

## ПОСЛЕДСТВИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИДОРОЖНЫХ ТЕРРИТОРИЙ КОМПОНЕНТАМИ СОЛЕВЫХ РЕАГЕНТОВ НА ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЧВЫ И РАСТЕНИЙ В ЛЕСНЫХ БИОГЕОЦЕНОЗАХ

А.В. Судник, И.П. Вознячук

Государственное научное учреждение «Институт экспериментальной ботаники им. В.Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси», 220072, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Академическая, д. 27

asudnik@tut.by

Установлена основная причина ухудшения состояния придорожных насаждений в Беларуси — техногенное загрязнение почв и растений используемыми в зимний период компонентами противогололедных реагентов, произведенными на основе хлорида натрия. С учетом высокого содержания ионов натрия и хлора в почве, растениях и общих тенденций территориального распределения подтвержден тезис об автодорогах как источнике поступления загрязняющих веществ в природные экосистемы. Установлена прямая зависимость загрязнения почвы и растений придорожных насаждений от интенсивности движения. Загрязнение лесных биогенозов прослеживается не менее чем на 300 м от дорожного полотна, максимальное — на опушках и в полосе до 35 м от полотна дороги. Отмечена тенденция увеличения содержания хлоридов в почве относительно данных десятилетней давности. Охарактеризованы последствия воздействия загрязнения придорожных территорий ионами натрия и хлора на экологическое состояние почвы и растений лесных биогенозов. При сохранении существующего режима обслуживания дорог в зимний период сохраняется угроза достижения порога токсичности для растений, который может вызвать угнетение роста и развития растений. По результатам анализа солеустойчивости дикорастущих и культивируемых видов деревьев и кустарников, используемых при озеленении дорог и населенных пунктов в Беларуси (221 вид), подобран ассортимент древесно-кустарниковых растений, устойчивых к загрязнению противогололедными реагентами.

**Ключевые слова:** автомобильная дорога, придорожная территория, противогололедные реагенты (ПГР), загрязнение, ионы натрия ( $\text{Na}^+$ ) и хлора ( $\text{Cl}^-$ ), состояние

**Ссылка для цитирования:** Судник А.В., Вознячук И.П. Последствия воздействия загрязнения придорожных территорий компонентами солевых реагентов на экологическое состояние почвы и растений в лесных биогенозах // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 6. С. 83–95. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-6-83-95

Географическое положение Республики Беларусь, наличие современных мультимодальных транспортных коридоров, развитие экспорта транспортных услуг являются важными составляющими стабильного развития ее экономики. В связи с этим проблема последствий воздействия автомагистралей на придорожные экосистемы приобретает актуальность, особенно с учетом роста парка автотранспорта, развития инфраструктуры дорог, изменения технологий их содержания. Эксплуатация и технологии содержания автодорог оказывают немалое влияние на экологическое состояние придорожных природно-растительных комплексов.

Эксплуатация и содержание автомобильных дорог способствует загрязнению придорожных территорий следующими комплексами элементов: компонентами противогололедных реагентов (ПГР); выбросами от автотранспорта в атмосферу; продуктами выветривания дорожных материалов, частицами металлов, красок, перевозимых грузов, горюче-смазочными материалами и пр. [1]. Экологическим бедствием для придорожных экосистем является мусор, происхождение которого связано

с безответственностью людей — участников дорожного движения. Как правило, загрязнение экосистем вдоль дорог носит комплексный характер, поскольку этот процесс состоит из прямого влияния выбросов транспорта в атмосферу, последствий эксплуатации и содержания дорог, экологической ситуации в регионе и т. д. Фитоценозы как аккумуляторы и своего рода биологические фильтры, способны связывать, трансформировать и локализовывать в определенных частях биогенозов некоторые из загрязняющих веществ [2].

В Республике Беларусь в качестве ПГР используется соль техническая — галит, которая на 96–98 % состоит из хлорида натрия ( $\text{NaCl}$ ) в чистом виде или в смеси с песком (преимущественно в соотношении 1:1). При этом на отдельных участках автодорог нормы внесения ПГР превышены в 2 раза и более [3]. Использование хлорида натрия в качестве ПГР, в особенности с превышением допустимых норм концентрации, в сочетании с другими негативными факторами, как связанными, так и не связанными с эксплуатацией дорог, неизбежно ведет к ослаблению и деградации придорожных экосистем [4].

Солевые компоненты ПГР (ионы натрия и хлора) в больших концентрациях токсичны для всех компонентов биогеоценозов [5]. Их внедрение в бицикл придорожных насаждений происходит непосредственно при уборке снега и/или при попадании на кроны деревьев в виде аэрозолей при движении транспорта. На поверхность деревьев и кустарников соль попадает в результате разбрызгивания автомобилями талых вод и мокрого снега с растворами и кристаллами солей. Турбулентные потоки воздуха, создаваемые движущимся автотранспортом, способствуют распространению водно-солевых аэрозолей вверх в приземный слой воздуха, и их оседанию на хвое и побегах деревьев. Большую часть таких веществ смывают осадки, и они попадают в почву, вызывая ее засоление [3, 6, 7].

Для оценки состояния природной среды и последствий эксплуатации дорог с различным уровнем транспортной нагрузки необходимо иметь представление о миграции и аккумуляции загрязнителей в природных средах придорожных территорий. Загрязнители, включаясь в природные миграционные потоки, перераспределяются в природных компонентах и способны в будущем придать новые черты ландшафтно-геохимической обстановке, не только отличающие ее от фоновой, но и усугубляющие последствия влияния дорог.

## Цель работы

Цель работы — оценить последствия влияния загрязнения придорожных территорий компонентами солевых реагентов на экологическое состояние почвы и растений в лесных биогеоценозах

## Объекты и методы исследований

В систему объектов исследования вошли выборочные участки магистральных автомобильных дорог: М1/Е30 Брест (Козловичи) — Минск — граница Российской Федерации (Редьки); М3 (Минск — Витебск); М9 (Минская кольцевая автомобильная дорога — МКАД). Для исследования загрязнения придорожных территорий компонентами ПГР проводился отбор образцов почвы (два слоя: 0...10 см и 10...20 см), лесной подстилки и зеленых мхов на расстоянии 5, 10, 20, 35, 150 и 250 м от МКАД. Всего отобрано 192 образца. Отбор осуществлялся раздельно на участках прохождения дороги в выемке, насыпи и в нулевых отметках в соответствии с руководством [8].

Химический анализ образцов проводился центральной лабораторией филиала РУП «Белгеология» на загрязнение компонентами ПГР (ионами натрия и хлора). Кроме того, в ГУ «Республиканский центр радиационного контроля и мониторинга окружающей среды» получены данные о загрязнении ионами хлора снежного покрова вдоль автодорог на территории Беларуси.

В основу исследований положена методика мониторинга защитных древесных насаждений [9]. Оценка состояния деревьев и древостоев проводилась на основе общеевропейской методики экологического лесного мониторинга, изложенной в руководстве [10]. Оценка жизненного состояния деревьев проводилась на основе правил [11]. Отнесение насаждений к категориям жизненного состояния осуществлено по модифицированной шкале В.А. Алексеева [12]. Для сравнения состояния различных древесных пород вдоль автодорог проанализированы данные мониторинга защитных древесных насаждений за 2004–2019 гг. [13].

## Результаты и их обсуждение

**Степень загрязнения придорожных территорий хлоридами.** Солевое загрязнение придорожных биогеоценозов является следствием применения на автодорогах ПГР для борьбы с гололедицей, на 95...98 % состоящих из хлорида натрия, а оставшиеся 2...5 % приходятся на примеси — нитраты, фосфаты, сульфаты натрия, кальция и т. д. В результате снегоуборочных работ указанные соли, с дорожными стоками и при воздушно-капельном переносе поступают в окружающую среду. Весной часть из них, аккумулятивная в снеге, удаляется с талым стоком, оставшаяся — засоляет почвы. В теплый период года, по мере промывания атмосферными осадками, уровень засоления снижается, достигая минимума к началу осени.

По геохимической классификации, хлор относится к очень подвижным водным мигрантам, для которых характерно образование легкорастворимых солей, энергично мигрирующих в ландшафте [14]. Хлор не образует труднорастворимых минералов, не адсорбируется коллоидными системами, не накапливается биогенным путем и поэтому обладает очень высокой миграционной способностью. Хлор является очень активным химическим элементом, способным непосредственно соединяться почти со всеми элементами Периодической системы химических элементов Д.И. Менделеева (за исключением кислорода, азота, углерода и иридия), поэтому в природе он встречается только в виде соединений [15]. Хлор имеет важное физиологическое значение и содержится в живых организмах в виде соляной кислоты (HCl), ее солей, среди которых наиболее распространен хлорид натрия, а также разнообразных хлорорганических соединений. Он относится к необходимым элементам питания растений и по содержанию представляет собой макроэлемент, но организмы в большинстве случаев обеспечены хлором и потребность в нем растения испытывают лишь в небольших количествах [16].

Т а б л и ц а 1

**Содержание ионов натрия и хлора в компонентах лесных биогеоценозов  
вдоль автодорог на расстоянии до 300 м от опушки вглубь лесного массива**  
The content of sodium and chlorine ions in the components of forest biogeocenosis along the roads  
at a distance of up to 300 m from the edge of the forest

Параметр рядов распределения	Ионы хлора (Cl <sup>-</sup> )				Ионы натрия (Na <sup>+</sup> )			
	Мхи	Лесная подстилка	Почва		Мхи	Лесная подстилка	Почва	
			0...10 см	10...20 см			0...10 см	10...20 см
Автодорога М1/Е30								
Среднее ± стандартная ошибка	919,9 ± 89,73	182,1 ± 18,83	60,5 ± 7,54	46,9 ± 6,82	127,6 ± 18,10	40,2 ± 9,13	50,6 ± 9,49	37,8 ± 9,04
Минимум	431,4	117,7	19,6	19,6	78,0	10,0	3,3	2,5
Максимум	1451,1	323,6	205,9	215,7	266,4	107,1	216,13	218,5
Экссесс	-0,49	-0,21	<b>5,69</b>	<b>14,80</b>	1,94	-0,48	<b>2,38</b>	<b>5,34</b>
Асимметрич- ность	0,04	1,07	<b>2,26</b>	<b>3,52</b>	<b>1,55</b>	1,09	<b>1,48</b>	<b>2,21</b>
Коэффициент вариации	32,4	38,7	68,3	79,6	47,1	85,1	102,7	130,8
Автодорога М3								
Среднее ± стандартная ошибка	1068,7 ± 9,81	264,7 ± 31,26	62,9 ± 10,00	94,0 ± 43,12	159,0 ± 64,14	50,5 ± 30,44	46,2 ± 21,57	72,6 ± 47,53
Минимум	1039,3	215,7	34,3	29,4	65,0	10,0	5,0	5,0
Максимум	1078,5	353,0	88,3	304,0	347,8	138,8	144,5	305,3
Экссесс	4,00	1,50	-2,99	<b>4,89</b>	3,29	2,51	2,69	<b>5,12</b>
Асиммет- ричность	-2,00	1,39	-0,07	<b>2,19</b>	1,78	1,63	1,63	<b>2,23</b>
Коэффициент вариации	1,8	23,6	38,9	112,4	80,7	120,5	114,4	160,4
Автодорога М9								
Среднее ± стандартная ошибка	1533,0 ± 221,22	149,1 ± 10,24	47,4 ± 3,83	41,3 ± 3,64	1217,0 ± 664,22	123,9 ± 24,67	33,9 ± 13,99	16,5 ± 3,62
Минимум	490,3	58,8	34,3	24,5	32,4	10,0	5,0	5,0
Максимум	5569,2	254,9	78,4	63,7	4376,4	495,0	174,3	46,3
Экссесс	<b>9,45</b>	-0,43	2,06	-0,90	<b>18,73</b>	<b>2,56</b>	<b>7,22</b>	1,71
Асимметрич- ность	<b>2,69</b>	0,27	<b>1,58</b>	0,56	<b>4,22</b>	<b>1,59</b>	<b>2,62</b>	<b>1,38</b>
Коэффициент вариации	69,2	33,6	28,0	30,6	261,8	97,6	143,2	75,9
По всем автодорогам								
Среднее ± стандартная ошибка	1306,6 ± 142,87	171,1 ± 10,29	57,5 ± 4,98	51,4 ± 7,00	790,2 ± 407,91	89,0 ± 15,82	45,8 ± 7,31	36,9 ± 8,24
Минимум	431,4	58,8	19,6	19,6	32,4	10,0	3,3	2,5
Максимум	5569,2	353,0	205,9	304,0	4376,4	495,0	216,1	305,3
Экссесс	<b>14,76</b>	0,46	<b>8,28</b>	<b>17,83</b>	<b>31,08</b>	<b>5,39</b>	<b>2,27</b>	<b>11,48</b>
Асимметрич- ность	<b>3,34</b>	<b>0,87</b>	<b>2,57</b>	<b>3,99</b>	<b>5,43</b>	<b>2,16</b>	<b>1,60</b>	<b>3,17</b>
Коэффициент вариации	67,4	39,0	60,0	94,4	318,2	115,2	110,4	154,9
<i>Примечание.</i> Полу жирным шрифтом выделены значения статистик распределения достоверно отличающихся от 0 при P = 0,95								

Т а б л и ц а 2

**Содержание хлоридов (мг/кг сухого вещества) в почве лесных биогеоценозов  
на различном удалении от дорожного полотна**

**Chloride content (mg/kg dry matter) in the soil of forest biogeocenosis at various distances from the roadway**

Параметр рядов распределения	Расстояние от дорожного полотна, м					
	5	10	20	35	150	300
Ионы хлора Cl <sup>-</sup>						
Среднее ± стандартная ошибка	69,9 ± 16,90	58,2 ± 11,41	58,2 ± 6,82	52,1 ± 8,67	49,0 ± 10,93	39,2 ± 2,49
Минимум	19,61	24,51	24,51	24,51	19,61	24,51
Максимум	303,96	215,71	107,86	171,59	205,91	58,83
Экссесс	<b>10,76</b>	<b>10,52</b>	-1,03	<b>10,52</b>	<b>12,89</b>	-0,41
Асимметричность	<b>3,05</b>	<b>3,07</b>	0,65	<b>3,08</b>	<b>3,46</b>	0,00
Коэффициент вариации	96,7	78,4	46,8	66,5	89,1	25,4
Ионы натрия Na <sup>+</sup>						
Среднее ± стандартная ошибка	110,8 ± 16,90	61,2 ± 16,21	38,3 ± 5,99	18,0 ± 3,50	14,8 ± 5,67	5,0 ± 0,37
Минимум	18,5	11,1	5,4	3,34	2,5	2,5
Максимум	305,25	218,5	75	66,6	96,2	7,5
Экссесс	<b>3,79</b>	<b>3,11</b>	-1,43	<b>10,96</b>	<b>12,88</b>	-0,26
Асимметричность	<b>1,54</b>	<b>2,01</b>	0,32	<b>3,04</b>	<b>3,48</b>	0,00
Коэффициент вариации	61,0	106,0	62,6	77,7	153,2	29,8
<i>Примечание.</i> Полуужирным шрифтом выделены значения статистик распределения достоверно отличающихся от 0 при P = 0,95						

Хлор поступает в растения в виде иона — Cl<sup>-</sup>. Повышенные концентрации хлора токсичны для растений. Порог токсичности, т. е. предельное содержание хлора в почве составляет 100 мг/кг почвы, выше его начинается угнетение роста и развития растений [17, 18]. Отрицательное воздействие проявляется и в замедлении роста побегов, преждевременном опадении листьев и хвои, усыхании и гибели деревьев и кустарников, изменении видового состава фитоценоза. Избыток хлора отрицательно действует на ассимиляционную поверхность мохового покрова, вызывая его быстрое отмирание и угнетая рост оставшейся части. Увеличение содержания хлора в лесной подстилке и почве оказывает отрицательное воздействие на активность почвенной микрофлоры и вызывает ее частичную гибель, с чем связано уменьшение ферментативной активности лесной подстилки и почвы [19, 20].

Анализ загрязнения придорожных биогеоценозов показал, что наименьшая аккумуляция ионов хлора в компонентах лесных биогеоценозов происходит вдоль участка дороги М1, а наиболее загрязненные участки — дороги М9 (табл. 1). Значительное количество ионов хлора в лесных экосистемах аккумулируется зелеными мхами (в среднем 1306,6 мг/кг), наименьшее — почвами на глубине 10...20 см (в среднем 51,4 мг/кг). Распределение загрязнения в целом зависит от

расстояния от дорожного полотна и интенсивности нагрузки на транспортные магистрали. Так, в окрестности трассы М9 содержание ионов хлора в зеленых мхах в 1,7 раза превышает уровень по данному элементу в зеленых мхах у дороги М1 и в 1,4 раза вдоль дороги М3.

При этом четко проявляется пространственное загрязнение биогеоценозов ионами хлора (табл. 2). В окрестности автодорог М9 и М1 загрязнение хлоридами распространяется на расстояние до 35 м от дорожного полотна с наибольшим превышением от минимальных значений по всем компонентам биогеоценоза. Загрязнение вдоль дороги М1 выражено на всей 300-метровой полосе с превышениями предельно допустимых концентраций в среднем в 2,5 раза. Кроме того, загрязнение различных компонентов биогеоценоза ионами хлора в целом имеют схожую пространственную структуру загрязнения. Данный факт свидетельствует как об участии хлоридов техногенного происхождения в естественных миграционных потоках в системе почва — растение, так и о вовлечении его в биологический круговорот.

Анализ тенденции накопления ионов хлора в компонентах лесных биогеоценозов по сравнению с данными десятилетней давности показал, что на придорожных территориях характерно увеличение их аккумуляции в первую очередь



в почве. При отборе образцов через 10-летний период по единой схеме на участках вдоль дорог М9 и М1 выявлено увеличение содержания ионов хлора в почве в 3 раза на фоне хоть и незначительного, но уменьшения уровня их накопления в лесной подстилке и мхах благодаря увеличению поступления водорастворимых веществ, происходящему, главным образом, аэральным путем.

Обладая высокой растворимостью и подвижностью, натрий при достаточном увлажнении почв выносятся из них, а при недостаточном — легко накапливается в зоне испарения капиллярной влаги. Обменный натрий может оказывать исключительно отрицательное влияние на химические и физические свойства почв. Высокое содержание обменного натрия приводит к возможности образования соды ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), ядовитого для высших форм растительности соединения. Обменный натрий способствует также развитию неблагоприятных физических свойств почв в силу его влияния на дисперсное состояние минеральных и органических соединений почвы. При содержании натрия в почвах в обменном состоянии больше 5...10 мг/100 г он сильно диспергирует почвы, обуславливая их высокую набухаемость и усадку [21].

По результатам анализа (см. табл. 1) вдоль автомагистралей М1, М3 и М9 отмечено значительное накопление катионов натрия. Наиболее интенсивное загрязнение натрием установлено в зеленых мхах на придорожных участках автодороги М9. Здесь он накапливается в среднем в количестве 1217,0 мг/кг, в 35-метровой полосе концентрация натрия превышает 130 мг/кг в 100 % образцов (в среднем 625,6 мг/кг), при этом максимальные значения достигают 4376,4 мг/кг в 5-метровой полосе. Содержание катионов натрия в зеленых мхах в окрестности автодороги М9 в 9,9 раза превышает его содержание у автодороги М1, в 7,6 раза — у автодороги М3 и в 46,5 раза — минимальные значения содержания данного элемента во мхах. Высокие концентрации натрия в лесной подстилке (от 10 до 495,0 мг/кг, в среднем — 89,0 мг/кг) наблюдаются на всем протяжении МКАД и приурочены преимущественно к 35-метровой полосе вдоль автодороги. Проникновение катионов натрия на глубину ограничено. Концентрации загрязнителей резко снижаются с глубиной. Так, содержание катионов натрия в верхнем органическом горизонте (0...10 см) составляет от 3,3 до 216,1 мг/кг, в среднем — 45,8 мг/кг, в горизонте 10...20 см — от 2,5 до 305,3 мг/кг, в среднем — 36,9 мг/кг (см. табл. 1). Высокое содержание обменного натрия в почве препятствует усвоению влаги растениями, ведет к нарушению физиолого-биохимических процессов и последующему ослаблению растений.

Загрязнение почв натрием отчетливо коррелирует с расстоянием — уменьшается по мере удаления от дорожного полотна (см. табл. 2). При этом значительная аккумуляция в почве ионов натрия и хлора распространяется на 300-метровое расстояние от любой автодороги. Максимальная концентрация фиксируется вдоль автомагистралей в опушечной полосе. Содержание ионов натрия на расстоянии 5 м от дорожного полотна варьирует от 18,5 до 305,3 мг/кг (в среднем — 112,3 мг/кг), в пределах 10-метровой полосы оно колеблется от 11,1 до 218,5 мг/кг (в среднем — 61,2 мг/кг). Максимальное загрязнение катионами натрия наблюдается вдоль автодороги М9. Его аккумуляция составляет от 7,4 в почвах до 4376,4 мг/кг во мхах (в среднем — 287,5 мг/кг). Максимальное превышение отмечается в почвах на глубине 10...20 см, что свидетельствует о миграции данного элемента в почвенном профиле.

Таким образом, следствием применения в зимний период на автодорогах в качестве ПГР хлорида натрия является значительное увеличение содержания ионов хлора и натрия в компонентах придорожных биогеоценозов. К кризисным, прежде всего, относятся участки, непосредственно прилегающие к дорожному полотну (до 5 м) и удаленные от него на расстояние до 35 м. Здесь отмечены основные превышения содержания по всем элементам. Загрязнение растительных сообществ прослеживается не менее чем на 300 м от дорожного полотна. При сохранении существующего режима обслуживания дорог в зимний период остро стоит угроза достижения порога токсичности для растений по содержанию ионов натрия и хлора, обуславливающих угнетение роста, развития и даже гибель растений.

**Воздействие загрязнения солями на состояние почвы.** Автомагистрали служат источником загрязнения почв, влияют на свойства эдафотопы путем изменения кислотных и ионообменных свойств органогенных горизонтов почв придорожных насаждений, изменения характера естественных миграционных потоков элементов в системе почва — растение, снижающего возможность усвоения влаги растениями [2, 7]. Применение хлорида натрия в качестве ПГР ведет к снижению кислотности и повышению щелочности почвенной среды (за счет накопления ионов натрия), увеличению содержания хлоридов до токсичных для растений концентраций, емкости катионного обмена, осмотического давления почвенного раствора и, в конечном итоге, к засолению почв. Использование ПГР на автодорогах и в связи с этим изменение некоторых природных факторов привели к деградации зонального подзолообразовательного процесса придорожных территорий и обусловили галогенез, т. е. засоление почв.

Действие засоления на растительные организмы заключается в ухудшении их водного баланса, обусловленного токсическим влиянием на них высоких концентраций солей. Засоление почв особенно опасно в пониженных участках придорожных территорий, куда стекают большие массы засоленных вод.

Отрицательное действие солей на растения имеет комплексный характер и включает в себя две составляющие: осмотическую и токсическую [22, 23]. Осмотическое действие проявляется в пониженном поглощении воды и неблагоприятном изменении водно-солевого обмена в клетках и тканях. Засоление приводит к созданию в почве низкого (резко отрицательного) водного потенциала, поэтому поступление воды в растение сильно затруднено. Дефицит воды в тканях, являющийся результатом осмотического действия солей, может усугубляться их токсичностью, когда ионы в избытке накапливаются в цитоплазме клеток. Визуальное проявление токсичности можно наблюдать по образованию некрозов на листьях и стеблях. Как правило, такой солевой эффект хорошо выражен при внезапном подъеме концентрации солей в среде. Повышение концентрации солей в почвенном растворе ведет к изменению осмотического давления и затрудняет поступление в растения воды и питательных веществ даже при наличии доступной влаги. В целом при высоком содержании солей в почве происходит подщелачивание среды, в результате чего изменяется система питания растений, становится затруднительным поступление питательных веществ в корни растений (так как вещества теряют подвижность, а при увеличении уровня минерализации почвенного раствора уменьшается осмотическое давление). Кроме того, высокое содержание натрия вызывает изменение структуры почвы. По мере увеличения содержания натрия в почве увеличивается риск диспергирования почвенных агрегатов, что препятствует движению воды и дренированию во всех видах почв, кроме песчаных. Таким образом, чрезмерное использование песчано-соляной смеси для борьбы с наледями приводит к тому, что остаточные количества ПГР скапливаются в почве, оказывая негативное влияние на состояние зеленых насаждений уже в период вегетации.

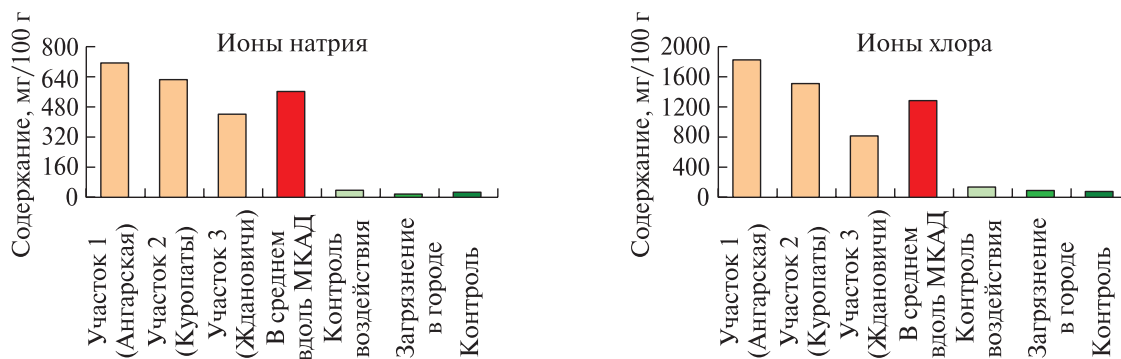
Изменение концентрации в почве отдельных ионов способствует их поступлению по стволам деревьев и накоплению в листьях. Под влиянием натриевых солей происходит нарушение ультраструктуры клеток, в частности изменяется структура хлоропластов. Вредное влияние высокой концентрации солей вызывает повреждение мембранных структур, вследствие чего возрастает их проницаемость, утрачивается способность

к избирательному накоплению веществ. В этом случае соли поступают в клетки пассивно вместе с транспирационным током воды. Большая концентрация натрия препятствует накоплению других катионов, в том числе и таких необходимых для жизни растения, как калий и кальций. Вредное действие солей проявляется в нарушении процессов обмена. В работе [24] показано, что под влиянием солей в растениях нарушается азотный обмен, накапливаются аммиак и другие ядовитые продукты.

Во внесении ПГР кроется причина не только засоления почв, но и формирования их солонцеватости — нового процесса для придорожных биогеоценозов. Подсолонцовывание почв происходит в результате периодической смены процессов засоления (ранней весной) и рассоления (летом). Вследствие этого содержание обменного натрия в почвах возрастает. По данным, полученным в Центральном ботаническом саду НАН Беларуси [5, 25], сезонная динамика накопления остаточных количеств ПГР в почве имеет два выраженных пика — в апреле и июле, глубина залегания ионов натрия в летний период опускается глубже 1 м. В условиях Беларуси этот процесс обстоятельно не изучен, а феномен формирования солонцеватых почв вдоль Московской кольцевой автомобильной дороги хорошо известен [28].

**Воздействие соляного загрязнения на состояние растений.** Степень загрязнения растительности аэральным путем определялась вывешиванием специальных адсорбирующих образцов на деревьях, произрастающих в опушечной полосе вдоль магистральной автодороги М9 [26]. В качестве образцов использовались сфагновые мхи, отобранные на территории местного биологического заказника «Ветеревичский» в Пуховичском районе Минской обл. Всего было проанализировано 29 образцов, из которых 24 находились под воздействием МКАД (по восемь образцов при положении дороги в выемке, в насыпи и в нуле), три образца располагались в глубине лесного массива на расстоянии более 400 м от источников воздействия (контроль воздействия), один образец находился в помещении без внешнего воздействия (контроль), один образец был помещен на балконе дома (воздушное загрязнение в городе). Образцы вывешивались в феврале на 20 сут. Анализы проводились на содержание ионов натрия и хлора в водных вытяжках образцов.

Статистическая обработка полученных данных показала, что концентрация всех анализируемых ионов в образцах вдоль автодороги существенно отличается от концентраций в контрольных образцах, расположенных в глубине лесного массива. На рис. 1 приведены результаты сравнительного анализа содержания хлоридов в образцах,



**Рис. 1.** Содержание ионов натрия и хлора в водных вытяжках в образцах, вывешенных на деревьях в различных районах вдоль МКАД, и в различных вариантах контроля

**Fig. 1.** The content of sodium and chlorine ions in water extracts in samples hung on trees in different areas along the Moscow Ring Road, and in various control options

подверженных воздействию воздушных загрязнителей от автодороги, и в контрольных образцах. Сравнение результатов анализов накопления воздушных загрязнителей в образцах, собранных с деревьев вдоль МКАД, с контрольными показало, что содержание ионов натрия и хлора в 22–25 раз превышает контрольные значения. Причем степень загрязнения фитотоксикантами зависит от положения опушечных деревьев относительно автодороги. Эта зависимость характеризуется отрицательными коэффициентами корреляции (–0,78 по натрию и –0,74 по хлору).

Как указано выше, на поверхность растущих деревьев компоненты ПГР попадают преимущественно аэральным путем. Осевшая на хвое и побегах соль вызывает закупоривание устьиц и ее обезвоживание, а при проникновении в ткани — повреждение растений. Нарушение работы ассимиляционного аппарата ведет к понижению интенсивности фотосинтеза, гибели побегов и задержке роста деревьев, что в конечном итоге выражается в угнетении общего состояния и ослаблении устойчивости древостоев к неблагоприятным факторам окружающей среды. Мелкодисперсные солевые частицы, осевшие на хвое и побегах растений, вызывают солевой ожог, изменение анатомической, морфологической структуры, уменьшение количества хлорофилла, изменение физиолого-биохимических показателей, признаками которых являются некрозы хвои и листьев различного характера, отставание в росте и развитии, преждевременное опадение листьев. Отличительной особенностью отрицательного воздействия ПГР на лиственные деревья и кустарники на придорожных территориях является повреждение вегетативных почек, а не листьев. Это приводит к образованию «розеточности» вегетативных побегов [7, 27].

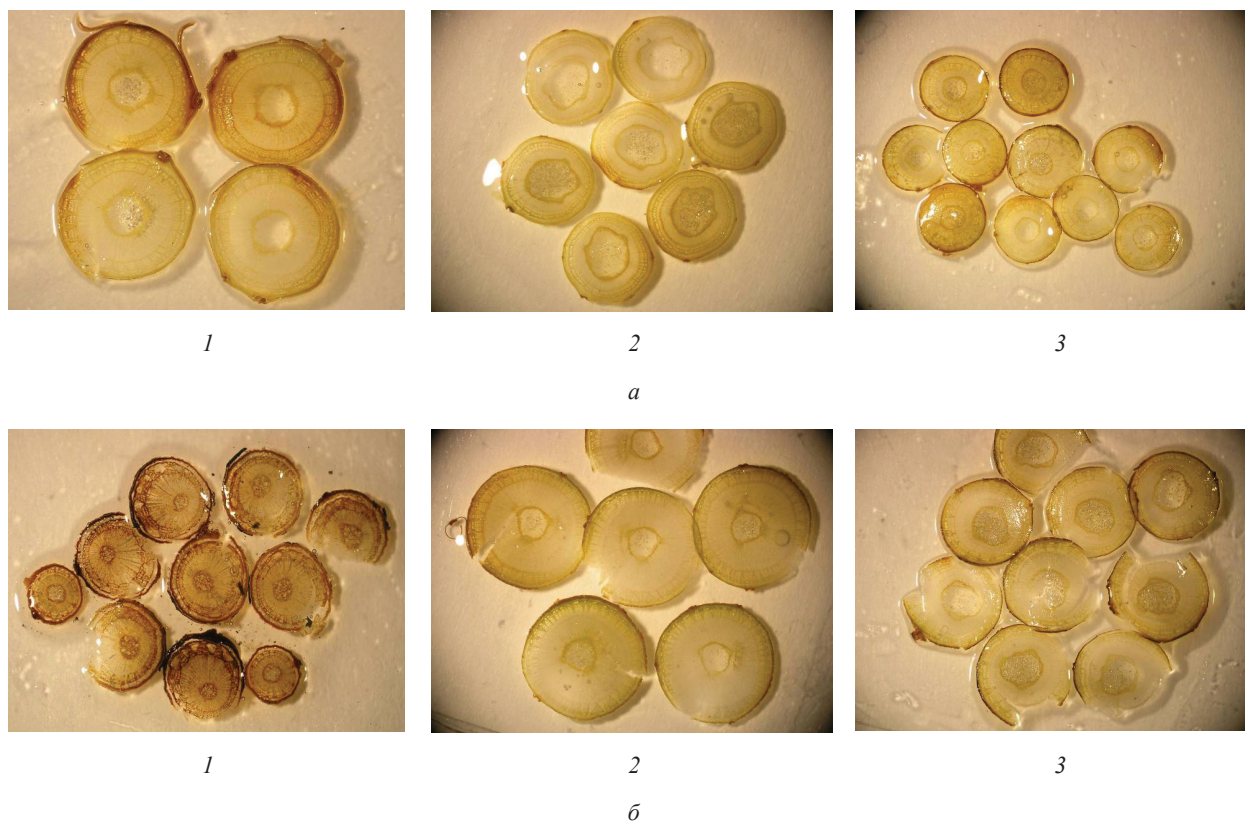
Чем больше попадает хлоридов на побеги растений, тем заметнее возрастает концентрация хлора

в ассимиляционных органах, что замедляет протекание физиологических процессов и, прежде всего, снижает интенсивность фотосинтеза. Нарушение работы ассимиляционного аппарата ведет к гибели побегов и задержке роста деревьев, что выражается в угнетении общего состояния и ослаблении устойчивости к другим неблагоприятным факторам окружающей среды. Воздействие хлоридов проявляется в биохимических нарушениях процессов ассимиляции и метаболизма в клетках растений, отмирают ткани и блокируются проводящие пути, что приводит к ослаблению и гибели всего растения [28]. При содержании в листьях или хвое хлора свыше 1...2 % древесные растения погибают [16].

Наиболее поврежденными среди оцениваемых пород за 16 лет исследований оказались ольха черная, липа, ель и береза (индекс жизненного состояния древостоев в среднем за 2004–2019 гг. составил 48,39; 50,85; 56,48 и 57,08 % соответственно); менее других повреждены деревья с толстой корой и высоко поднятой кроной: клен, сосна, лиственница (68,75; 70,31 и 78,06 %) [13, 29, 30]. Низкое жизненное состояние ольхи черной объясняется ее приуроченностью к пониженным участкам, где дорога проходит, как правило, в насыпи, а также накоплением рассолов, стекающих в понижения. Липа и береза обладают низкой устойчивостью к воздействию ПГР, по-видимому, вследствие малой толщины коры одно-двухлетних побегов и чешуек на почках, не способных противодействовать проникновению хлоридов [29, 30]. В 2010, 2012 и 2017 гг. причиной повреждения березы стало не только воздействие соли, но и поздние весенние заморозки, сильно повредившие деревья. Более других пород оказывались поврежденными ели в снегозадерживающих полосах, мелкие деревья и подрост сосны, подлесок можжевельника (вплоть до полной гибели).

Для анализа изменений в анатомическом строении побегов были отобраны образцы на одно-





**Рис. 2.** Побеги липы, отобранные в придорожных насаждениях на различном удалении от дороги и на контроле: *a* — однолетние; *б* — двулетние; 1 — первый ряд придорожных насаждений; 2 — второй ряд придорожных насаждений; 3 — контроль  
**Fig. 2.** Linden shoots, selected in roadside plantations at various distances from the road and under control: *a* — annual; *б* — biennial; 1 — the first row of roadside plantings; 2 — the second row of roadside plantings; 3 — control

возрастных (40-летних) посадках липы, расположенных непосредственно возле проезжей части проспекта Пушкина (первый ряд) и на расстоянии 10...12 м (ширина газона) от проезжей части — второй ряд. Контрольные деревья отбирались на территории Центрального ботанического сада, где при всех равных фоновых условиях полностью отсутствовало воздействие ПГР. Деревья первого ряда имеют признаки повреждения: укороченные побеги; много усохших прошлогодних побегов; мелкие, рано пожелтевшие и опадающие листья. У деревьев второго ряда был внешне здоровый вид: длинные побеги, крупные листья, имеющие темно-зеленую окраску.

Анатомические изменения (рис. 2) липы выражаются: в уменьшении количества устьиц; в увеличении клеток эпидермиса; разрастании клеток губчатой и полисадной паренхимы; в разрушении первичных лубяных волокон, обладающих тонкостенными клетками; в уменьшении годичного прироста. К тому же, во вторичном лубе уменьшается количество лубяных лучей, соединяющих сердцевину с первичной корой; поражается проводящая система центрального цилиндра; нарушается камбиальная деятельность.

В процессе многолетних исследований растений, произрастающих вблизи автомагистралей, а также вдоль улиц и дорог в г. Минске был получен обширный материал, позволяющий четко наметить определенные уровни засоленности, угнетающие разные виды деревьев и кустарников или приводящие к их гибели. Одним из рациональных путей решения проблемы засоления придорожных территорий является подбор ассортимента способного выдерживать негативную антропогенную нагрузку, в том числе хлоридное загрязнение [30–32]. Под солеустойчивостью подразумевается способность растений в силу существующих анатомо-физиологических особенностей выдерживать загрязнение вредными легкорастворимыми солями [33]. По этому признаку выделены следующие категории растений:

– *сильноустойчивые к соляному загрязнению*: аморфа кустарниковая; боярышники колючий и кроваво-красный; вяз малый; гледичия трехколочковая; ива вавилонская; клен Гиннала; лох узколистный; можжевельник казацкий; свидина кроваво-красная; тамариски изящный, мелкоцветковый, развесистый, Хохенакера; тополя бальзамический, Болле, Жака, черный (особенно пира-



мидалевая форма); шелковица белая; шиповник морщинистый; в том числе виды, проявляющие склонность к инвазиям, использование которых ограничено: арония черноплодная, дуб красный, карагана древовидная (акация желтая), облепиха обыкновенная, пузыреплодник калинолистный, робиния ложноакациевая (акация белая), свидина побегообразующая, тополь белый.

– *среднеустойчивые к соляному загрязнению*: бересклет бородавчатый; барбарис Тунберга; береза маньчжурская; бук лесной; вязы гладкий, равнинный, шершавый; дуб черешчатый; жимолость татарская; ивы ломкая и белая; кизил обыкновенный; кизильник блестящий; клены полевой, татарский, серебристый, остролистный; крушина слабительная; лох смешиваемый; миндаль низкий; осина; рябина обыкновенная; скумпия обыкновенная; сирень обыкновенная; слива приземистая; смородина золотистая; смородина черная; сосна обыкновенная; сосна черная альпийская; сумах уксусный; тополя гибридный, дельтовидный, канадский, Симона; шиповники коричноморщинистый, майский (коричный), сизый, Шерарда; форзиция европейская, ясень пенсильванский;

– *слабоустойчивые к соляному загрязнению*: бархат амурский; береза повислая; бересклет европейский; бирючина обыкновенная; все виды боярышников за исключением колючевого и кроваво-красного; вишня кустарниковая; груши дикая, обыкновенная; ель европейская; жестер слабительный; ивы козья, корзиночная, остролистная, пепельная, пурпурная, пятитычинковая; ирга колосистая и ольхолистная; кизил шведский; клены красный и ложноплатановый (явор); липы американская, амурская, войлочная; магония падуболистная; махалебка обыкновенная; миндаль трехлопастной; можжевельник виргинский; орех серый; робиния клейкая; сирень венгерская; сирень Генри; сливы колючая (терн), растопыренная, степная, терновая; смородины альпийская, колосистая, красная; снежнаягодник приречный; спиреи белая, Бумальда, зверобоелистная, ложноиволистная, многоцветковая, ниппонская, средняя, японская; тополя берлинский, душистый, корейский, лавролистный, седоватый; чубушники мелколистный и обыкновенный; шиповники виргинский, войлочный, гололистный, даурский, кустарниковый, ржаво-красный, собачий, столбчатый, франкфуртский, щитконосный, Юндзилла; черемуха Маака, ясени зеленый, ланцетолистный, обыкновенный, орехолистный, остроплодный;

– *очень слабоустойчивые и неустойчивые к соляному загрязнению*.

К последней категории относится большинство используемых древесных и кустарниковых видов.

Решающими факторами, от которых зависит состояние и устойчивость посадок, являются химизм и степень засоления, мощность почвенного профиля, не содержащего вредных для растений легкорастворимых солей в количестве, оказывающем на них токсическое действие. Поэтому при подготовке посадочного места его дно следует разрыхлить на глубину 10...15 см, а затем уложить на него слой из крупнозернистого песка или щебня толщиной 15...25 см в целях обеспечения дренажа почвогрунта, прерывания капиллярного подъема минерализованных растворов к корням растений и поверхности почвы, изоляции корней от контакта с неблагоприятными грунтами и водами. Технология посадок должна включать в себя обязательное заполнение посадочной ямы водой.

## Выводы

Результатами проведенных исследований установлено, что основная причина ухудшения состояния придорожных биогеоценозов в Беларуси обусловлена техногенным загрязнением используемыми в зимний период компонентами ПГР, произведенных на основе хлорида натрия, в сочетании с комплексом других негативных факторов. Учитывая высокое содержание ионов натрия и хлора, существующую зависимость аккумуляции их в почве, растениях и общие тенденции распределения, можно констатировать, что автодороги являются источником поступления загрязнения в природные экосистемы. Зоны наибольшей их концентрации в лесных биогеоценозах находятся в прямой зависимости от интенсивности движения автотранспорта. Анализ комплексного загрязнения свидетельствует о наивысшем загрязнении на опушках и в полосе до 35 м от полотна дороги. Отмечена тенденция к увеличению содержания ионов натрия и хлора в почве при повторных наблюдениях.

Изучение последствий загрязнения придорожных территорий, безусловно, оправдано, поскольку формирует представления о современном состоянии окружающей среды вдоль дорог и является базовым материалом для дальнейших исследований. И если сегодня можно констатировать, что аккумуляция веществ-загрязнителей, как правило, не достигает опасного уровня, влияющего на жизненно необходимые функции растительных сообществ, то угроза их вовлечения в биологический круговорот, последней ступенью которого является человек, несомненно, существует.

В будущем следует ожидать дальнейшего ухудшения состояния лесных биогеоценозов вдоль автодорог, поскольку количество выбросов от передвижных источников загрязнения и количество вносимых ПГР продолжают увеличиваться: растет риск проявления эффекта

накопления. Состояние отдельных компонентов лесных биогеоценозов вдоль автодорог убеждает в необходимости проведения мероприятий по поддержанию их устойчивости и функциональной эффективности.

По результатам анализа солеустойчивости дикорастущих и культивируемых видов деревьев и кустарников флоры Беларуси, используемых при озеленении дорог и населенных пунктов (221 вид), подобран ассортимент древесно-кустарниковых растений, устойчивых к загрязнению компонентами ПГР, произведенных на основе хлорида натрия.

## Список литературы

- [1] Судник А.В., Вознячук И.П. Оценка степени загрязнения придорожных экосистем комплексом техногенных металлов и хлоридов // Маниторинг і ацэнка стану расліннага свету: матэрыялы V Міжнар. навук. канф. Мінск, Белавежская пушча, 8–12 кастрычніка 2018 г. Минск: Колорград, 2018. С. 186–188.
- [2] Бурова О.В. Особенности воздействия противогололедных материалов на почвы придорожных территорий // Автомобильные дороги и мосты, 2008. № 1. С. 49–52.
- [3] Судник А.В., Ефимова О.Е., Яковлев А.П. Влияние противогололедных реагентов на зеленые насаждения вдоль улиц и дорог г.Минска // Леса Евразии — Белорусское Поозерье: материалы XII Междунар. конф. молодых ученых, посвященная 145-летию Г.Ф. Морозова. НП «Браславские озера», Браслав, Беларусь — Аукштайтский национальный парк, г. Игналина, Литва, 30 сентября–6 октября 2012 г. М.: МГУЛ, 2012. С. 292–294.
- [4] Судник А.В., Новицкий Р.В. Воздействие автомобильных дорог на природно-растительные комплексы и животный мир Беларуси: состояние, реальные и потенциальные угрозы, мониторинг // Материалы науч.-техн. конф., посвященной 50-летию РУП «БелдорНИИ». Минск, 25–26 октября 2012. Минск: БелдорНИИ, 2012. С. 223–228.
- [5] Яковлев А.П., Судник А.В. Влияние солевых реагентов на экологическое состояние почвы и растений в городской среде // Состояние и перспективы развития зеленого строительства в Республике Беларусь: тез. респ. науч.-практ. семинара (г. Минск, 26–27 апреля 2018 г.), НАН Беларуси, ЦБС НАН Беларуси / под ред. В.В. Титка. Минск: Медисонт, 2018. С. 212–215.
- [6] Бельков М.В. Лазерный атомно-эмиссионный анализ аэрального загрязнения зеленых насаждений противогололедными реагентами // Прикладная спектроскопия, 2010. Т. 77, № 2. С. 292–298.
- [7] Центральный ботанический сад НАН Беларуси: сохранение, изучение и использование биоразнообразия мировой флоры / под ред. В.В. Титка, В.Н. Решетникова. Минск: Беларус. навука, 2012. 345 с.
- [8] Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследования). М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
- [9] Методика проведения мониторинга растительного мира в составе Национальной системы мониторинга окружающей среды Республики Беларусь / под ред. А.В. Пугачевского. Минск: Право и экономика, 2011. 165 с.
- [10] ICP Forests Manual. URL: <http://icp-forests.net/page/icp-forests-manual> (дата обращения 13.04.2020).
- [11] Санитарные правила в лесах Республики Беларусь (утв. Постановлением Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь 19.12.2016 № 79). Минск, 2016. 21 с. URL: [https://pravo.by/upload/docs/or/W21631603\\_1483131600.pdf](https://pravo.by/upload/docs/or/W21631603_1483131600.pdf) (дата обращения 13.04.2020).
- [12] Алексеев В.А., Чертов О.Г., Сергейчик С.А. Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение / под ред. В.А. Алексеева. Л.: Наука, 1990. 197 с.
- [13] Судник А.В., Голушко Р.М. Состояние лесных и защитных древесных насаждений вдоль автомобильных дорог в Беларуси (по данным мониторинговых наблюдений) // Маниторинг і ацэнка стану расліннага свету: Матэрыялы V Міжнар. навук. канф. Мінск, Белавежская пушча, 8–12 кастрычніка 2018 г. Минск: Колорград, 2018. С. 192–194.
- [14] Добровольский В.В. Основы биогеохимии. М.: Высшая школа, 1998. 413 с.
- [15] Популярная библиотека химических элементов / под ред. В.В. Станцо. М.: Наука, 1977. Кн. 1. 574 с.
- [16] Рахтеенко Л.И., Савельев В.В. Минеральные удобрения в повышении продуктивности сосновых культур-фитоценозов. Минск: Наука и техника, 1985. 136 с.
- [17] Какарека С.В., Хомич В.С., Кухарчик Т.И. Выбросы тяжелых металлов в атмосферу: Опыт оценки удельных показателей / под ред. В.Ф. Логинова. Минск: Ин-т геологических наук НАНБ, 1998. 156 с.
- [18] Сидорович Е.А. Аккумуляция ионов хлора почвами и ассимиляционными органами деревьев в городских насаждениях Минска // Проблемы озеленения городов: альманах, 2004. Вып. 10. С. 203–207.
- [19] Ефимова О.Е. Оценка трансформации нижних ярусов лесной растительности вдоль Минской кольцевой автомобильной дороги // Леса Евразии — Уральские горы. Материалы V Междун. конф. молод. ученых, посвященной 175-летию первого лесоустройства на Урале и 160-летию со дня рождения лесовода Ф.А. Теплоухова. Чебаркуль, УГЛТУ. М.: МГУЛ, 2005. С. 42–44.
- [20] Sudnik A.V., Vozniachuk I.P. State of forest ecosystems in the zone of influence of roads in Belarus // ENVIROAD-2009. II International Conference Environmentally Friendly Roads. October 15–16, 2009. Warsaw: Road & Bridge Research Institute, 2009. 10 p.
- [21] Черноусенко Г.И., Ямнова И.А., Скрипникова М.И. Антропогенное засоление почв Москвы // Почвоведение, 2003, № 1. С. 97–105.
- [22] Медведев С.С. Физиология растений. СПб.: изд-во С-Петербурга, 2004. 336 с.
- [23] Рыжиков В.А. Эколого-геохимическая оценка автотранспортных ландшафтно-функциональных комплексов (на примере г. Минска): автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.36. Геоэкология. Минск: Институт природопользования, 2010. 24 с.
- [24] Строгонов Б.П. Физиологические основы солеустойчивости растений (при разнокачественном засолении почв). М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1962. 366 с.
- [25] Sudnik A.V. Influence of roads on nature-vegetative complexes and fauna of Belarus // ENVIROAD-2009. II Int. Conf. Environmentally Friendly Roads. October 15–16, 2009. Warsaw: Road & Bridge Research Institute, 2009. 8 p.
- [26] Судник А.В., Ефимова О.Е. Анализ аэрального загрязнения зеленых насаждений вдоль МКАД компонентами противогололедных реагентов // Леса Евразии — Польские леса: Материалы IX Междунар. конф. молод. ученых, Курник, Польша, 24–30 мая 2009 г. М.: МГУЛ, 2009. С. 90–92.
- [27] Судник А.В. Анализ корреляционной зависимости состояния древостоев в опушечной полосе от нагрузки на

- автодорогах // Леса Евразии — Северный Кавказ: Материалы VIII Междун. конф. молод. ученых, посвящ. 270-летию А.Т. Болотова: Т. 1. Сочи, Краснодарский край, 6–12 октября 2008 г. М.: МГУЛ, 2008. С. 84–88.
- [28] Меланхолин П.Н., Лысыков А.Б. Изменение лесной растительности и почвы под влиянием Московской кольцевой автодороги // Лесоведение, 2002, № 4. С. 53–60.
- [29] Состояние природной среды Беларуси: Экологический бюллетень, 2006–2015 г. / под ред. В.Ф. Логинова. Минск: Изд. центр БГУ, 2007–2016.
- [30] Яковлев А.П. Устойчивость древесно-кустарниковых растений к негативному влиянию противогололедных материалов // Антропогенная трансформация ландшафтов: Материалы IV Респуб. науч.-метод. конф. Минск, 29–30 сентября 2008 г. Минск: Изд-во БГПУ, 2008. С. 98–102.
- [31] Судник А.В., Яковлев А.П. Типовая схема проектирования мероприятий по минимизации воздействия автомобильных дорог на растительность придорожных территорий // Проблемы сохранения биологического разнообразия и использования биологических ресурсов: Матер. III Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 110-летию со дня рождения академика Н.В.Смольского, Минск, Беларусь 7–9 октября 2015 г. В 2 ч. Ч.1. / Под ред. В.В.Титка. Минск: Конфидо, 2015. С. 203–208.
- [32] Судник А.В. Разработка комплекса мер по минимизации воздействия строительства и содержания автодорог на растительность придорожных территорий // Сб. науч. тр. «Природные ресурсы и окружающая среда». Минск: Беларуская навука, 2016. С. 113–117.
- [33] Судник А.В., Яковлев А.П., Скуратович А.Н. Ассортимент древесно-кустарниковых растений, устойчивых к загрязнению противогололедными реагентами // Актуальные проблемы развития лесного комплекса и ландшафтной архитектуры: Матер. Междунар. науч.-практ. конф., Брянск, 6–7 апреля 2016 г. / отв. ред. А.В. Скок. Брянск: Брянский государственный инженерно-технологический университет, 2016. С. 288–293.

## Сведения об авторах

**Судник Александр Владимирович** — канд. биол. наук, заведующий сектором мониторинга растительного мира Института экспериментальной ботаники им. В.Ф. Купревича НАН Беларуси, [asudnik@tut.by](mailto:asudnik@tut.by)

**Вознячук Ирина Петровна** — канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник сектора мониторинга растительного мира Института экспериментальной ботаники им. В.Ф. Купревича НАН Беларуси, [ipv@tut.by](mailto:ipv@tut.by)

Поступила в редакцию 22.06.2020.

Принята к публикации 29.09.2020.

## CONSEQUENCES OF POLLUTION ON ROADSIDE TERRITORIES BY SALT REAGENTS ON SOIL AND PLANTS ECOLOGICAL STATE IN FOREST BIOGEOCENOSSES

**A.V. Sudnik, I.P. Voznyachuk**

V.F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of National Academy of Sciences of Belarus, 27, Akademicheskaya st., 220072, Minsk, Republic of Belarus

[asudnik@tut.by](mailto:asudnik@tut.by)

The study results indicate that the main reason for deterioration of state of roadside plantings in Belarus is due to technogenic pollution by used in winter period components of antiglaze reagents containing sodium chloride as well as a combination of other negative factors. Given the high content of sodium and chlorine ions, the existing dependence of accumulation in soil, plants, and general trends of distribution territorially, it can be ascertained that roads are a source of their entry into natural ecosystems, which today act as their accumulators. The zones of their greatest concentration in landscapes are directly dependent on the intensity of traffic. Pollution of biogeocenosis can be traced at least 300 meters from the roadway, the greatest occurs at the edges and in a strip up to 35 m away from a road. A tendency toward an increase in the content of chloride in the soil relative to earlier descriptions was noted. The consequences of pollution on roadside territories by sodium and chlorine ions on the ecological state of soil and plants of forest biogeocenosis were described. While maintaining the existing road maintenance regimen in winter period, the threat of reaching a “toxicity threshold” for plants, after which inhibition of plant growth and development begins, is a matter of time. Assortment of tree-shrub plants that are resistant to pollution by antiglaze reagents was selected according to the results of the salt tolerance analysis of wild-growing and cultivated species of trees and shrubs (221 species) of the Belarus flora used in landscaping roads and settlements.

**Keywords:** road, roadside territory, antiglaze reagents (AGR), ions of sodium (Na<sup>+</sup>) and chlorine (Cl<sup>-</sup>), pollution, state

**Suggested citation:** Sudnik A. V., Voznyachuk I.P. *Posledstviya vozdeystviya zagryazneniya pridorozhnykh territoriy komponentami solevykh reagentov na ekologicheskoe sostoyanie pochvy i rasteniy v lesnykh biogeotsenozakh* [Consequences of pollution on roadside territories by salt reagents on soil and plants ecological state in forest biogeocenoses]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 6, pp. 83–95.

DOI: 10.18698/2542-1468-2020-6-83-95



## References

- [1] Sudnik A.V., Voznyachuk I.P. *Otsenka stepeni zagryazneniya pridorozhnykh ekosistem kompleksom tekhnogennykh metallov i khloridov* [Assessment of the degree of pollution of roadside ecosystems with a complex of technogenic metals and chlorides]. Manitoryng i atsenka stanu raslinnaga svetu: materyaly V Mizhnarodnay navukovay kanferentsyi. Minsk, Belavezhskaya Pushcha, 8–12 October 2018. Minsk: Kolorgrad, 2018, pp. 186–188.
- [2] Burova O.V. *Osobennosti vozdeystviya protivogolelednykh materialov na pochvy pridorozhnykh territoriy* [Peculiarities of the impact of anti-icing materials on the soils of roadside areas]. *Avtomobil'nye dorogi i mosty* [Automobile roads and bridges], 2008, no. 1, pp. 49–52.
- [3] Sudnik A.V., Efimova O.E., Yakovlev A.P. *Vliyanie protivogolelednykh reagentov na zelenye nasazhdeniya vdol' ulits i dorog g.Minska* [Influence of anti-icing reagents on green spaces along streets and roads of Minsk]. *Lesa Yevrazii — Belorusskoye Poozer'ye: materialy XII Mezhdunar. konf. molodykh uchenykh, posvyashchennaya 145-letiyu G.F. Morozova* [Forests of Eurasia — Belarusian Poozerie: materials of the XII Intern. conf. young scientists dedicated to the 145th anniversary of G.F. Morozov]. NP «Braslav Lakes», Braslav, Belarus — Aukshtaitiyskiy National Park, Ignalina, Lithuania, September 30 – October 6, 2012. Moscow: MGUL, 2012, pp. 292–294.
- [4] Sudnik A.V., Novitskiy R.V. *Vozdeystvie avtomobil'nykh dorog na prirodno-rastitel'nye komplekсы i zhitovnyy mir Belarusi: sostoyanie, real'nye i potentsial'nye ugrozy, monitoring* [Impact of highways on natural plant complexes and fauna of Belarus: state, real and potential threats, monitoring]. *Materialy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 50-letiyu RUP «BeldorNII»* [Materials of the scientific and technical conference dedicated to the 50th anniversary of RUE «BeldorNII»]. Minsk, October 25–26, 2012. Minsk: BeldorNII, 2012, pp. 223–228.
- [5] Yakovlev A.P., Sudnik A.V. *Vliyanie solevykh reagentov na ekologicheskoe sostoyanie pochvy i rasteniy v gorodskoy srede* [The influence of salt reagents on the ecological state of soil and plants in the urban environment]. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya zelenogo stroitel'stva v Respublike Belarus': tez. Resp. nauch.-prakt. seminar (g. Minsk, 26–27 aprelya 2018 g.)* [State and prospects for the development of green building in the Republic of Belarus: abstracts]. Rep. scientific-practical seminar (Minsk, April 26–27, 2018), National Academy of Sciences of Belarus, Central Library System of the National Academy of Sciences of Belarus. Ed. V.V. Titok. Minsk: Medison, 2018, pp. 212–215.
- [6] Bel'kov M.V. *Lazernyy atomno-emissionnyy analiz aeral'nogo zagryazneniya zelenykh nasazhdeniy protivogolelednymi reagentami* [Laser atomic emission analysis of aerial pollution of green spaces with anti-icing reagents]. *Prikladnaya spektroskopiya* [Applied Spectroscopy], 2010, v. 77, no. 2, pp. 292–298.
- [7] *Tsentral'nyy botanicheskiy sad NAN Belarusi: sokhraneniye, izuchenie i ispol'zovanie bioraznoobraziya mirovoy flory* [Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus: conservation, study and use of the biodiversity of the world flora]. Ed. V.V. Titok, V.N. Reshetnikov. Minsk: Belarus Navuka, 2012, 345 p.
- [8] Dospekhov B.A. *Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovaniya)* [Field experiment technique (with the basics of statistical processing of research results)]. Moscow: Agropromizdat, 1985, 351 p.
- [9] *Metodika provedeniya monitoringa rastitel'nogo mira v sostave Natsional'noy sistemy monitoringa okruzhayushchey sredy Respubliki Belarus'* [Methodology for monitoring the flora as part of the National Environmental Monitoring System of the Republic of Belarus]. Ed. A.V. Pugachevsky. Minsk: Law and Economics, 2011, 165 p.
- [10] ICP Forests Manual. Available at: <http://icp-forests.net/page/icp-forests-manual> (accessed 13.04.2020).
- [11] *Sanitarnye pravila v lesakh Respubliki Belarus' (utv. Postanovleniem Ministerstva lesnogo khozyaystva Respubliki Belarus' 19.12.2016 № 79)* [Sanitary rules in the forests of the Republic of Belarus (approved by the Resolution of the Ministry of Forestry of the Republic of Belarus 19.12.2016 No. 79)]. Minsk, 2016, 21 p.
- [12] Alekseev V.A., Chertov O.G., Sergeychik S.A. *Lesnye ekosistemy i atmosfernoye zagryazneniye* [Forest ecosystems and atmospheric pollution]. Ed. V.A. Alekseev. Leningrad: Nauka (Leningradskoe department), 1990, 197 p.
- [13] Sudnik A.V., Golushko R.M. *Sostoyanie lesnykh i zashchitnykh drevesykh nasazhdeniy vdol' avtomobil'nykh dorog v Belarusi (po dannym monitoringovykh nablyudeniy)* [Condition of forest and protective tree plantations along highways in Belarus (according to monitoring observations)]. *Manitoryng i atsenka stanu raslinnaga svetu: Materyaly V Mizhnarodnay navukovay kanferentsyi*. Minsk, Belavezhskaya Pushcha, 8–12 October, 2018. Minsk: Kolorgrad, 2018, pp. 192–194.
- [14] Dobrovolskiy V.V. *Osnovy biogeokhimii* [Fundamentals of biogeochemistry]. Moscow: Vysshaya shkola [Higher school], 1998, 413 p.
- [15] *Populyarnaya biblioteka khimicheskikh elementov* [Popular library of chemical elements]. Ed. V.V. Stanzo. Moscow: Nauka, 1977, book 1, 574 p.
- [16] Rakhtenko L.I., Savel'ev V.V. *Mineral'nye udobreniya v povyshenii produktivnosti sosnovykh kul'turfitosenozov* [Mineral fertilizers in increasing the productivity of pine culture phytocenoses]. Minsk: Nauka i tekhnika [Science and Technology], 1985, 136 p.
- [17] Kakareka S.V., Khomich V.S., Kukharchik T.I. *Vybrosy tyazhelykh metallov v atmosferu: Opyt otsenki udel'nykh pokazateley* [Emissions of heavy metals into the atmosphere: Experience in assessing specific indicators]. Ed. V.F. Loginov. Minsk: Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus, 1998, 156 p.
- [18] Sidorovich E.A. *Akkumulyatsiya ionov khloro pochvami i assimilatsionnymi organami derev'ev v gorodskikh nasazhdeniyakh Minska* [Accumulation of chlorine ions by soils and assimilation organs of trees in urban plantations of Minsk]. *Problemy ozeleneniya gorodov: al'manakh* [Problems of urban greening: almanac], 2004, iss. 10, pp. 203–207.
- [19] Efimova O.E. *Otsenka transformatsii nizhnikh yarusov lesnoy rastitel'nosti vdol' Minskoy kol'tsevoy avtomobil'noy dorogi* [Assessment of the transformation of the lower tiers of forest vegetation along the Minsk ring road]. *Lesa Evrazii — Ural'skie gory. Mater. V Mezhdunar. konf. molod. uchenykh, posvyashchennoy 175-letiyu pervogo lesoustroystva na Urale i 160-letiyu so dnya rozhdeniya lesovoda F.A. Teploukhova* [Forests of Eurasia — Ural mountains. Mater. V Int. conf. young scientists dedicated to the 175th anniversary of the first forest management in the Urals and the 160th anniversary of the birth of the forester F.A. Teploukhov]. Chebarkul, UGLTU. Moscow: MGUL, 2005, pp. 42–44.
- [20] Sudnik A.V., Vozniachuk I.P. *State of forest ecosystems in the zone of influence of roads in Belarus. ENVIROAD-2009. II International Conference Environmentally Friendly Roads. October 15–16, 2009. Warsaw: Road & Bridge Research Institute, 2009. 10 p.*



- [21] Chernousenko G.I., Yamnova I.A., Skripnikova M.I. *Antropogennoe zasolenie pochv Moskvy* [Anthropogenic soil salinization in Moscow]. *Pochvovedenie* [Pochvovedenie], 2003, no. 1, pp. 97–105.
- [22] Medvedev S.S. *Fiziologiya rasteniy* [Plant physiology]. St. Petersburg: Publishing house of St. Petersburg University, 2004, 336 p.
- [23] Ryzhikov V.A. *Ekologo-geokhimicheskaya otsenka avtotransportnykh landshaftno-funktional'nykh kompleksov (na primere g.Minska)* [Ecological and geochemical assessment of motor transport landscape-functional complexes (on the example of Minsk)]. Dis. Cand. Sci. (Geogr.): 25.00.36. Geoecology. Minsk: Institut prirodopol'zovaniya [Institute of Nature Management], 2010, 24 p.
- [24] Strogonov B.P. *Fiziologicheskie osnovy soleustoychivosti rasteniy (pri raznokachestvennom zasolenii pochv)* [Physiological bases of plant salinity tolerance (in case of different-quality soil salinization)]. Moscow: Publishing house Acad. Sciences USSR, 1962, 366 p.
- [25] Sudnik A.V. Influence of roads on nature-vegetative complexes and fauna of Belarus. ENVIROAD-2009. II International Conference Environmentally Friendly Roads. October 15–16, 2009. Warsaw: Road & Bridge Research Institute, 2009. 8 p.
- [26] Sudnik A.V., Efimova O.E. *Analiz aerial'nogo zagryazneniya zelenykh nasazhdeniy vdol' MKAD komponentami protivogolelednykh reagentov* [Analysis of aerial pollution of green spaces along the Moscow Ring Road with components of anti-icing reagents]. *Lesa Evrazii — Pol'skie lesa*: Mater. IX Mezhdun. konf. molod. uchenykh [Lesa Eurasia — Polish forests: Mater. IX Int. conf. young. Scientists]. Kurnik, Poland, May 24–30, 2009. Moscow: MGUL, 2009, pp. 90–92.
- [27] Sudnik A.V. *Analiz korrelyatsionnoy zavisimosti sostoyaniya drevostoev v opushechnoy polose ot nagruzki na avtodorogakh* [Analysis of the correlation dependence of the state of forest stands in the forest edge on the load on the roads]. *Lesa Evrazii — Severnyy Kavkaz*: Mater. VIII Mezhdun. konf. molod. uchenykh, posvyashch. 270-letiyu A.T. Bolotova [Forests of Eurasia — North Caucasus: Mater. VIII Int. conf. young. scientists dedicated. To the 270th anniversary of A.T. Bolotova]. V. 1. Sochi, Krasnodar Territory, October 6–12, 2008. Moscow: MGUL, 2008, pp. 84–88.
- [28] Melankholin P.N., Lysikov A.B. *Izmenenie lesnoy rastitel'nosti i pochvy pod vliyaniem Moskovskoy kol'tsevoy avtodorogi* [Changes in forest vegetation and soil under the influence of the Moscow Ring Road]. *Russian Journal of Forest Science*, 2002, no. 4, pp. 53–60.
- [29] *Sostoyanie prirodnoy sredy Belarusi: Ekologicheskiy byulleten', 2006–2015 g.* [The state of the natural environment in Belarus: Ecological bulletin, 2006–2015]. Ed. V.F. Loginov. Minsk: Ed. center of BSU, 2007–2016.
- [30] Yakovlev A.P. *Ustoychivost' drevesno-kustarnikovykh rasteniy k negativnomu vliyaniyu protivogolelednykh materialov* [Resistance of woody and shrubby plants to the negative impact of anti-icing materials]. *Antropogennaya transformatsiya landshaftov: mat-ly IV Respublikanskoj nauchno-metodicheskoy konferentsii* [Anthropogenic transformation of landscapes: materials of the IV Republican Scientific and Methodological Conference], Minsk, September 29–30, 2008. Minsk: BSPU Publishing House, 2008, pp. 98–102.
- [31] Sudnik A.V., Yakovlev A.P. *Tipovaya skhema proektirovaniya meropriyatiy po minimizatsii vozdeystviya avtomobil'nykh dorog na rastitel'nost' pridorozhnykh territoriy* [A typical design scheme for measures to minimize the impact of highways on the vegetation of roadside territories]. *Problemy sokhraneniya biologicheskogo raznoobraziya i ispol'zovaniya biologicheskikh resursov: Materialy III Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashchennoy 110-letiyu so dnya rozhdeniya akademika N.V.Smol'skogo* [Problems of biodiversity conservation and use of biological resources: Proceedings of the III Intern. scientific-practical Conf., dedicated to the 110th anniversary of the birth of Academician N.V. Smolsky]. October 7–9, 2015, Minsk, Belarus. At 2 p., part 1. Ed. V.V. Titok. Minsk: Confido, 2015, pp. 203–208.
- [32] Sudnik A.V. *Razrabotka kompleksa mer po minimizatsii vozdeystviya stroitel'stva i soderzhaniya avtodorog na rastitel'nost' pridorozhnykh territoriy* [Development of a set of measures to minimize the impact of road construction and maintenance on the vegetation of roadside areas]. *Sbornik nauchnykh trudov «Prirodnye resursy i okruzhayushchaya sreda»* [Collection of scientific papers «Natural resources and the environment»]. Minsk: Belaruskaya Navuka, 2016, pp. 113–117.
- [33] Sudnik A.V., Yakovlev A.P., Skuratovich A.N. *Assortiment drevesno-kustarnikovykh rasteniy, ustoychivykh k zagryazneniyu protivogolelednymi reagentami* [Assortment of woody and shrubby plants resistant to pollution by anti-icing agents]. *Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa i landshaftnoy arkhitektury: materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Actual problems of the development of the forest complex and landscape architecture: materials of the international. scientific-practical conf.], Bryansk, April 6–7, 2016. Ed. A.V. Dap. Bryansk: Bryansk State Engineer-technol. Univ., 2016, pp. 288–293.

## Authors' information

**Sudnik Aleksandr Vladimirovich** — Cand. Sci. (Biology), Head of vegetation monitoring sector of V.F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of National Academy of Sciences of Belarus, asudnik@tut.by

**Voznyachuk Irina Petrovna** — Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher of vegetation monitoring sector of V.F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus, ipv@tut.by

Received 22.06.2020.

Accepted for publication 29.09.2020.