая реакцию среды, гранулометрический состав и плотность. Причиной развития засоления и солонцеватости почвенного покрова служат вносимые с ПГР хлоридно-натриевые соли и катион натрия, вызывающий диспергацию и пептизацию почвенных коллоидов, которые под влиянием электролитов солей коагулируют, увеличивая плотность почв и приводя к деградации почвенного покрова;

– поступление ПГР в снежный покров вызывает его подщелачивание с увеличением pH по сравнению с фоном в среднем на 0,6. Наиболее высокие значения pH (7,5) в снеге приурочены к промышленным зонам и автомагистралям. Средняя минерализация талой воды составляет 19,4 мг/л, что в 2 раза выше фона. По ионному составу снеговые воды относятся к хлоридно-натриевому и хлоридно-кальциевому типам, что объясняется влиянием солей NaCl и CaCl₂, доминирующим в составе ПГР;

– в городских почвах, наследующих химический состав снега, происходит трансформация их физико-химических свойств – они приобретают нейтральную реакцию (pH 7,2), повышенную в 16–20 раз относительно фона минерализацию (15,2 смоль(экв)/кг) и плотный остаток (0,48%). В составе почвенного раствора преобладают ионы хлора и натрия со значе-

ниями коэффициента накопления $K_c \sim 100$. По данным за 2010 г. большая часть городских почв имеет среднюю степень засоления и слабую степень солонцеватости;

– на картах засоления и солонцеватости почвенного покрова выделены техногенные аномалии легкорастворимых солей, приуроченные в основном к автомагистралям и промзонам. Процессы деградации почвенного покрова в результате засоления и солонцеватости затронули свыше 50% территории округа. В зависимости от солонцеватости выделены четыре категории деградированных почв, включая сильно- и среднедеградированные, которые занимают 22% территории ВАО. Высокие дозы применяемых ПГР обуславливают прогрессирующее засоление городских почв с усилением их солонцеватости.

Благодарности. Полевые и лабораторные исследования выполнены при поддержке Русского географического общества (договор № 07/2014-П1), анализ и интерпретация данных – за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-27-00083).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Герасимов А.О. Оценка токсичности новых противогололедных средств для высших растений // Экология и промышленность России. Анализ. Методики. Прогнозы. 2013. № 3. С. 58–62.
- Еремина И.Д., Григорьев А.В. Кислотность и химический состав снежного покрова в Москве и Подмосковье за период 1999–2006 гг. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2010. № 3. С. 56–60.
- Засоленные почвы России / Под ред. Л.Л. Шишова, Е.И. Панковой. М.: ИКЦ «Академкнига», 2006. 854 с.
- Касимов Н.С. Методология и методика ландшафтно-геохимического анализа городов // Экогеохимия городских ландшафтов / Под ред. Н.С. Касимова. М.: Изд-во Моск.ун-та, 1995. С. 6–39.
- Касимов Н.С., Кошелева Н.Е., Власов Д.В., Терская Е.В. Геохимия снежного покрова в Восточном округе Москвы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2012. № 4. С. 14–25.
- 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.
- Кошелева Н.Е., Касимов Н.С., Никифорова Е.М. Современное эколого-геохимическое состояние почв Москвы // Экологические проблемы промышленных городов. Ч. 1. Саратов, 2011. С. 79–85.
- Кошелева Н.Е., Никифорова Е.М. Антропогенная трансформация физико-химических свойств городских почв и ее влияние на накопление свинца: Мат-лы II Междунар. науч. конф. «Современные проблемы загрязнения почв», 28 мая–1 июня 2007. М.: МГУ, 2007. С. 123–127.
- Лабутина И.А., Хайбрахманов Т.С. Функциональное зонирование территории ВАО г. Москвы для целей экологического мониторинга // ИнтерКарто/ИнтерГИС-16. Устойчивое развитие территорий: Теория ГИС и практический опыт: Мат-лы междунар. науч. конф. Ростов-на-Дону, 2010. С. 234–236.
- Методика определения размеров ущерба от деградации почв и земель // Препринт. Управление охраны почв и земельных ресурсов Минприроды России и Управление мониторинга земель и охраны почв Роскомзема. М., 1994. 13 с.
- 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.
- Николаев Л.Ф., Ойхели О.В., Поршалева Е.Б. и др. Противогололедные реагенты и их влияние на природную среду. М.: Диалог-МГУ, 1998. 60 с.
- 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.
- Почва, город, экология / Под ред. Г.В. Добровольского. М.: Фонд «За экономическую грамотность», 1997. 320 с.
- 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.
- Систер В.Г., Корецкий В.Е. Инженерно-экологическая защита водной системы северного мегаполиса в зимний период. М.: Центр МГУИЭ, 2004. 159 с.
- Смагин А.В., Азовцева Н.А., Смагина М.В. и др. Некоторые критерии и методы оценки экологического состояния почв в связи с озеленением городских территорий // Почвоведение. 2006. № 5. С. 603–615.
- Хомяков Д.М. Противогололедные реагенты на объектах дорожного хозяйства Москвы. Опыт прошедшего десятилетия // Дорожная держава. 2013. № 47. С. 92–96.
- Черноусенко Г.И., Ямнова И.А., Скрипникова М.Н. Антропогенное засоление почв Москвы // Почвоведение. 2003. № 1. С. 97–105.
- 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.
- 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. Vol. 26. P. 703–709.
- Bäckström M., Karlsson S., Bäckman L. et al. Mobilisation of heavy metals by deicing salts in a roadside environment // Water Res. 2004. Vol. 38. P. 720–732.
- Brady C.B., Weil R.R. The Nature and Properties of Soils. 11th ed. L.: Prentice Hall Intern. Editions, 1996. 739 p.
- Bryson G.M., Barker A.V. Sodium accumulation in soils and plants along Massachusetts roadsides // Commun. Soil Sci. Plant Anal. 2002. Vol. 33(1–2). P. 67–78.

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. Vol. 19(4). P. 296–301.

Joutti A., Schultz E., Pessala P. et al. Ecotoxicity of Alternative de-icers // *J. Soils & Sediments.* 2003. Vol. 3(4). P. 269–272.

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

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. Environ. Contamination and Toxicology.* 2015. Vol. 94(4). P. 525–531. DOI: 10.1007/s00128-015-1481-0.

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. Vol. 135(7). P. 505–510. DOI: 10.1061//asce/0733-9372/2009/135:7/505.

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. Vol. 127. P. 281–299.

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

Shainberg I., Letey J. Response of soils to sodic and saline conditions // *Hilgardia.* 1984. Vol. 52. N 2. P. 1–57. DOI: 10.3733/hilg.v52n02p057.

Поступила в редакцию 08.10.2015

Принята к публикации 16.03.2016

E.M. Nikiforova¹, N.E. Kosheleva², T.S. Khaibrakhmanov³

ECOLOGICAL IMPACT OF ANTIGLAZE TREATMENT ON SOILS OF THE EASTERN DISTRICT OF MOSCOW

The environmental consequences of long-term use of de-icing salts (DS) in the Eastern Administrative District (EAD) of Moscow manifest themselves as anthropogenic salinity and alkalinity of soils. Chemical composition of reagents, levels and distribution patterns of soluble salts and exchangeable cations in snow meltwater and soils were described for different land-use zones. Mixtures of DS salts based on sodium chloride and sodium cause salinization and alkalization of soils. These salts produce dispersion and peptization of soil colloids, which coagulate under the influence of salt electrolytes, thus increasing soil density. Alkalization of snow cover in EAD is characterized by an average increase in pH compared to the background level by 0,6 units. The average salinity of meltwater is 19,4 mg/l, which is 2 times higher than the background values. According to the ion composition, snow waters belong to sodium chloride and calcium chloride classes due to the influence of the DS main salt compounds – NaCl and CaCl₂.

Inheriting the chemical composition of snow, urban soils acquired a neutral reaction (average pH 7,2), mineralization (15,2 cmol-eq/kg) and the solid residue (0,48%) which is 20–16 times higher than the background level. Ions of Cl and Na with enrichment factor about 100 prevail in the soil solution. According to the data of 2010, most urban soils had an average salinity and low degree of alkalinity. Extensive and contrasting technogenic anomalies of salts and exchangeable Na formed in the soil cover. Soils of traffic and industrial zones demonstrated the highest degree of salinity with NaCl and CaCl₂ (up to 1,3–1,6% of solid residue) and alkalinity (up to 12–14,5% of the cation sum). Maps of soluble salts and exchangeable sodium content in the surface soil layer compiled for the EAD territory showed the extent of soil degradation as a result of its anthropogenic alkalinity. Degradation processes have affected more than 50% of the area. Soils near highways with a total area of 22,2% were assigned to the category of strongly and moderately degraded soils. Slightly degraded soils, which occupy 32% of the territory, remained in the center of the district. Non-degraded soils with an area of 45,8% are located in the residential area southward from the Enthusiasts' highway, in park Kuskovo, as well as in the eastern part of the district located outside the Moscow automobile ring road.

Keywords: urban soils, de-icing salts, salinization, alkalinity, technogenic anomalies, Moscow.

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Geographical Society (project N 07/2014-III) and the Russian Science Foundation (project N 14-27-00083).

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Senior Research Scientist, PhD in Geography; *e-mail:* nikiforova-geo@mail.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Leading Research Scientist, D.Sc. in Geography; *e-mail:* nataalk@mail.ru

³ «Scanex» Engineering and Technological Centre, Project Leader, PhD in Geography; *e-mail:* haibrahmanov@scanex.ru

REFERENCES

- 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. Vol. 26. P. 703–709.
- Bäckström M., Karlsson S., Bäckman L.* et al. Mobilisation of heavy metals by deicing salts in a roadside environment // *Water Res.* 2004. Vol. 38. P. 720–732.
- Brady C.B., Weil R.R.* The Nature and Properties of Soils, 11th ed., London, Prentice Hall International Editions, 1996, 739 p.
- Bryson G.M., Barker A.V.* Sodium accumulation in soils and plants along Massachusetts roadsides // *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 2002. Vol. 33(1–2). P. 67–78.
- Chernousenko G.I., Jamnova I.A., Skripnikova M.N.* Antropogennoe zasolenie pochv Moskvy // *Pochvovedenie*. 2003. N 1. P. 97–105 (in Russian).
- 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. Vol. 19(4). P. 296–301.
- Eremina I.D., Grigor'ev A.V.* Kislotsnost' i himicheskij sostav snezhnogo pokrova v Moskve i Podmoskov'e za period 1999–2006 gg. // *Vest. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografija*. 2010. N 3. P. 56–60 (in Russian).
- Gerasimov A.O.* Ocenka toksichnosti novyh protivogolodnyh sredstv dlja vysshih rastenij // *Jekologija i promyshlennost' Rossii. Analiz. Metodiki. Prognozy*. 2013. N 3. P. 58–62 (in Russian).
- Homjakov D.M.* Protivogolodnye reagenty na ob'ektah dorozhnogo hozjajstva Moskvy. Opyt proshedshego desjatiletija // *Dorozhnaja derzhava*. 2013. № 47. P. 92–96 (in Russian).
- Joutti A., Schultz E., Pessala P.* et al. Ecotoxicity of Alternative de-icers // *J. Soils & Sediments*. 2003. Vol. 3(4). P. 269–272.
- Kasimov N.S.* Metodologija i metodika landshaftno-geohimicheskogo analiza gorodov // *Jekogeohimija gorodskih landshaftev* / Pod red. N.S. Kasimova. M.: Izd-vo Mosk. Un-ta, 1995. P. 6–39 (in Russian).
- Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Vlasov D.V., Terskaja E.V.* Geohimija snezhnogo pokrova v Vostochnom okruge Moskvy // *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. Geografija*. 2012. № 4. P. 14–25 (in Russian).
- Kasimov N.S., Nikiforova E.M.* Geohimija gorodov i gorodskih landshaftov / *Jekologija goroda* / Pod red. A.S. Kurbatovoj i dr. M.: Nauchnyj mir, 2004. P. 234–268 (in Russian).
- Kim S.-Y., Koretsky C.* Effects of road salt deicers on sediment biogeochemistry // *Biogeochemistry*. 2013. Vol. 112(1–3). P. 343–358. DOI: 10.1007/s10533-012-9728-x.
- Kosheleva N.E., Kasimov N.S., Nikiforova E.M.* Sovremennoe jekologo-geohimicheskoe sostojanie pochv Moskvy // *Jekologicheskie problemy promyshlennyh gorodov*. Ch. 1. Saratov, 2011. P. 79–85 (in Russian).
- Kosheleva N.E., Nikiforova E.M.* Antropogennaja transformacija fiziko-himicheskikh svojstv gorodskih pochv i ee vlijanie na nakoplenie svinca: Mat-ly II Mezhdunar. Nauchn. konf. «Sovremennye problemy zagraznenija pochv», 28 maja–1 ijunja 2007. M.: MGU, 2007. P. 123–127 (in Russian).
- Labutina I.A., Hajbrahmanov T.S.* Funkcional'noe zonirovanie territorij VAO g. Moskvy dlja celej jekologicheskogo monitoringa // *InterKarto/InterGIS-16. Ustojchivoe razvitie territorij: teorija GIS i prakticheskij opyt: Mat-ly mezhdunar. Nauchn. konf. Rostov-na-Donu*, 2010. P. 234–236 (in Russian).
- 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. Environm. Contamination and Toxicology*. 2015. Vol. 94 (4). P. 525–531. DOI: 10.1007/s00128-015-1481-0.
- Metodika opredelenija razmerov ushherba ot degradacii pochv i zemel' // Preprint. Upr. ohrany pochv i zemel'nyh resursov Minprirody Rossii i Upr. monitoringa zemel' i ohrany pochv Roskomzema. M., 1994, 13 p. (in Russian).*
- 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. Vol. 135(7). P. 505–510. DOI: 10.1061//asce/0733-9372/2009/135/7/505.
- Nikiforova E.M., Kasimov N.S., Kosheleva N.E.* Mnogoletnjaja dinamika antropogennogo zasolenija pochv Moskvy (na primere Vostochnogo okruga) // *Pochvovedenie*. 2014. N 3. P. 351–363 (in Russian).
- Nikolaev L.F., Ocheli O.V., Porshaleva E.B.* i dr. Protivogolodnye reagenty i ih vlijanie na prirodnuju sredu. M.: Dialog-MGU, 1998, 60 p. (in Russian).
- 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. Vol. 127. P. 281–299.
- Obuhov A.I., Lepneva O.M.* Jekologicheskie posledstvija primenenija protivogolodnyh soedinenij na gorodskih avtomagistraljah i mery po ih ustraneniu // *Jekologicheskie issledovanija v Moskve i Moskovskoj oblasti: Mat-ly nauch.-prakt. konf. M., 1990. P. 197–202 (in Russian).*
- Pochva, gorod, jekologija* / Pod red. G.V. Dobrovol'skogo. Moscow, Fond «Za jekonomicheskiju gramotnost'», 1997, 320 p. (in Russian).
- Prokof'eva T.V., Martynenko I.A., Ivannikov F.A.* Sistematika pochv i pochvoobrazujushchih porod Moskvy i vozmozhnost' ih vkljuchenija v obshhuju klassifikaciju // *Pochvovedenie*. 2011. N 5. P. 611–623 (in Russian).
- Ramakrishna D., Viraraghavan T.* Environmental impact of chemical deicers – a review // *Water Air Soil Pollut.* 2005. Vol. 166. P. 49–63.
- Shainberg I., Letey J.* Response of soils to sodic and saline conditions // *Hilgardia*. 1984. Vol. 52. N 2. P. 1–57. DOI: 10.3733/hilg.v52n02p057.
- Shevjakova N.I., Kuznecov V.V., Karpachevskij L.O.* Prichiny i mehanizmy gibeli zelenyh nasazhdenij pri dejstvii tehnogennyh faktorov gorodskoj sredy i sozdanie stress-ustojchivyh fitocenozov // *Lesnoj vestnik*. 2009. N 6 (15). P. 25–33 (in Russian).
- Sister V.G., Koreckij V.E.* Inzhenerno-jekologicheskaja zashhita vodnoj sistemy severnogo megapolisa v zimnij period. M.: Centr MGUIJe, 2004, 159 p. (in Russian).
- Smagin A.V., Azovceva N.A., Smagina M.V.* i dr. Nekotorye kriterii i metody ocenki jekologicheskogo sostojanija pochv v svjazi s ozelenenijem gorodskih territorij // *Pochvovedenie*. 2006. N 5. P. 603–615 (in Russian).
- Zasolennye pochvy Rossii* / Pod red. L.L. Shishova, E.I. Pankovoj. M.: IKC «Akademkniga». 2006, 854 p. (in Russian).

Received 08.10.2015

Accepted 16.03.2016